

# Prospective des effets du changement climatique sur le lac d'Annecy

## *Tendances et défis à venir concernant les services rendus*

©LacSavoieMontBlanc-Monica Dalmasso

SOARES, L.M.V., DESGUÉ-ITIER O., FROSSARD V., BAROUILLET C.,  
BAULAZ, Y., DOMAIZON, I., DORIOZ, JM., GOULON, C.,  
GUILLARD, J., JACQUET, S., RÉALIS, E., TRAN KHAC V., JENNY JP.

Contact : [Jean-Philippe.Jenny@inrae.fr](mailto:Jean-Philippe.Jenny@inrae.fr)

## ➤ Cadre général et objectifs de l'étude

- Dans le cadre de la démarche Plan Lac 2030, préciser les conséquences environnementales du **réchauffement climatique** et de ses changements associés sur l'écosystème du lac d'Annecy (horizons 2030, 2050 et 2100), et les impacts attendus sur les principaux usages du lac.
- Développement de métriques compatibles avec les **indicateurs écologiques** de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (2000)
- Classification des métriques par catégories afin d'estimer les effets du changement climatique sur les principaux **services et usages** écosystémiques rendus par le lac

*Cette étude n'aborde pas la question des pollutions telles que les éléments traces métalliques, les micropolluants organiques, les résidus médicamenteux, les hormones, les microplastiques, ou encore les nanoparticules qui nécessiteraient des études spécifiques.*



# Matériels & Méthodes

---

1

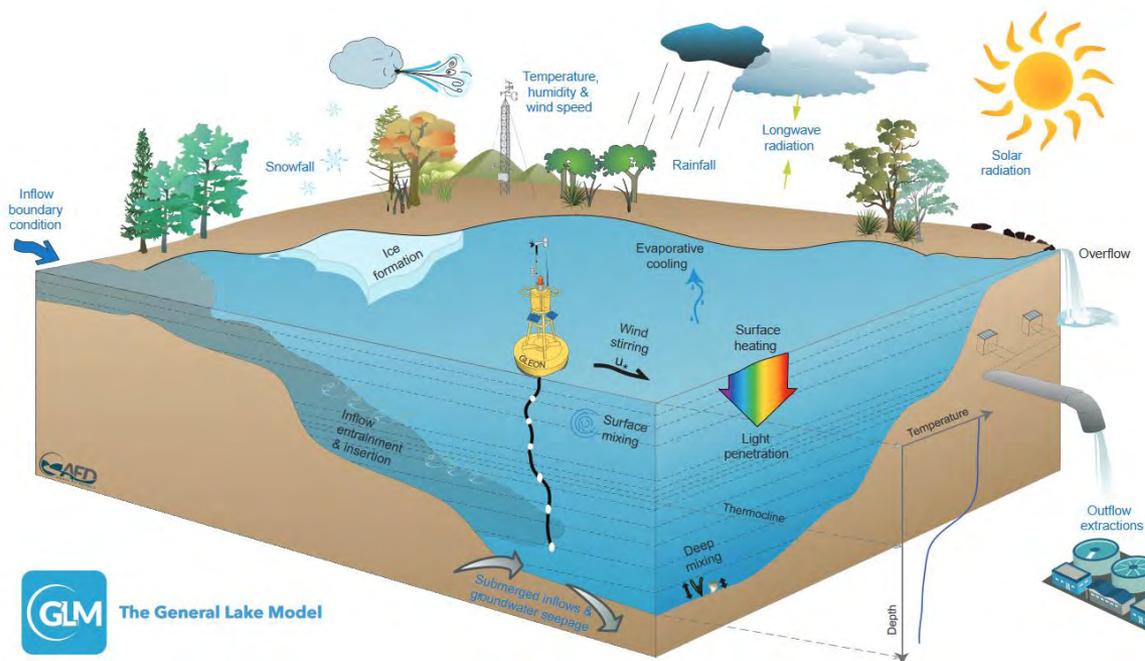
# ➤ Modèle thermique et biochimique

- Synthèse de données
- Calibrations, validations, simulations
- Calcul des métriques et assignation aux services écosystémiques

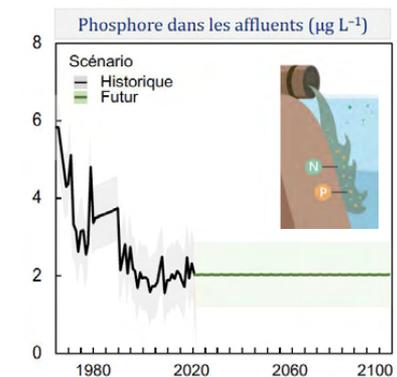
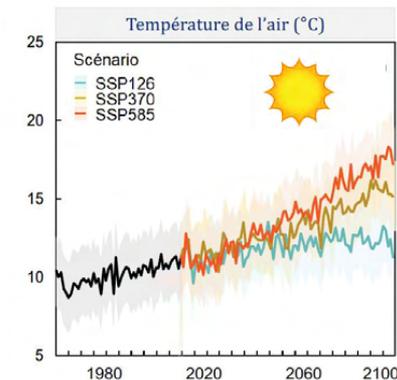


Observatoire des Lacs alpins

*Suivis depuis 1966*



Conceptual diagram of the GLM model (Hipsey et al., 2013).



# ➤ Relation Métriques et Services

Niveau de confiance								
Assez fort			Moyen				Faible	
Métriques physiques- biogéochimiques								
Sorties brutes du modèle journaliers	Températures	Oxygène	Phosphore	Chlorophylle-a	Nitrates	Amonium	Carbone organique total	Coefficient d'extinction de la lumière
<i>Fonctionnement général du lac</i>								
<b>Régime thermique</b>								
Température								
Thermocline								
Stratification								
Brassage								
Hydrodynamique								
<b>Métabolisme</b>								
Oxygène dissous								
<b>Nutriments</b>								
Phosphore								
Nitrates & Ammonium								
<b>Productivité</b>								
Chlorophylle-a								
Transparence								
Niveau trophique								
<b>Matière organique</b>								
<i>Service d'Approvisionnement de l'eau potable</i>								
<b>Eau potable</b>								
Pompage								
<i>Service d'Approvisionnement du peuplement piscicole</i>								
<b>Peuplement piscicole</b>								
Conditions								
a. Ombrotrophes (Saieule)								
b. Coréotrophes (Coregonus)								
Conditions								
a. Ombrotrophes (Saieule)								
b. Coréotrophes (Coregonus)								
Conditions								
i. Charactéristiques								
ii. Production primaire								
<i>Service de Soutien pour le maintien de l'état écologique</i>								
<b>Séquestration des éléments</b>								
Carbone organique total								
<i>Service de Soutien pour le maintien de l'état écologique</i>								
<b>Préservation de la faune aquatique</b>								
État écologique								

Au total **101 métriques** ont été classées par catégories afin d'estimer les effets du changement climatique sur les services écosystémiques rendus par le lac :

- 1) Approvisionnement en eau potable
- 2) Pêche des poissons nobles exploités
- 3) Attraites esthétiques et culturels
- 4) Régulation des cycles géochimiques et le soutien à la séquestration du carbone
- 5) Soutien au maintien de l'état écologique général du lac.

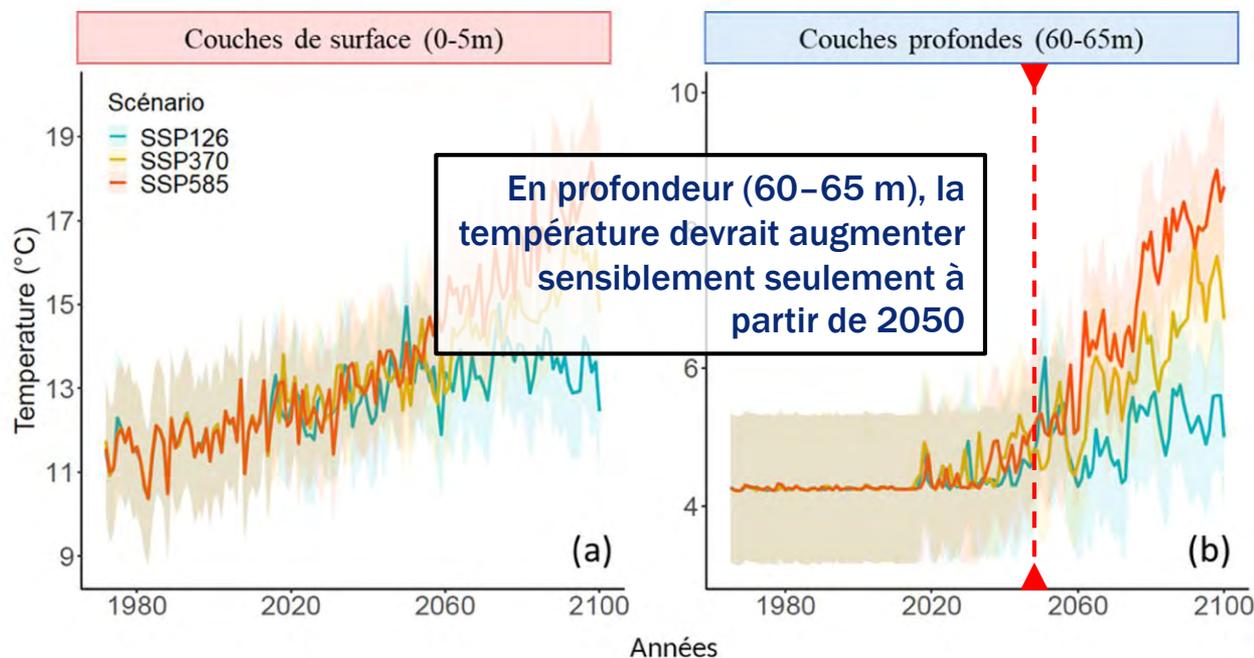
**Figure 8.** Synthèse des variables et métriques physiques- biogéochimiques, ainsi que leurs niveaux de confiance pour évaluer les tendances à long terme de la qualité de l'eau du lac d'Annecy.

An aerial photograph of a large, deep blue lake nestled in a mountainous region. The lake is surrounded by green hills and forests. In the background, a town is visible, and further back, more mountains rise under a clear sky. The text 'Fonctionnement général du lac' is overlaid in white, serif font, with a horizontal line underneath it. A large white number '2' is positioned to the right of the text.

# Fonctionnement général du lac

2

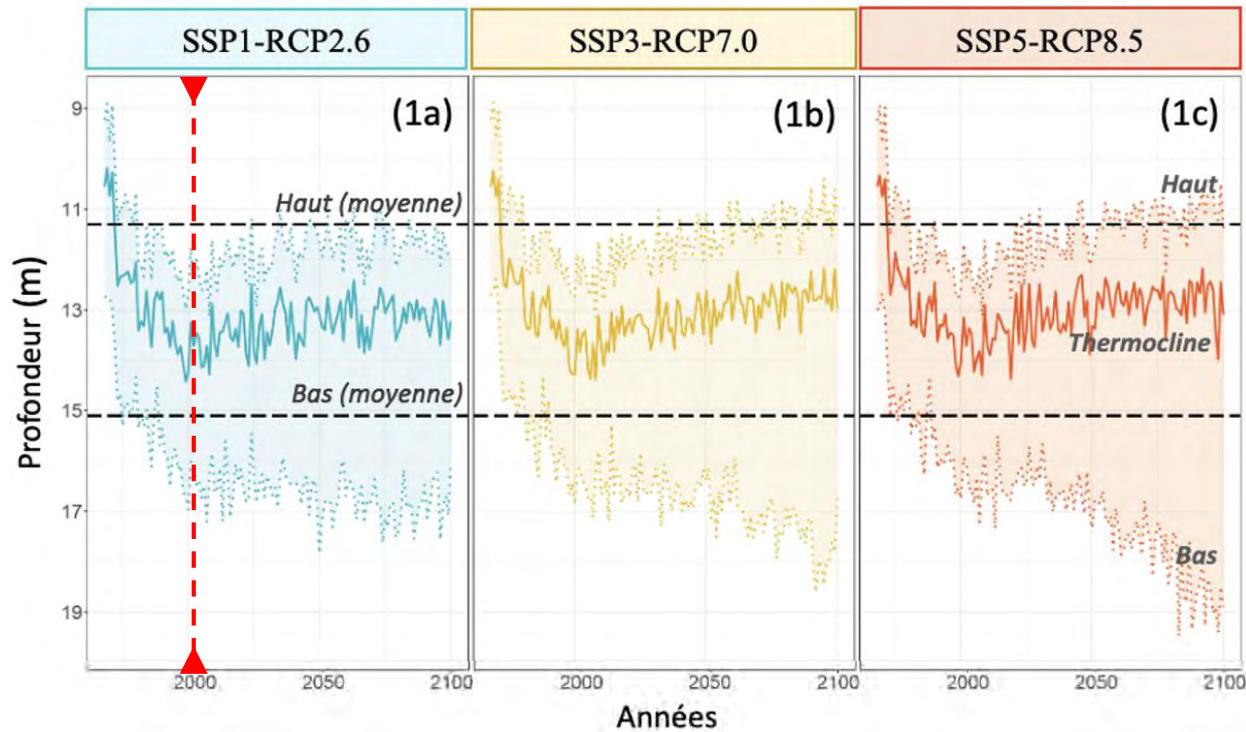
## ➤ Evolution du régime thermique – *Températures*



**Eaux  
de surface  
(0-5 m)**

	1980-2020	2020-2100
Historique	+0,25°C/dec	+1.0°C
Pessimiste SSP585		<b>+0,75°C/dec</b> <b>+6.0°C</b>
Vraisemblable SSP370 (minimum)		<b>+0,26°C/dec</b> <b>+2,1°C</b>
Optimiste SSP126		<b>+0,16°C/dec</b> <b>+1,3°C</b>

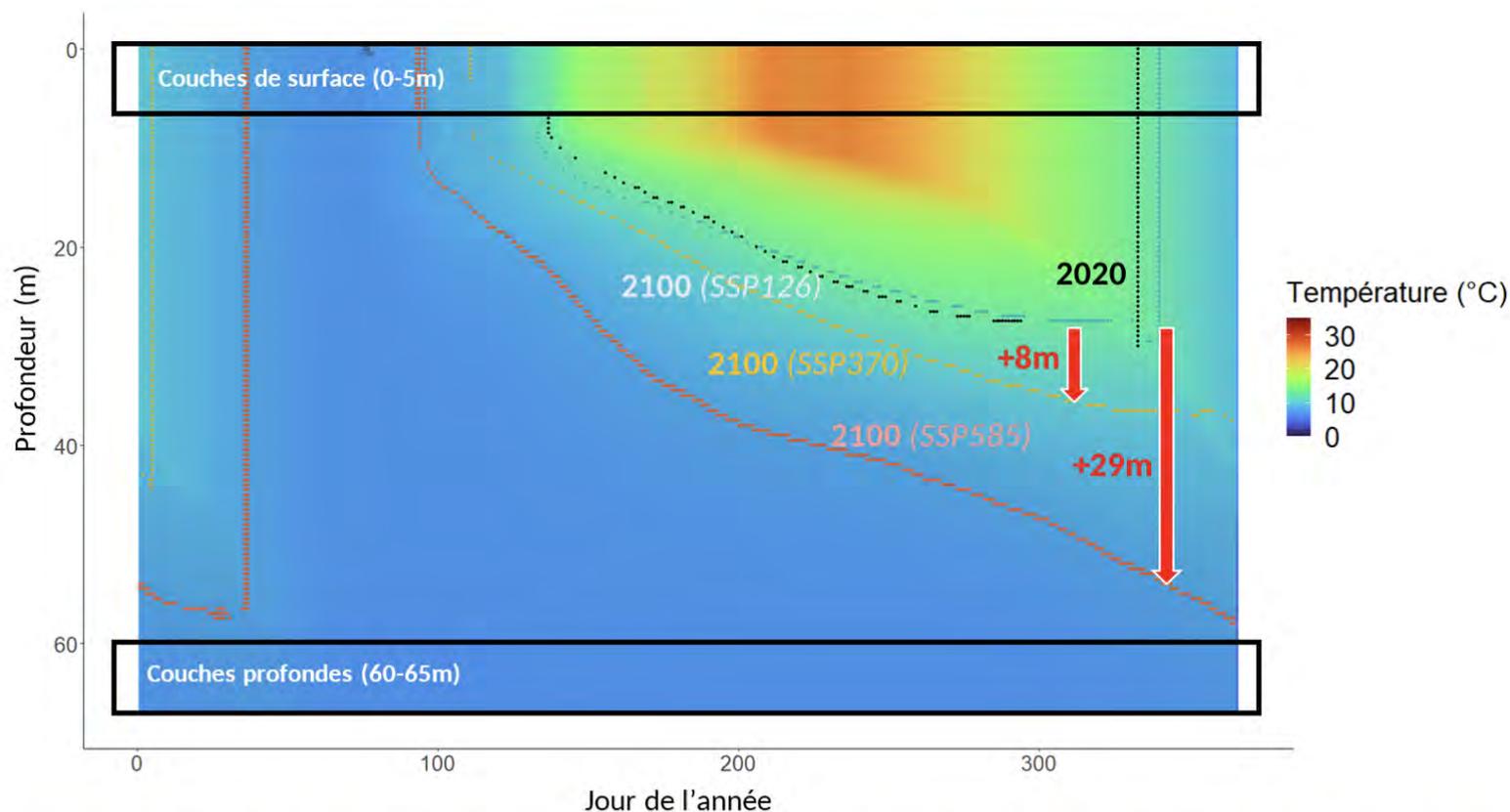
# ➤ Evolution du métalimnion - *Couche intermédiaire entre l'épilimnion et l'hypolimnion*



**L'approfondissement de la thermocline a déjà eu lieu**

# ➤ Approfondissement des couches chaudes

Allongement de la durée de stratification

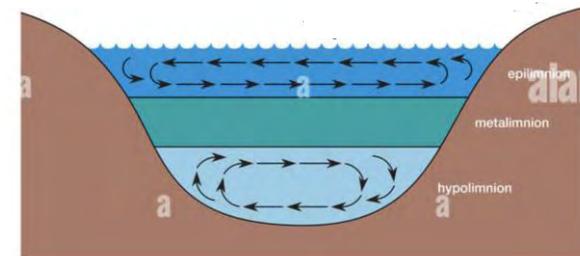


**Figure 14.** Température de l'eau du lac d'Annecy sur un cycle annuel, avec lignes isothermes à 10 °C en 2020 et 2100 selon les 3 scénarios (SSP1-RCP2.6, SSP3-RCP7.0 & SSP5-RCP8.5) dans le lac d'Annecy.

## ➤ Conclusions sur le fonctionnement général du lac

- La hausse des températures des couches de surface devrait se maintenir, avec une augmentation de +2,1 °C d'ici à 2100.
- En profondeur (60–65 m), la température devrait augmenter sensiblement à partir de 2050, avec des rythmes plus lents
- Le métalimnion estival devrait connaître un approfondissement marqué de sa limite inférieure en été de +4,0 m
- La date de début de stratification ne devrait pas évoluer significativement d'ici à l'horizon 2100 et se maintenir aux alentours du mois d'avril
- En revanche, il est à prévoir une augmentation significative de la stratification d'ici à 2050 (en durée et intensité), pour ensuite atteindre un plateau sur la période 2050–2100

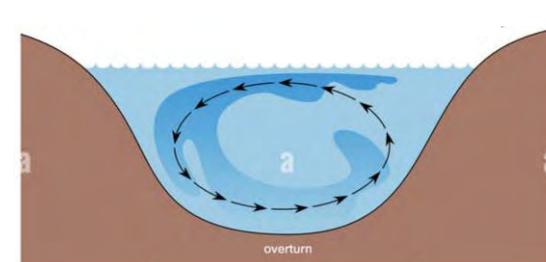
### *Stratification et $T^{\circ}$*



## ➤ Conclusions sur le fonctionnement général du lac

- Les principaux changements dans le régime de brassage des eaux ont déjà eu lieu au cours des dernières décennies (1970-2020) et il ne faut pas s'attendre à d'autres changements aussi significatifs à l'avenir.
- La colonne d'eau devrait se brasser complètement chaque année jusqu'en 2100, à de très rares exceptions près.
- Le brassage permettra la réoxygénation annuelle des couches profondes, ce qui permettra de compenser la demande biologique et chimique en oxygène et limitera la solubilité des nutriments.
- Le brassage continuera ainsi de limiter le relargage de nutriments depuis les sédiments et permettra de limiter les pics de fertilisation.
- Le brassage complet devrait se produire de plus en plus tardivement d'ici à 2050, avec un décalage de début janvier à début février, avant d'atteindre un plateau. On note une variabilité interannuelle plus marquée à l'avenir dans la date du brassage complet.

### *Brassage hivernal*



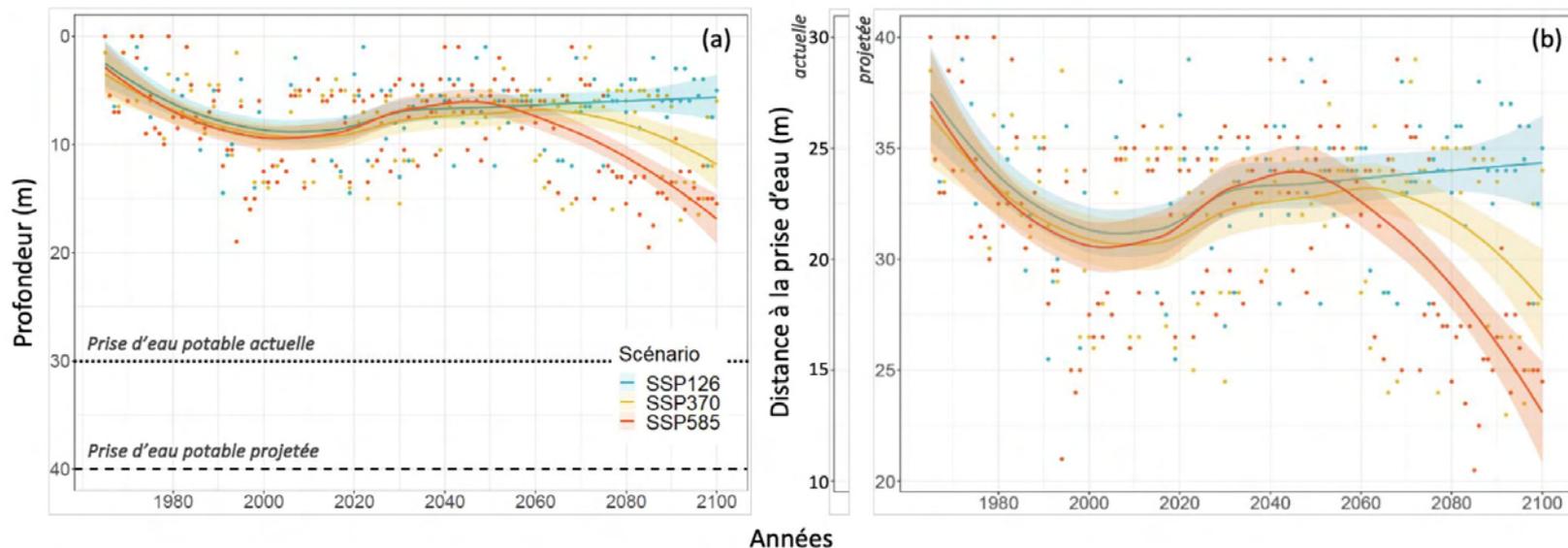


Approvisionnement en eau  
potable

---

3

# ➤ Approvisionnement en eau potable



**Figure 19.** Profondeur maximale annuelle du pic de chlorophylle a (a) et distance à la prise d'eau potable (b) sur la période 1968–2100, en fonction des 3 scénarios (SSSP1-RCP2.6, SSP3-RCP7.0 & SSP5-RCP8.5) dans le lac d'Annecy.

	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
<b>Approvisionnement de l'eau potable <sup>a</sup></b>					
Durée nitrate < 50,0 mg L <sup>-1</sup> (j an <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>	365	292	219	146	73
Oxygène dissous moyen (mg L <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
Durée oxygène > 5,0 mg L <sup>-1</sup> (j an <sup>-1</sup> )	365	292	219	146	73
Distance du pic de chl-a (m) à la prise d'eau actuelle (30 m)	23,0	20,0	16,0	10,0	3,0
Distance du pic de chl-a (m) à la prise d'eau projetée (40 m)	33,0	26,0	20,0	13,0	7,0

a Métriques calculées à la prise d'eau potable actuelle (30 m) et projetée (40 m).

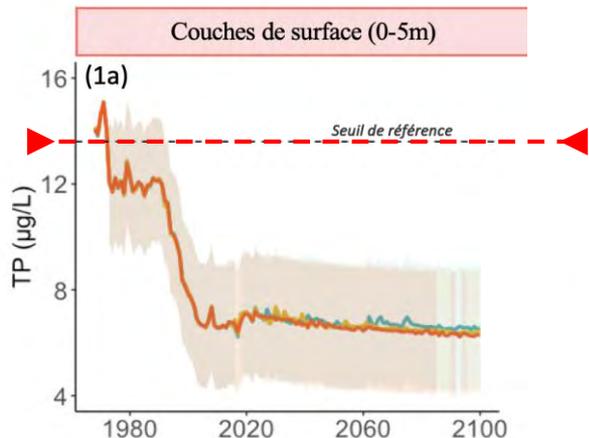
b Directive (UE) n° 2020/2184 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

c Directive (UE) n° 2006/44 concernant la qualité des eaux douces ayant besoin d'être protégées ou améliorées pour être aptes à la vie des poissons.

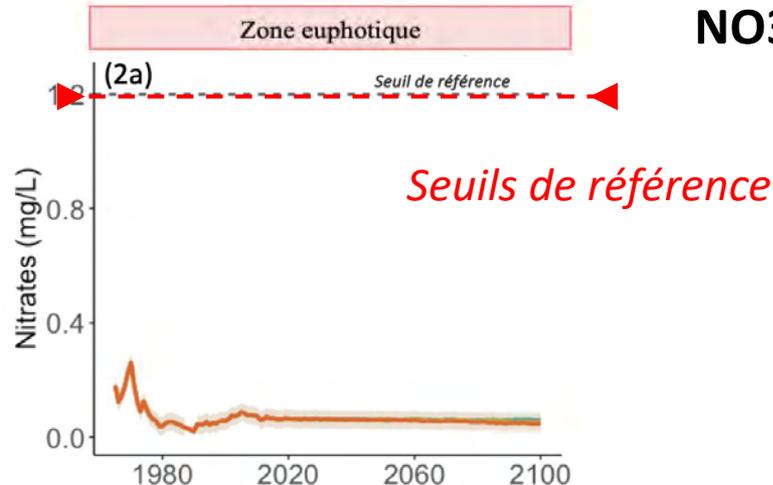
d Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (2016).

# ➤ Approvisionnement en eau potable

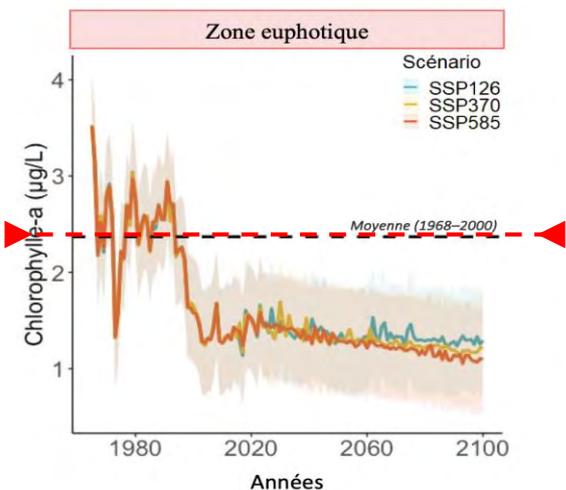
TP



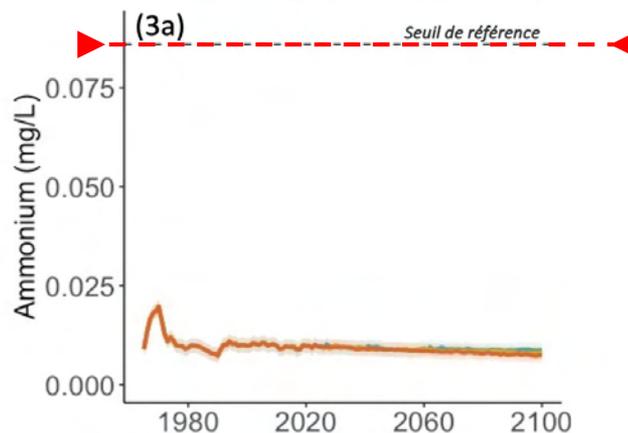
NO<sub>3</sub><sup>-</sup>



Chla



NH<sub>4</sub><sup>+</sup>



Les seuils de référence ne seront pas dépassés

## ➤ Approvisionnement en eau potable

- Le lac devrait se maintenir dans un état oligotrophe dans l'hypothèse où les apports en phosphore par les tributaires resteraient à des niveaux actuels.
- Dans des conditions où les pollutions au lac n'augmenteraient pas par rapport aux niveaux actuels les services d'approvisionnement en eau potable ne devraient pas être impactés négativement par les évolutions du climat.





Préservation du peuplement  
salmonicole

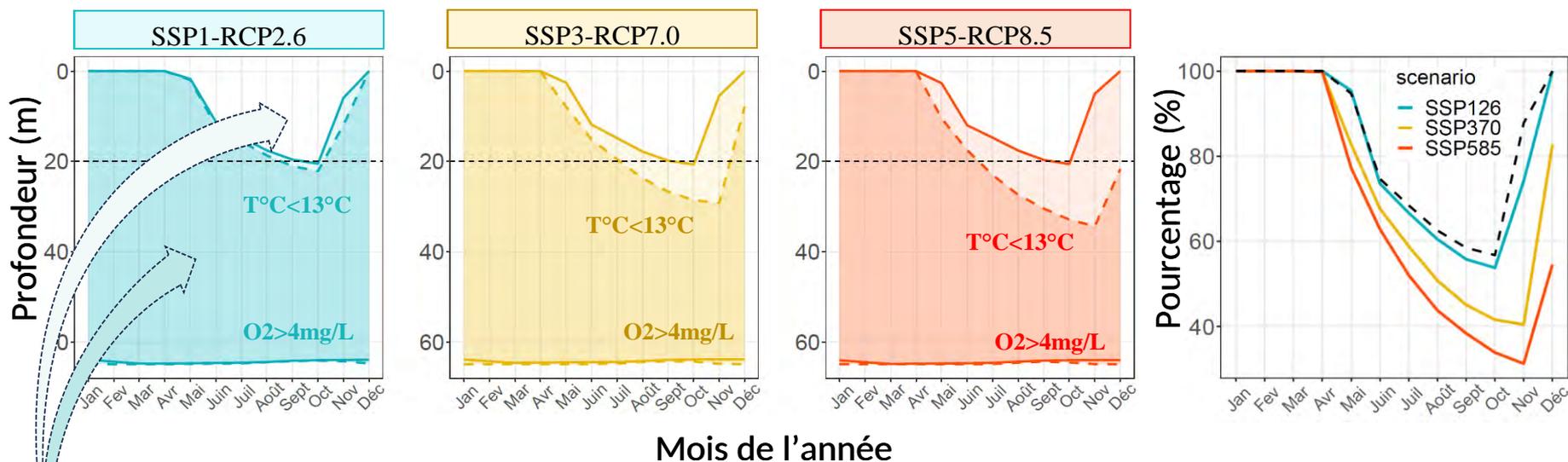
---

4

# ➤ Préservation du peuplement salmonicole

Effets attendus du climat sur les salmonidés

## Habitat thermique



 Bon habitat  
 Mauvais habitat

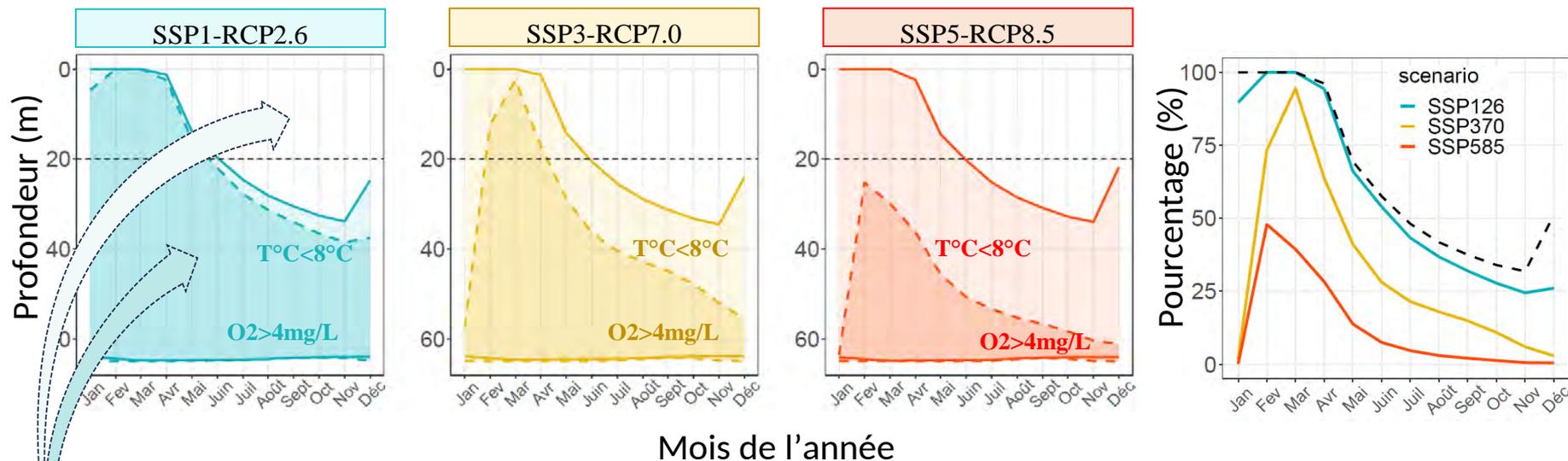
----- 20 m : Référence

Les températures optimales de l'habitat thermique des salmonidés devraient se maintenir sur l'ensemble de la colonne d'eau de janvier à mars,

# ➤ Préservation du peuplement salmonicole

Effets attendus du climat sur les salmonidés

## Conditions de reproduction



 Bon habitat  
 Mauvais habitat

----- 20 m : Référence

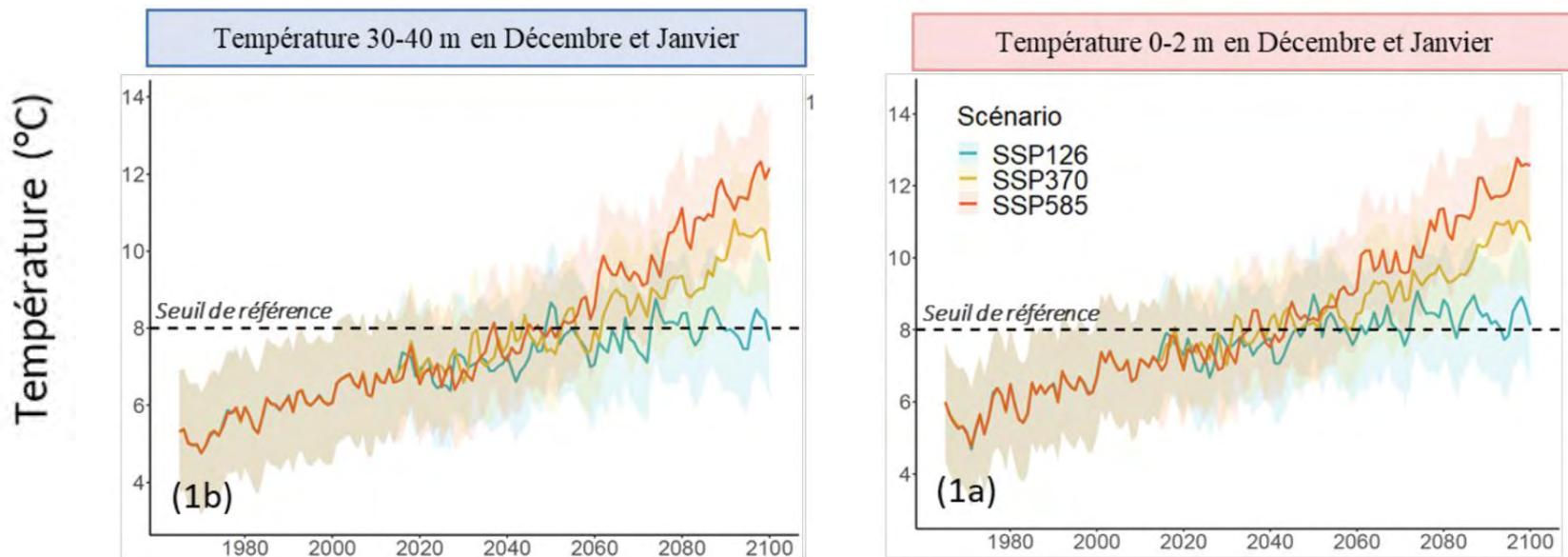
**Le seuil maximal de survie et reproduction de 8,0 °C pourrait ne plus jamais être atteint dans les 30-40 m**

# ➤ Préservation du peuplement salmonicole

Conditions de reproduction hivernales

Ombre Chevalier (30-40 m)

Corégone (0-2 m)



**L'élévation de la température dans les couches d'eau favorables à la reproduction des salmonidés en hiver pourrait impacter le taux de survie des œufs et le succès de la reproduction**

## ➤ Conclusions sur le peuplement salmonicole

- Les évolutions des températures vont impacter les habitats et la biocénose, en particulier les salmonidés, poissons sténothermes
- L'élévation de la température en hiver pourrait impacter le taux de survie des œufs et le succès de la reproduction : le seuil maximal de survie et reproduction de 8,0 °C pourrait ne plus jamais être atteint
- Les températures optimales de l'habitat thermique des salmonidés devraient se maintenir sur l'ensemble de la colonne d'eau de janvier à mars, mais un approfondissement progressif de la profondeur à laquelle la température de l'eau est inférieure à 13 °C (seuil optimal) est attendu en été et automne. L'optimum des conditions d'habitat des salmonidés se restreindrait à 30%-54% du volume total du lac en fin d'été et automne à l'horizon 2100.
- Les salmonidés pourraient néanmoins s'adapter en occupant des strates situées plus en profondeur et retrouver ainsi des conditions favorables à leur croissance et à leur reproduction.



Esthétique paysagère et  
identité

---

5

## ➤ Esthétique paysagère et identité

- Le lac devrait se maintenir à un état oligotrophe dans l'hypothèse où les apports en phosphore par les tributaires resteraient à des niveaux actuels.
- Dans des conditions où les pollutions au lac n'augmenteraient pas par rapport aux niveaux actuels, l'attractivité générale du lac ne devrait pas être impactée négativement par les évolutions du climat, tout comme les services d'approvisionnement en eau potable.



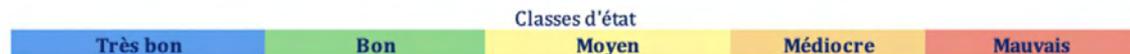
An aerial photograph of a large, deep blue lake, likely a fjord, surrounded by lush green mountains and a town. The lake is the central focus, with a small peninsula in the foreground. The background shows rolling hills and distant mountains under a clear sky. The text 'Synthèse des indicateurs' is overlaid in white, serif font, with a large white number '6' to its right.

# Synthèse des indicateurs

6

A explorer en détail dans le rapport...

# ➤ Synthèse des indicateurs





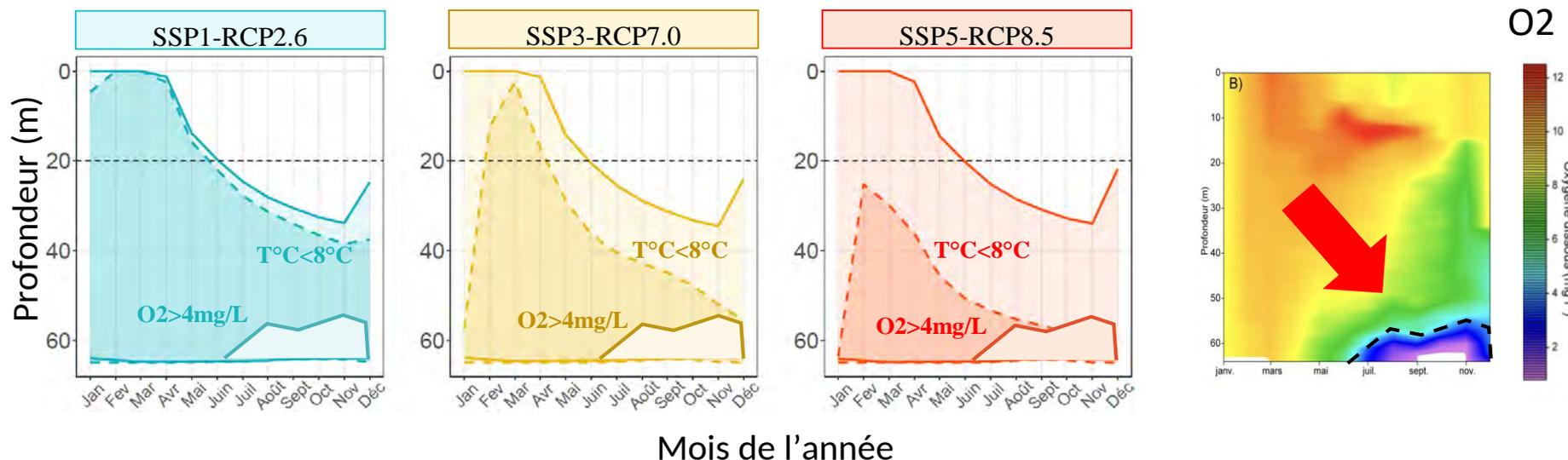
# Limitations et Perspectives

# 7

Précautions à prendre lors de la lecture et  
interprétation des indicateurs...

# ➤ Améliorer les indicateurs et les modèles

## Conditions d'oxygène et habitat des salmonidés



*Compensation en tenant compte des données limnologiques*

**Mauvaise simulation de la profondeur des conditions hypoxiques (très faibles en oxygène) !**

# Merci pour votre attention

Rédigé par :

**Laura MELO VIEIRA SOARES**  
**Olivia DESGUÉ-ITIER**  
**Victor FROSSARD**  
**Cécilia BAROUILLET**  
**Yoann BAULAZ**  
**Isabelle DOMAIZON**  
**Jean-Marcel DORIOZ**  
**Chloé GOULON**  
**Jean GUILLARD**  
**Stéphane JACQUET**  
**Emilie RÉALIS**  
**Viet TRAN KHAC**  
**Jean-Philippe JENNY**

Pilotage SILA et coordination :

**Damièn ZANELLA - SILA**

©LacSavoieMontBlanc-Monica Dalmasso



# ➤ Site d'étude et variables d'entrées

## Effets du changement climatique

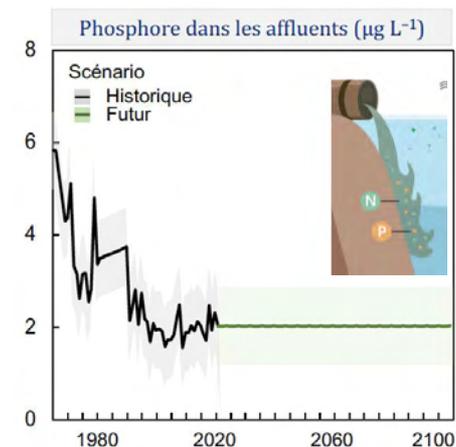
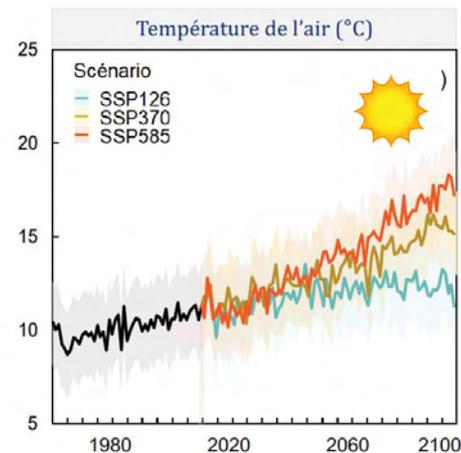
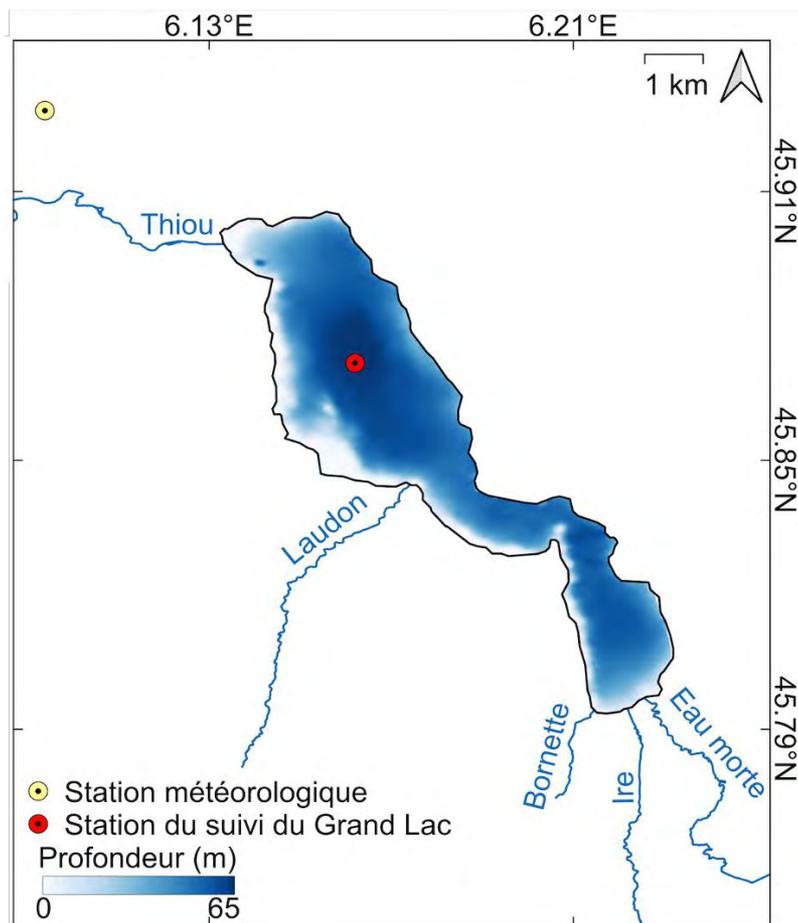


Tableau 1. Sources de données d'entrées du modèle GLM-AED.

Données d'entrées	Résolution	Période	Source
Bathymétrie	10 m	-	SILA
Variables climatiques <ul style="list-style-type: none"> <li>• Température de l'air</li> <li>• Radiations solaires</li> <li>• Vitesse du vent</li> </ul>	Journalier	1965 – 2100	Modèles des projections climatiques (Cucchi et al., 2020; Lange, 2019) <a href="https://www.isimip.org">https://www.isimip.org</a>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humidité relative</li> <li>• Précipitations</li> </ul>	Journalier	1959 – 2020	SAFRAN (station Meythet) <a href="https://www.umr-cnrm.fr">https://www.umr-cnrm.fr</a>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Couverture nuageuse</li> </ul>	Journalier	2000 – 2011	MétéoSuisse (station Nyon/Changins) <a href="https://www.meteosuisse.admin.ch">https://www.meteosuisse.admin.ch</a>
Débits des rivières	Journalier	1972 – 2020	HydroPortail <a href="https://hydro.eaufrance.fr">https://hydro.eaufrance.fr</a>
Température de l'eau des rivières	Journalier	1965 – 2100	(Toffolon et Piccolroaz, 2015)
Qualité de l'eau des rivières (température de l'eau, oxygène dissous, nitrates, ammonium, phosphates, silices réactives et carbone organique dissous)	Mensuel	2002 – 2020	Naiades <a href="https://naiades.eaufrance.fr">https://naiades.eaufrance.fr</a>
Données issues du suivi annuel du lac SILA-INRAe (température de l'eau, oxygène dissous, nitrates, ammonium, phosphore total, carbone organique total, chlorophylle-a)	Mensuel - Bimensuel	1966 – 2020	OLA database <a href="https://si-ola.inrae.fr">https://si-ola.inrae.fr</a>



*Synthèse des principales questions posées sur le devenir du Lac d'Annecy*

<i>Fonctionnement général du lac</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quelles évolutions attendues en matière de thermie du lac ?</li> <li>• En surface, sur la colonne d'eau, au fond du lac ?</li> <li>• À partir des trajectoires qui seront obtenues en matière de température d'eau, il s'agira de préciser les conséquences sur le brassage annuel du lac : efficacité, fréquence, conséquence sur le fonctionnement du lac (cf. oxygénation du fond, remise en circulation des nutriments, etc).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3.1.1</li> <li>• 3.1.1.1, 3.1.1.2</li> <li>• 3.1.1.3, 3.1.1.4, 3.1.1.5</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Au-delà des aspects quantitatifs, les modifications attendues du régime pluviométrique peuvent-elles être intégrées à l'analyse, afin de savoir si elles impactent également le fonctionnement qualitatif de l'écosystème, avec par exemple une évolution des apports en nutriments et des conséquences sur le phytoplancton ? (Exemple : forte pluviométrie en juillet 2021, et développement semble-t-il accru du phytoplancton, avec une période d'eau turbide et laiteuse [précipitation de calcite] qui s'est prolongé plus longtemps qu'habituellement).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le lien entre pluies et émissions de nutriments ne sont pas abordé. En revanche, les effets des modifications des apports en nutriments seront abordés indirectement en conduisant des simulations de l'écologie du lac à partir de scénarios réalistes d'apports en nutriments.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Par rapport à l'état actuel et au fonctionnement observé, la production globale du lac va-t-elle évoluer ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3.1.4</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les scénarios possibles d'évolution du lac verraient-ils des conditions propices au développement de certaines cyanobactéries, qui pourraient impacter les usages précités et/ou le fonctionnement trophique du lac ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3.1.4.1</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Par rapport au développement phytoplanctonique attendu, quelles conséquences possibles sur : 1) La qualité de l'eau utilisée pour l'alimentation en eau potable, 2) La baignade, 3) L'attractivité générale du lac (transparence) ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'évolution des conditions écotoxicologiques ne pourra pas faire l'objet des exercices de modélisation prévues dans le cadre de cette étude.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Des scénarios sont-ils envisageables concernant les végétaux supérieurs (hydrophytes et héliophytes) ? Le cas échéant, quelles conséquences possibles pour la gestion des zones naturelles (roselières notamment, secteurs d'herbiers, etc.), pour la gestion des infrastructures nautiques (ports, zones de mouillages) ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ces scénarios ne seront pas étudiés dans le cadre de ce travail de modélisation. Des hypothèses sont émises en se basant notamment sur la littérature.</li> </ul>



<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espèces exotiques envahissantes : des projections sont-elles possibles ? Dans les conditions futures attendues pour le lac d'Annecy, des espèces qui présentent aujourd'hui une possible menace trouveraient-elle des conditions plus ou moins favorables ? (Exemple de la moule quagga, aujourd'hui non signalée au lac d'Annecy mais présente au Bourget et au Léman)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ces scénarios ne seront pas étudiés dans le cadre de ce travail de modélisation.</li> </ul>
---	--

<i>Qualité de l'eau du lac et services écosystémiques rendus</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Paramètres physico-chimiques et biologiques susceptibles de porter atteinte aux limites et références de qualité définies pour les eaux brutes destinées à l'alimentation en eau potable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3.2.1</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• En lien avec l'évolution de la thermie et le fonctionnement général du lac, quelles conséquences pour les espèces piscicoles du lac ? Capacités de reproduction (notamment salmonidés), Productivité globale, Développement de maladies bactériennes ou parasitaires ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3.2.2</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• En fonction des trajectoires envisagées, quels scénarios possibles pour les activités halieutiques, de loisir comme professionnelles ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3.2.2.2</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si des changements majeurs ressortent de l'analyse, tant pour l'état écologique du lac que pour le maintien d'usages majeurs, existe-t-il aujourd'hui des moyens d'agir pour freiner les impacts attendus, sinon pour anticiper et adapter les activités en conséquence ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3.2.4</li> </ul>

