

# Étude de la stratification et de la propagation d'ondes internes

Lac de Guerlédan

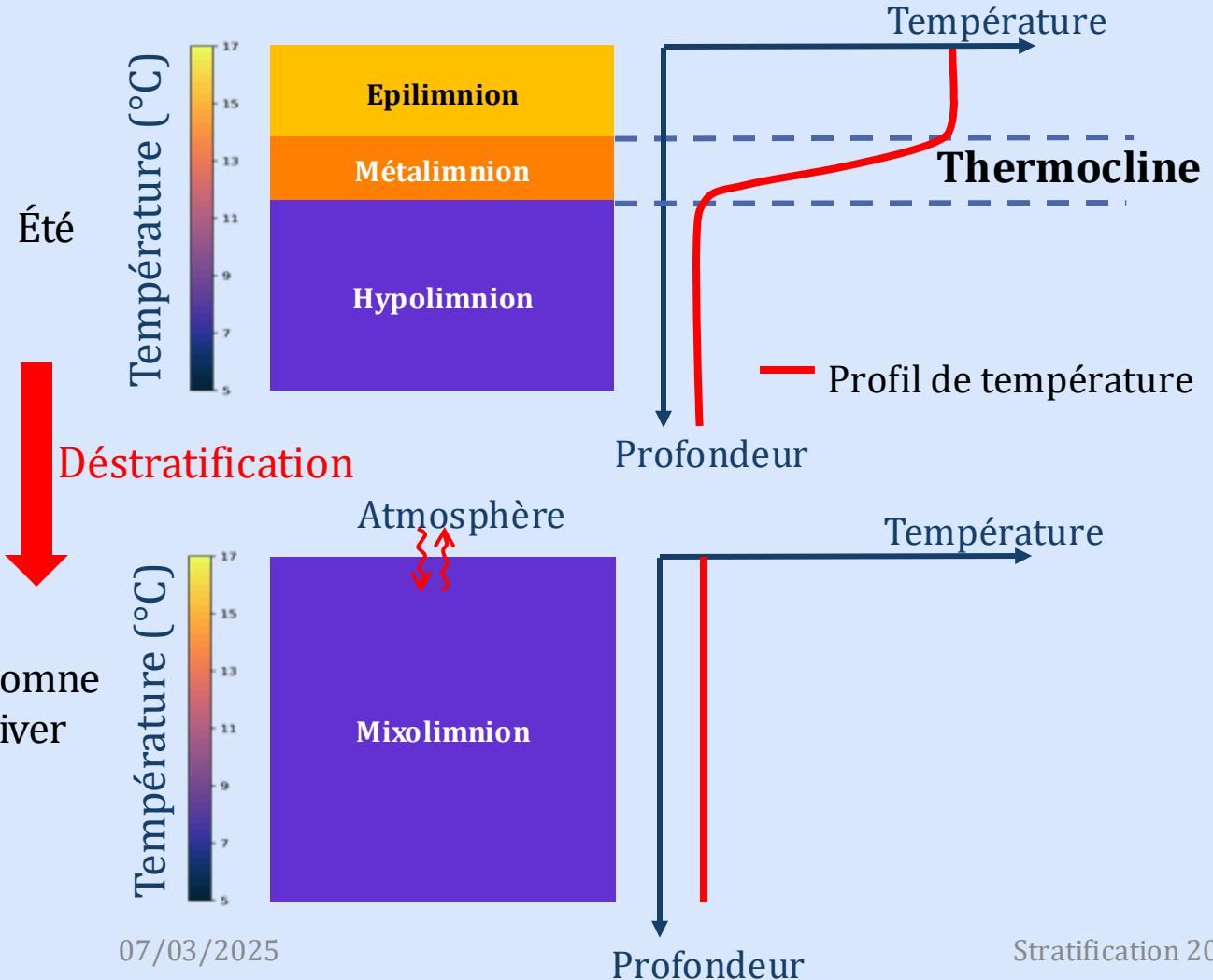
2024-2025

**Étudiants :** Martin Cornille - Martin Coubard - Yuna Le Perron - Aurore Pillain - Zoé Remita

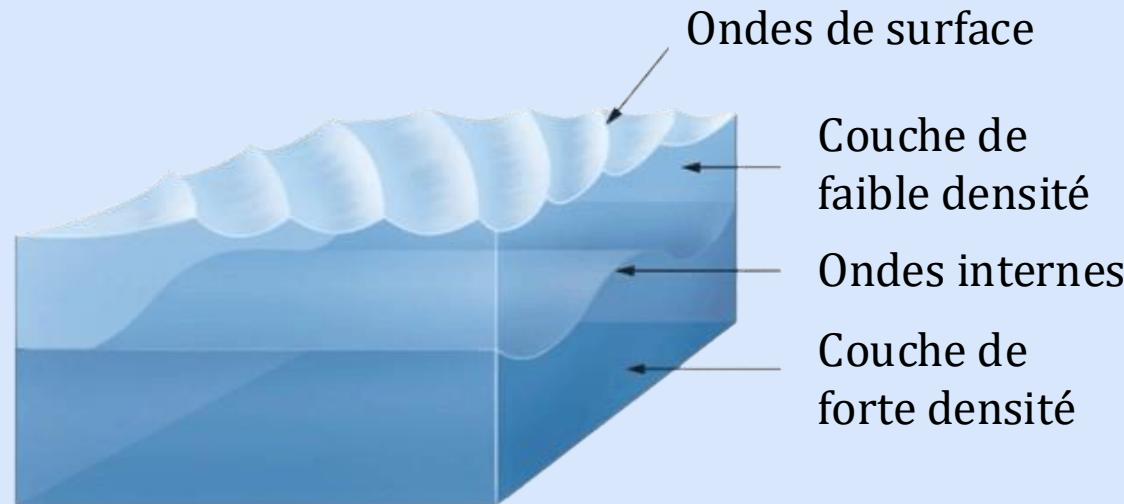
**Encadrants :** Jean-Baptiste Roustan, Amandine Nicolle

# Introduction - Phénomènes physiques

## Stratification

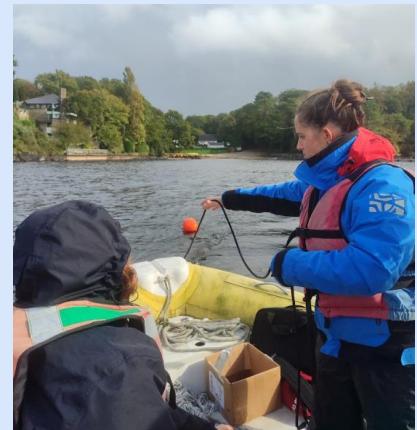


## Ondes internes

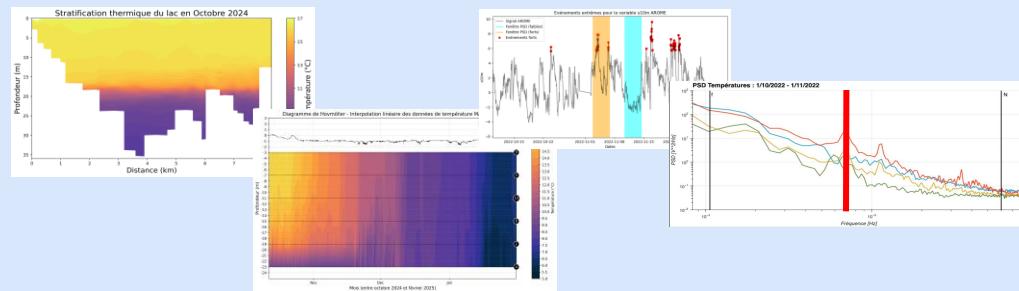


# Introduction – Méthodes

## Mesures in situ

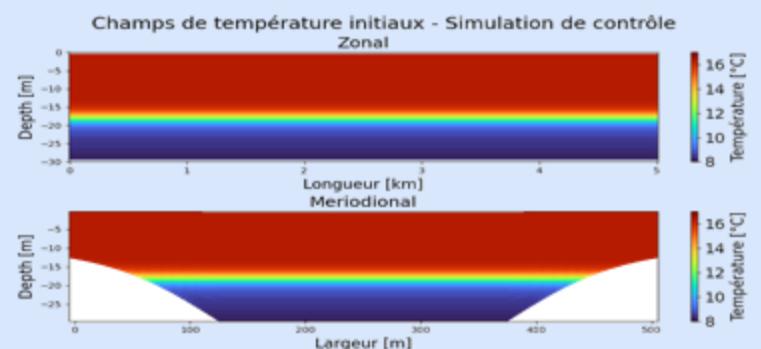
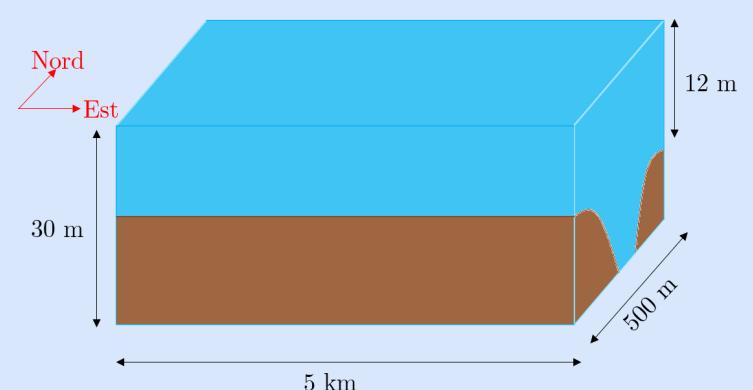


## Traitement des données



Stratification 2024

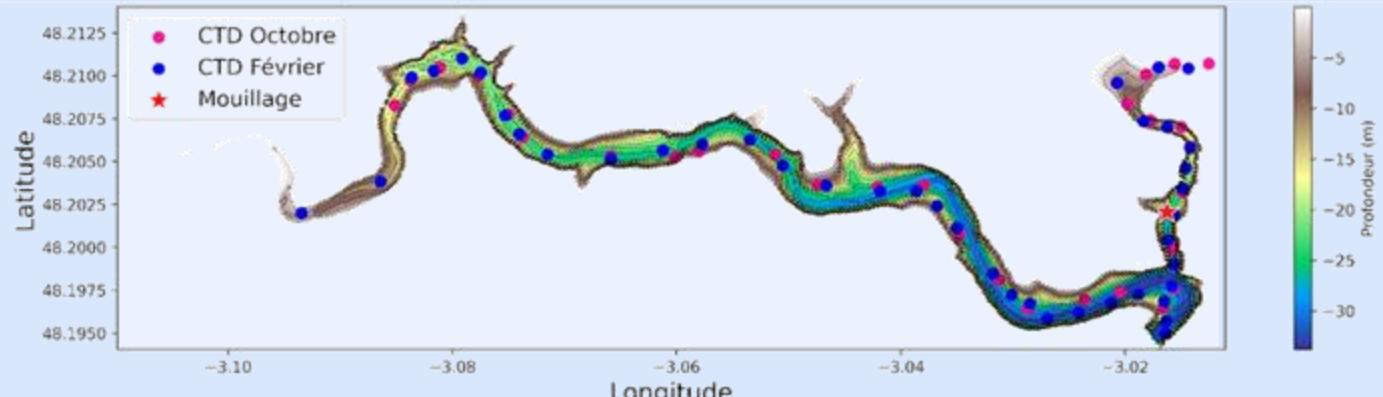
## Modélisation numérique



Comparisons

# Introduction – Matériel

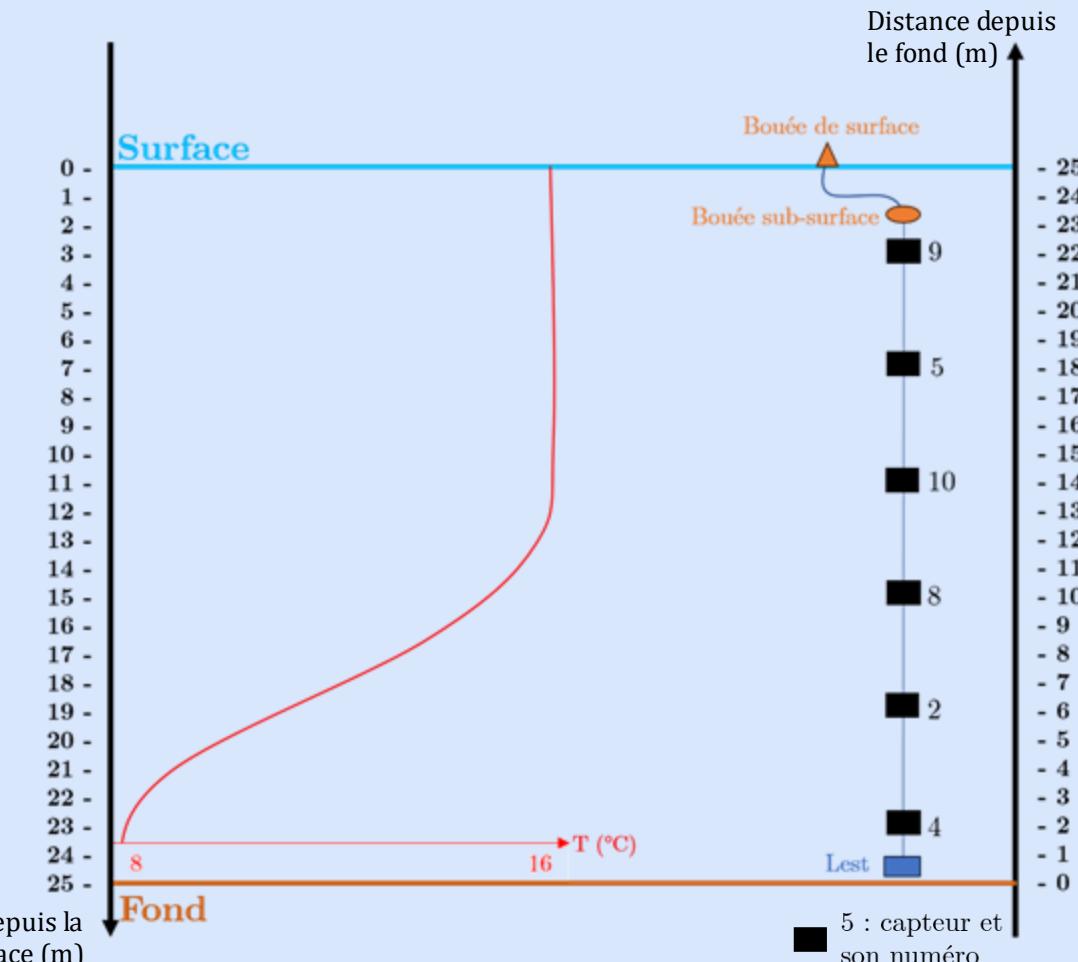
## *Emplacements du mouillage et des mesures CTD*



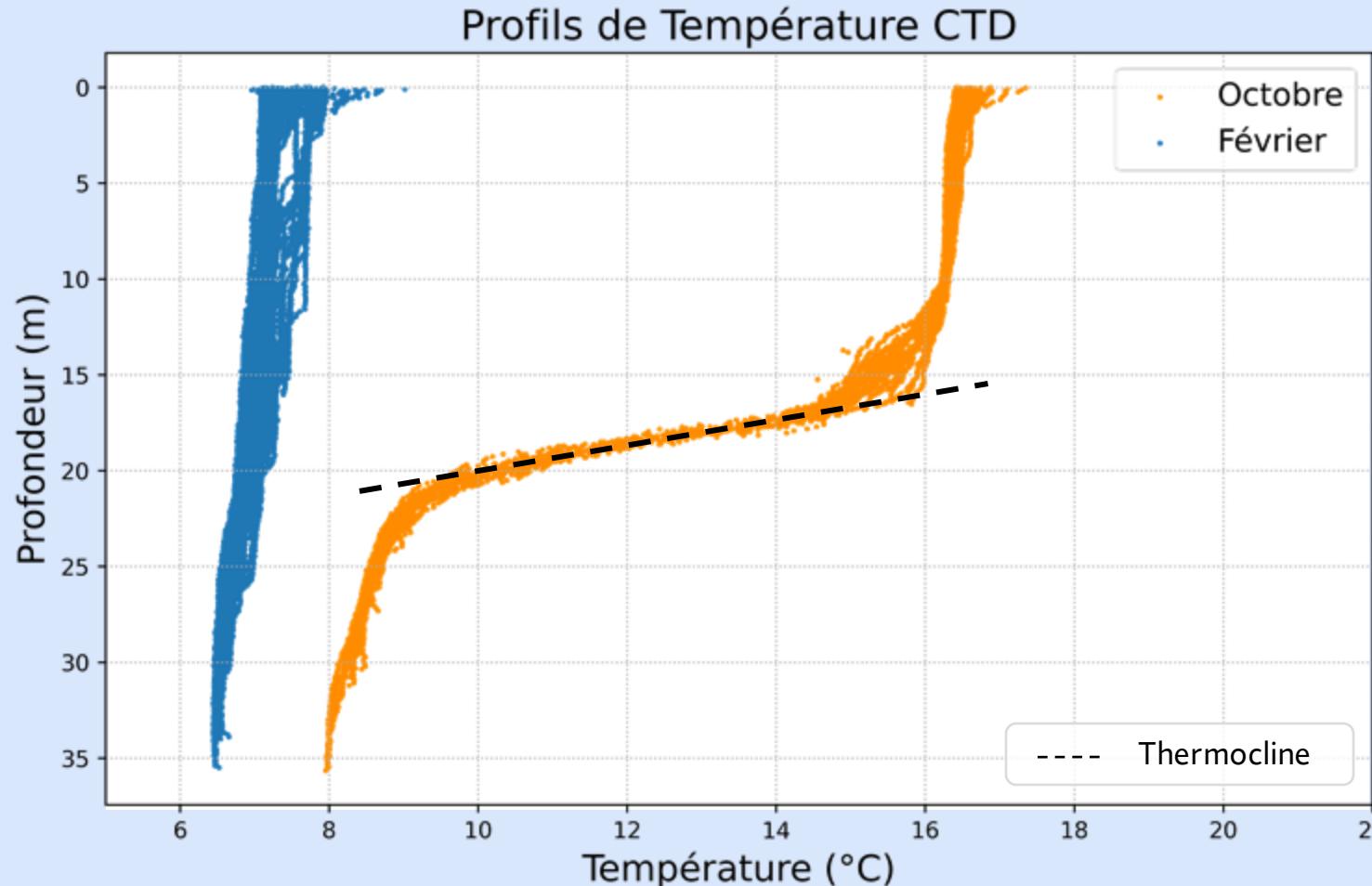
## *Sonde CTD (Conductivity, Temperature, Depth)*

## *Ligne de mouillage*

*Schéma du mouillage Octobre 2024 → Février 2025*



# Stratification – Octobre 2024 et Février 2025

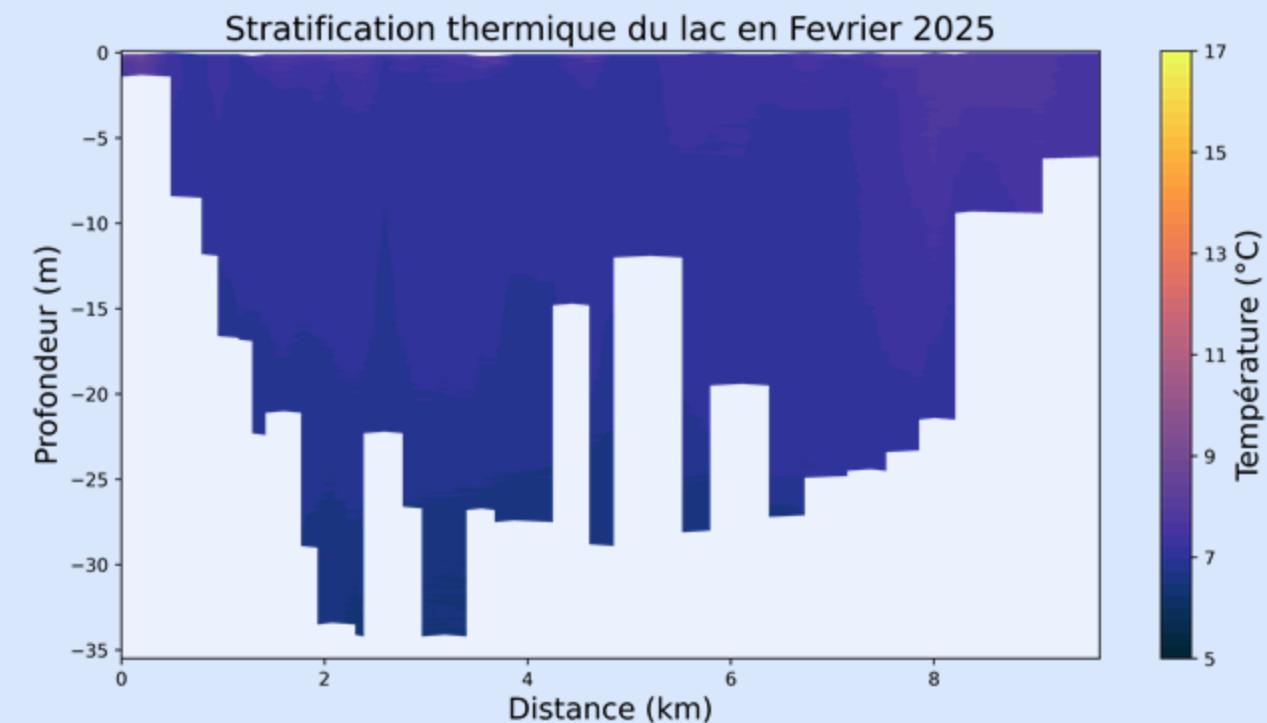
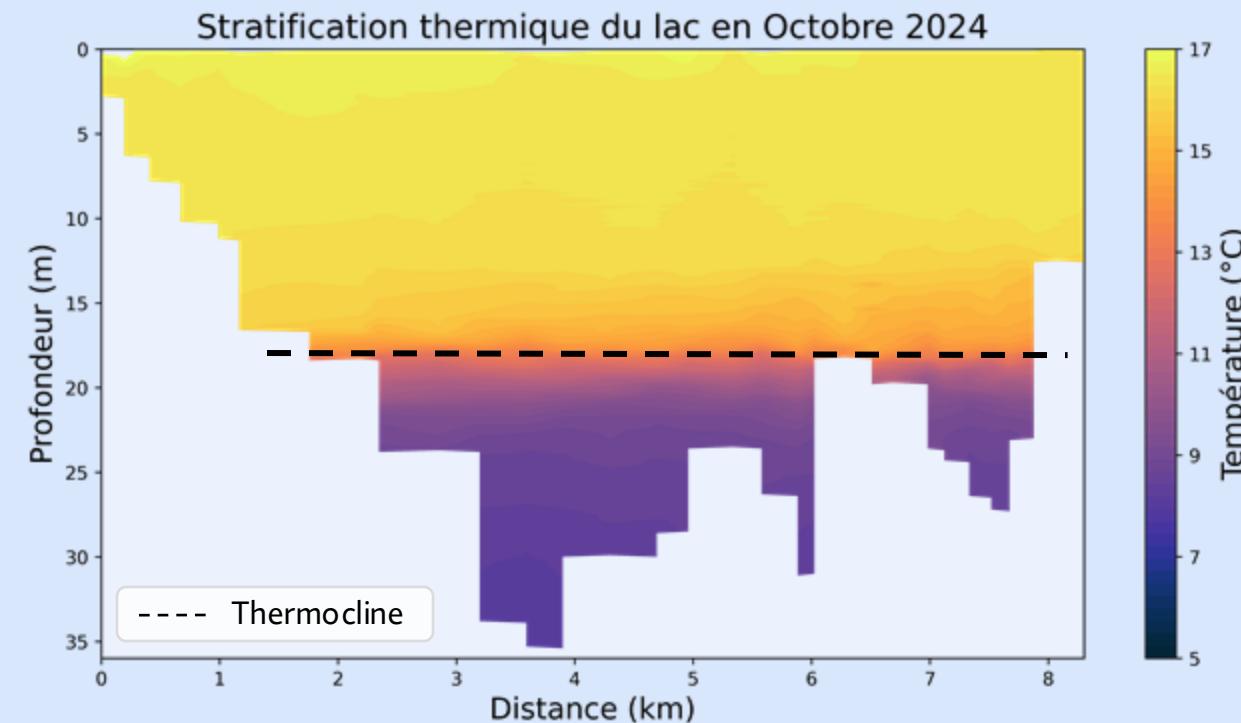


## Thermocline :

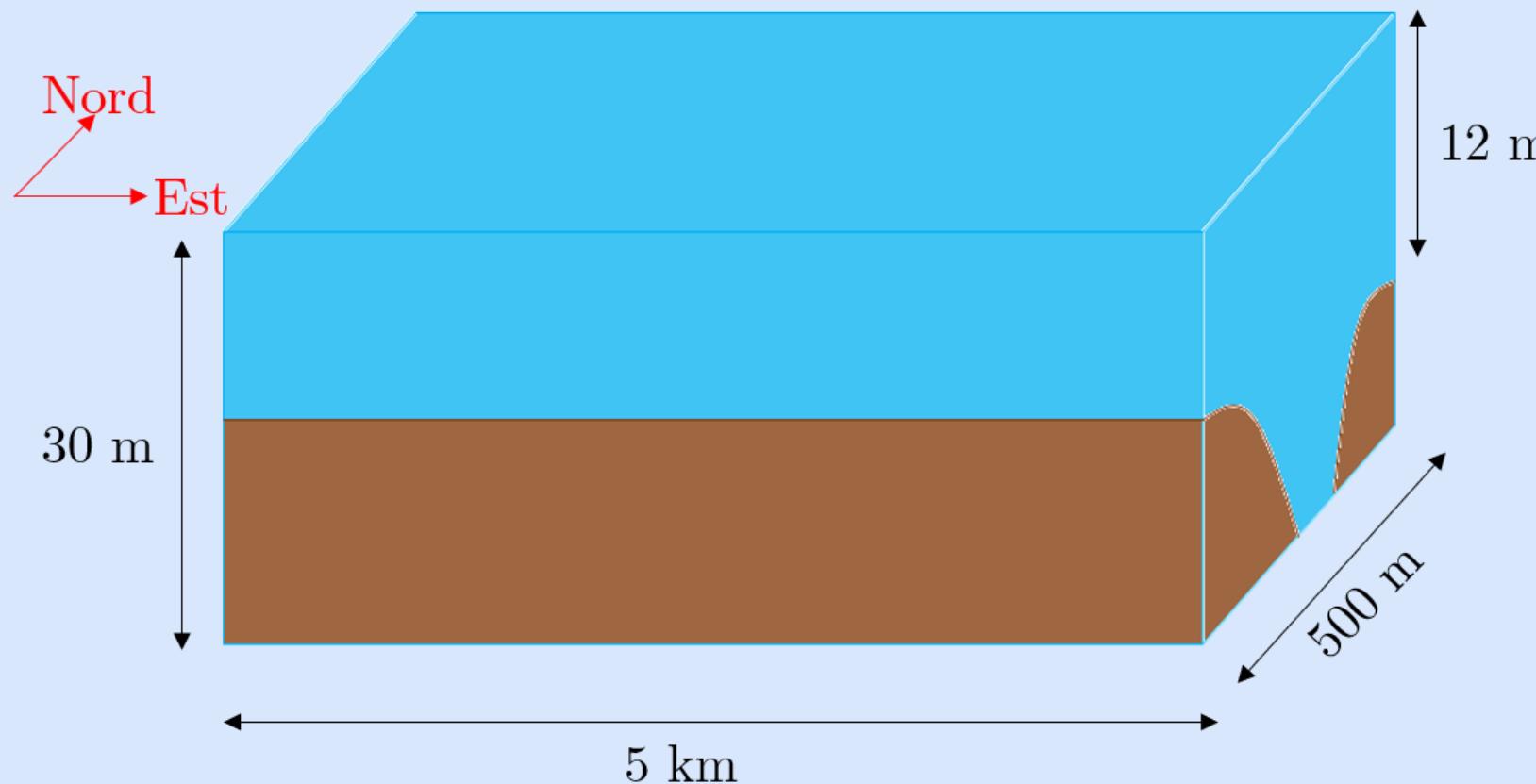
**Profondeur** où l'on trouve le plus fort gradient de **température**.

Cette zone **sépare** les **eaux plus chaudes** situées **en haut** et les **eaux plus froides** situées **en bas** du lac.

# Stratification – Octobre 2024 et Février 2025

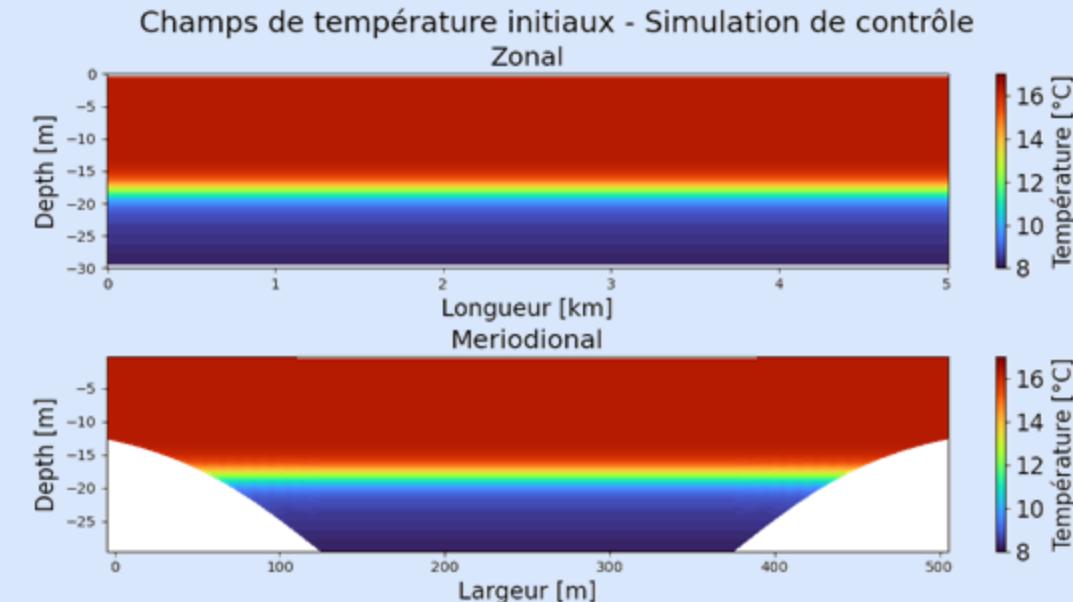
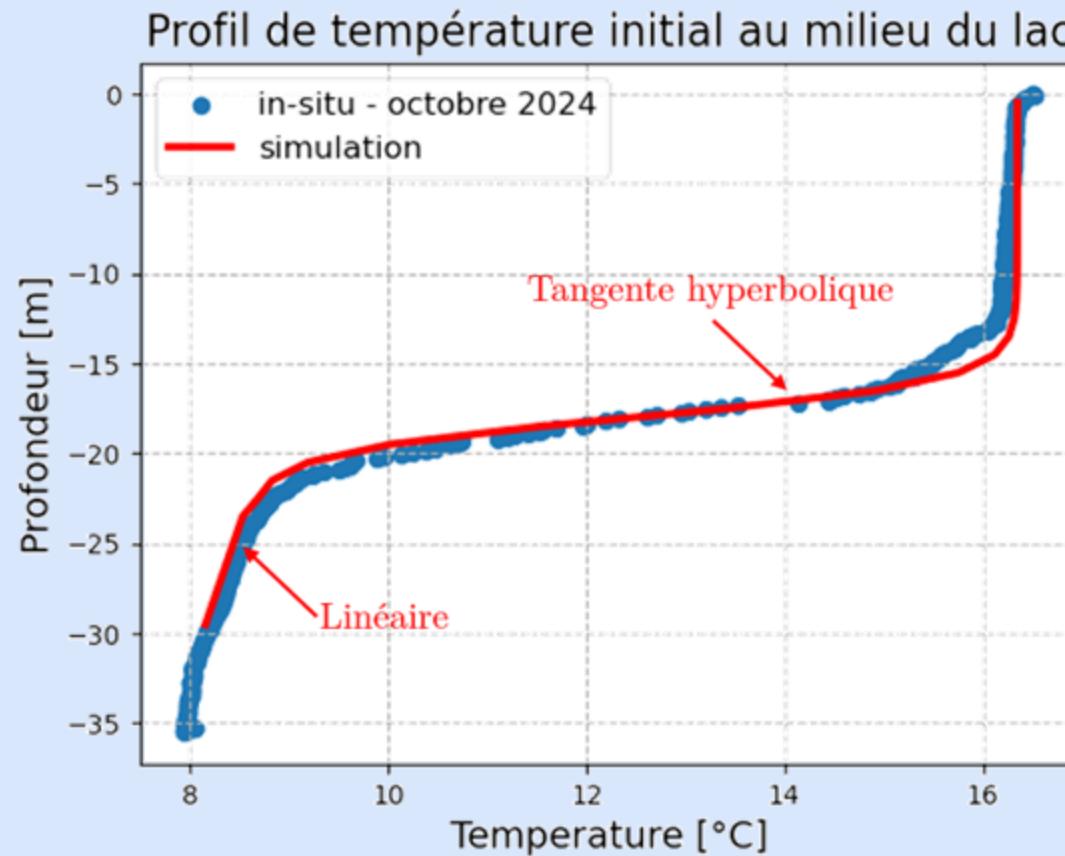


# Modèle CROCO – Notre Configuration



- Boîte fermée, pas de source
- Résolution de 10m × 10m
- 30 niveaux sigma verticaux
- Pentes hyperboliques sur la largeur

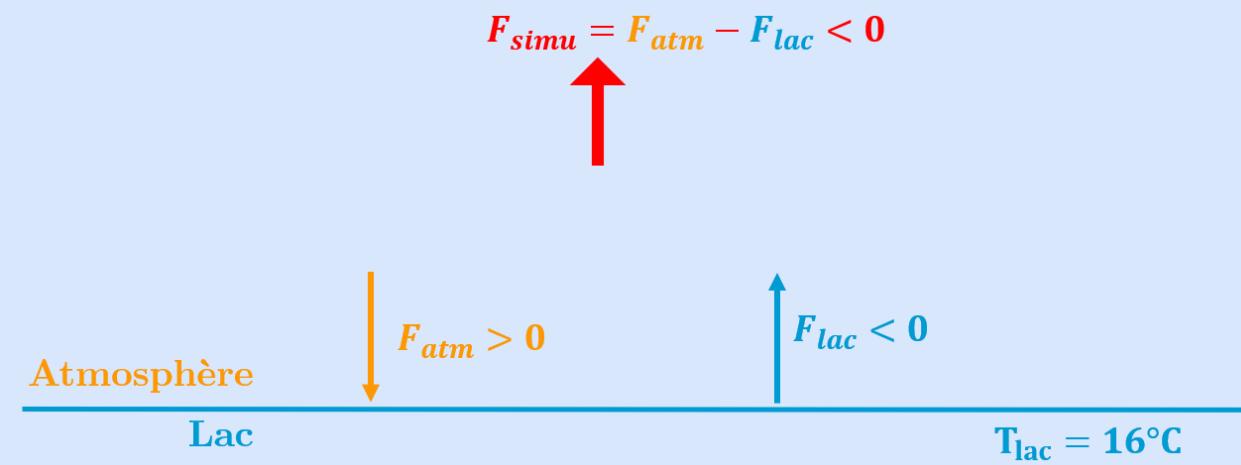
# Modèle CROCO – Notre Configuration



- Situation initiale → stratification du lac de Guerlédan en octobre à l'aide des données CTD

# Modèle CROCO – Forçages analytiques

## Flux de chaleur ( $W \cdot m^{-2}$ )



## Tension du vent ( $N \cdot m^{-2}$ )

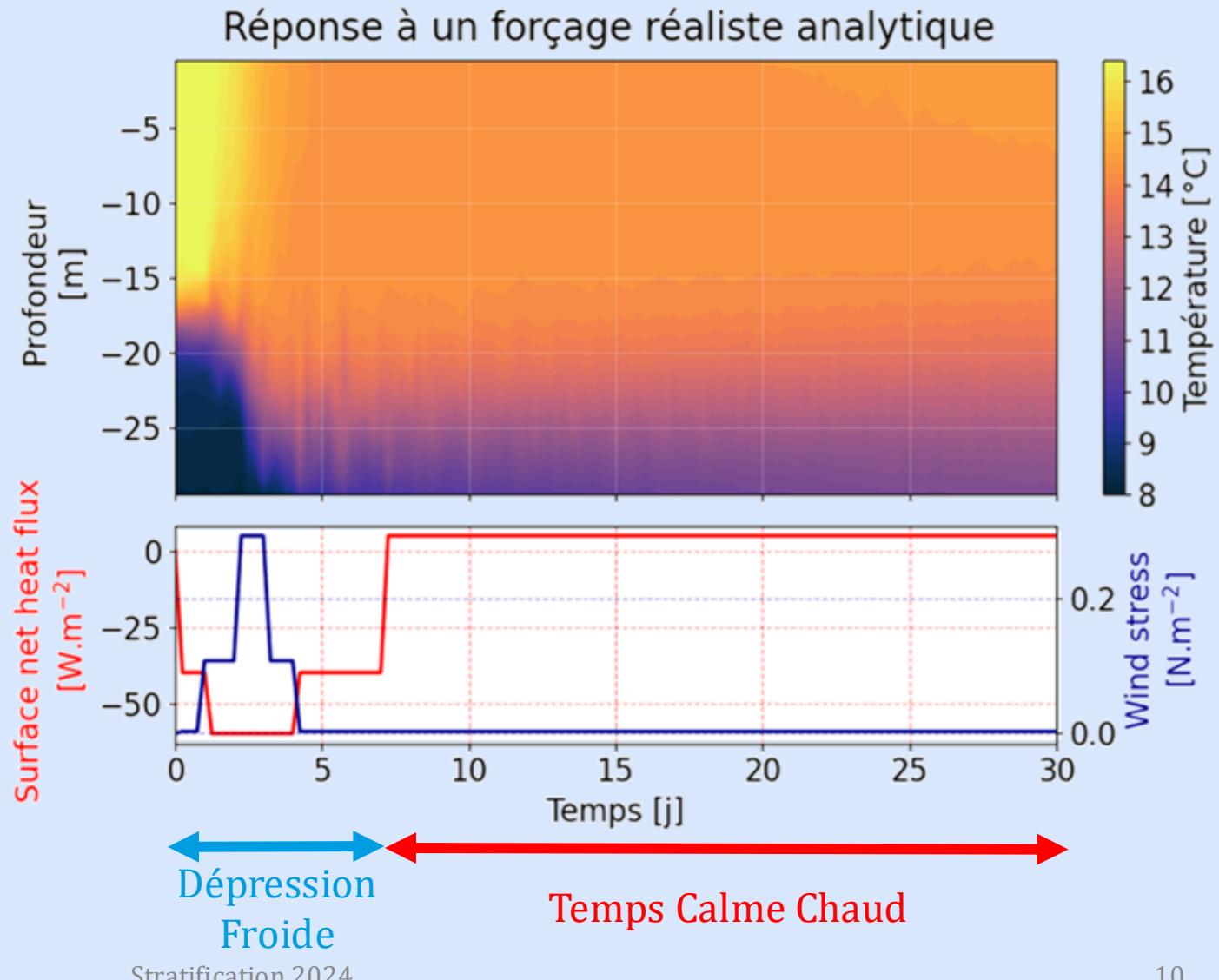


- $T_{lac} = 16^\circ\text{C}$  fixée
- $T_{atm}$  à choisir en fonction de la climatologie à Guerlédan

- Vitesse zonale  $U$  à choisir en fonction de la climatologie à Guerlédan

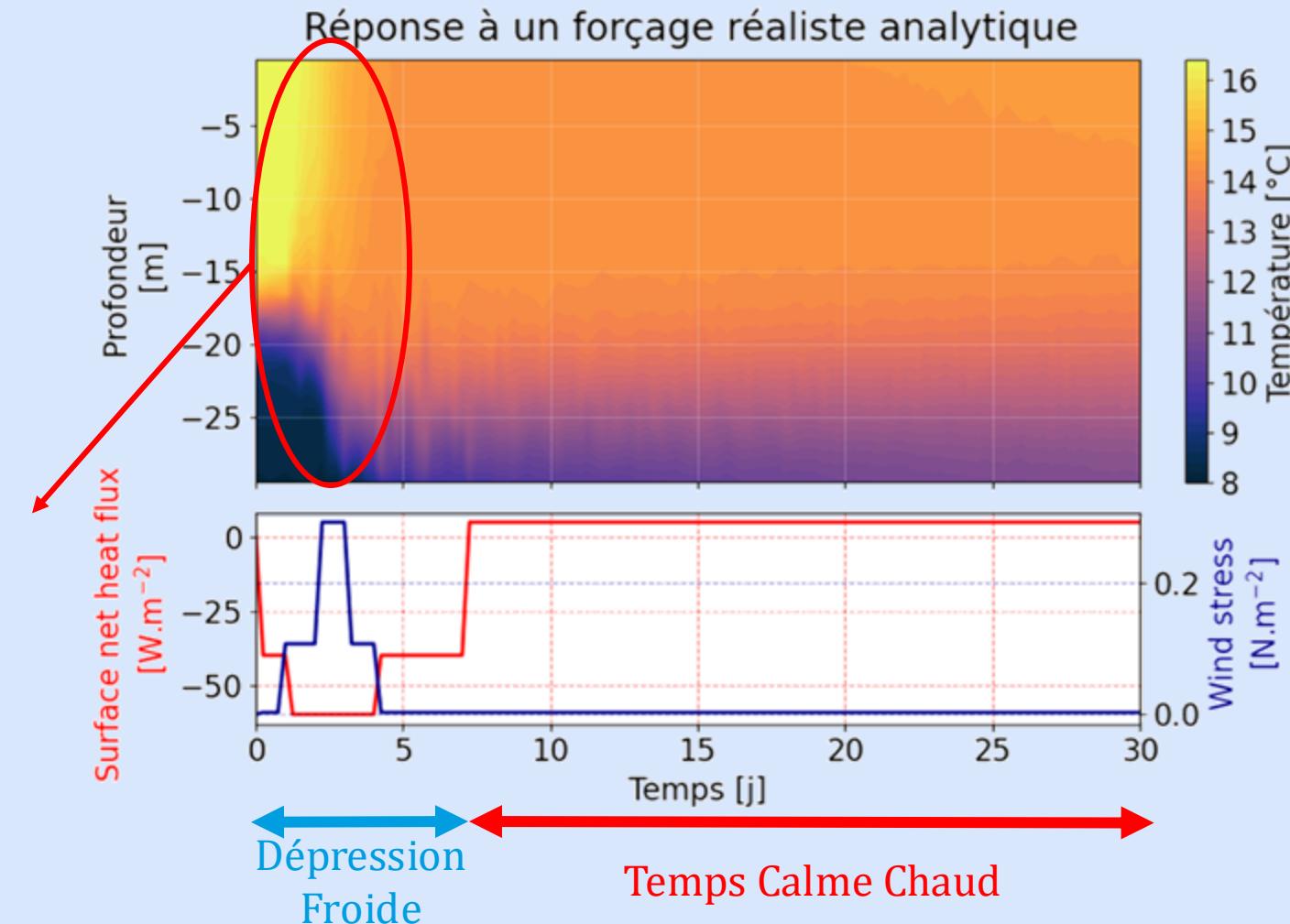
# Modèle CROCO - Simulation Réaliste Analytique

Forçage	CROCO
10 °C	-30 W
5 °C	-50 W
15 °C	+5 W
30 km/h	0,108 N/m <sup>2</sup>
50 km/h	2,94 N/m <sup>2</sup>
5 km/h	2,94.10 <sup>3</sup> N/m <sup>2</sup>



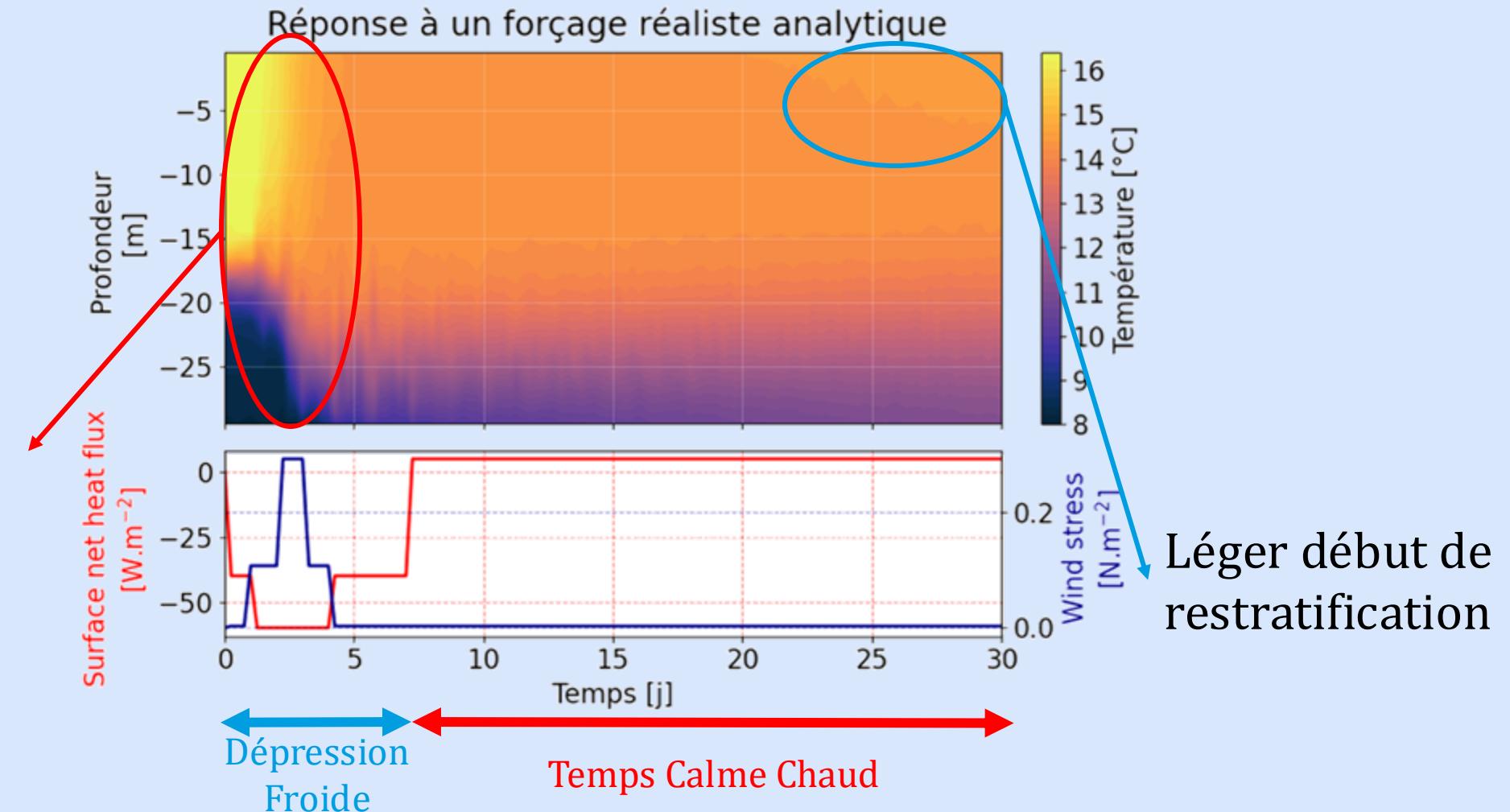
# Modèle CROCO - Simulation Réaliste Analytique

Mélange  
rapide de la  
colonne d'eau

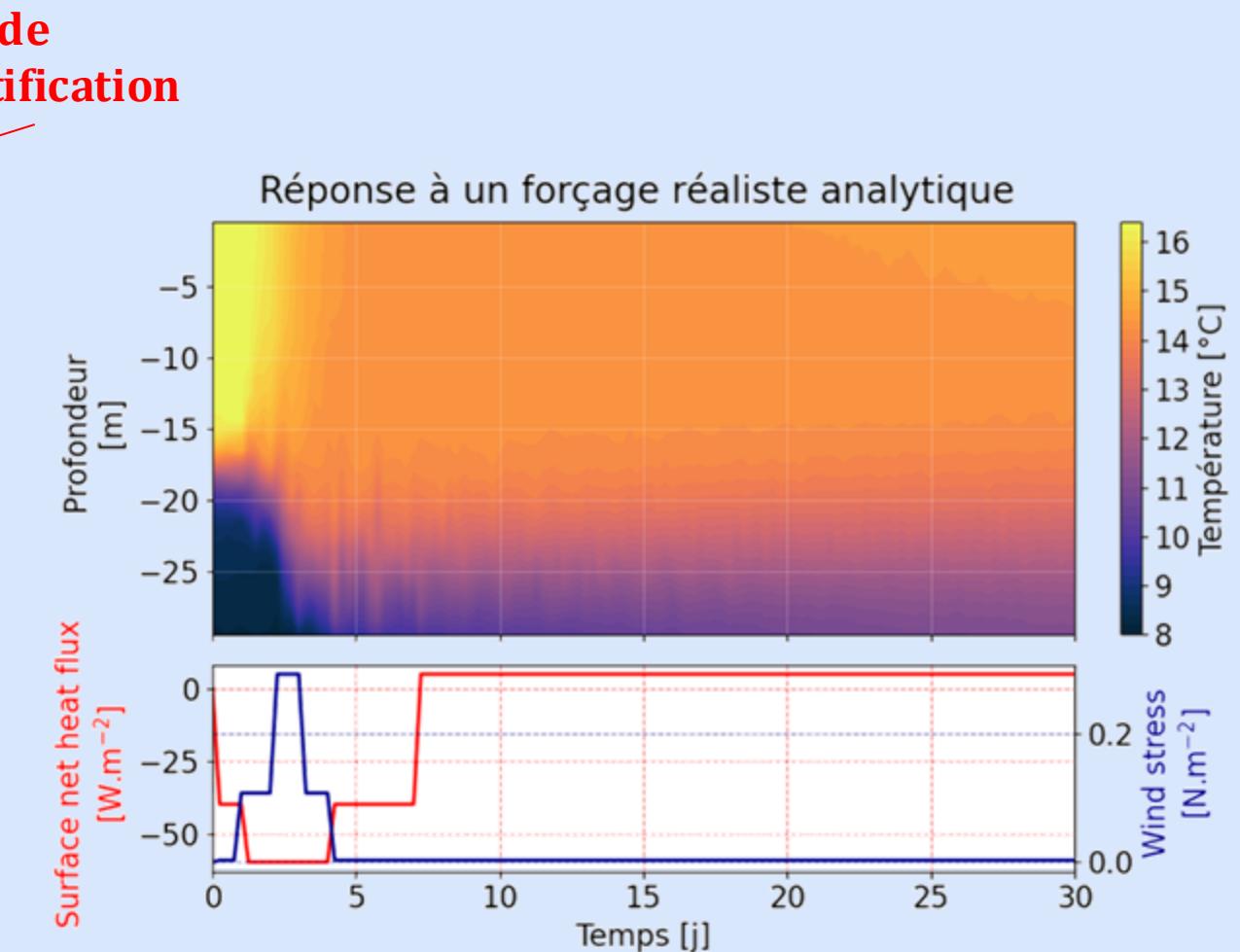
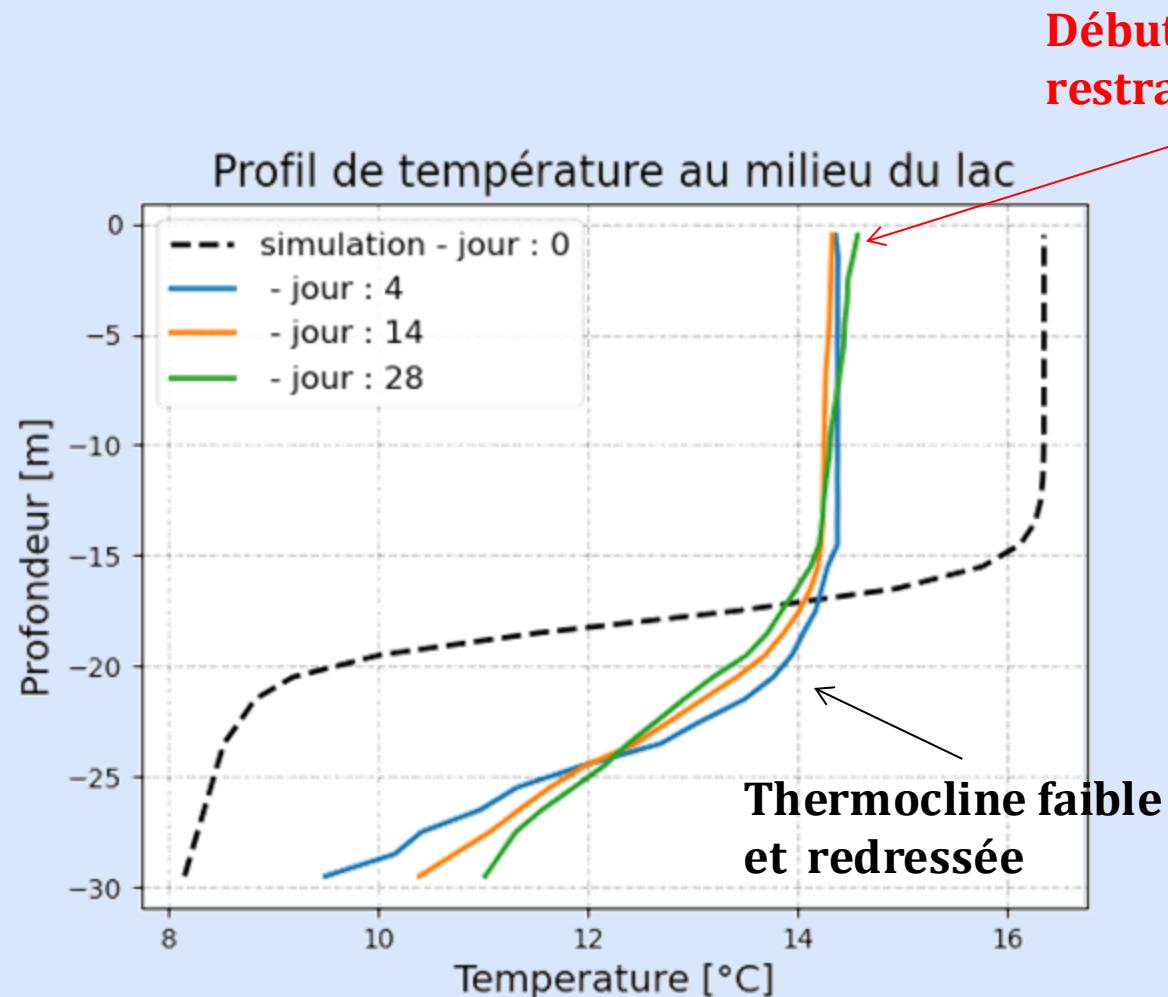


# Modèle CROCO - Simulation Réaliste Analytique

Mélange  
rapide de la  
colonne d'eau

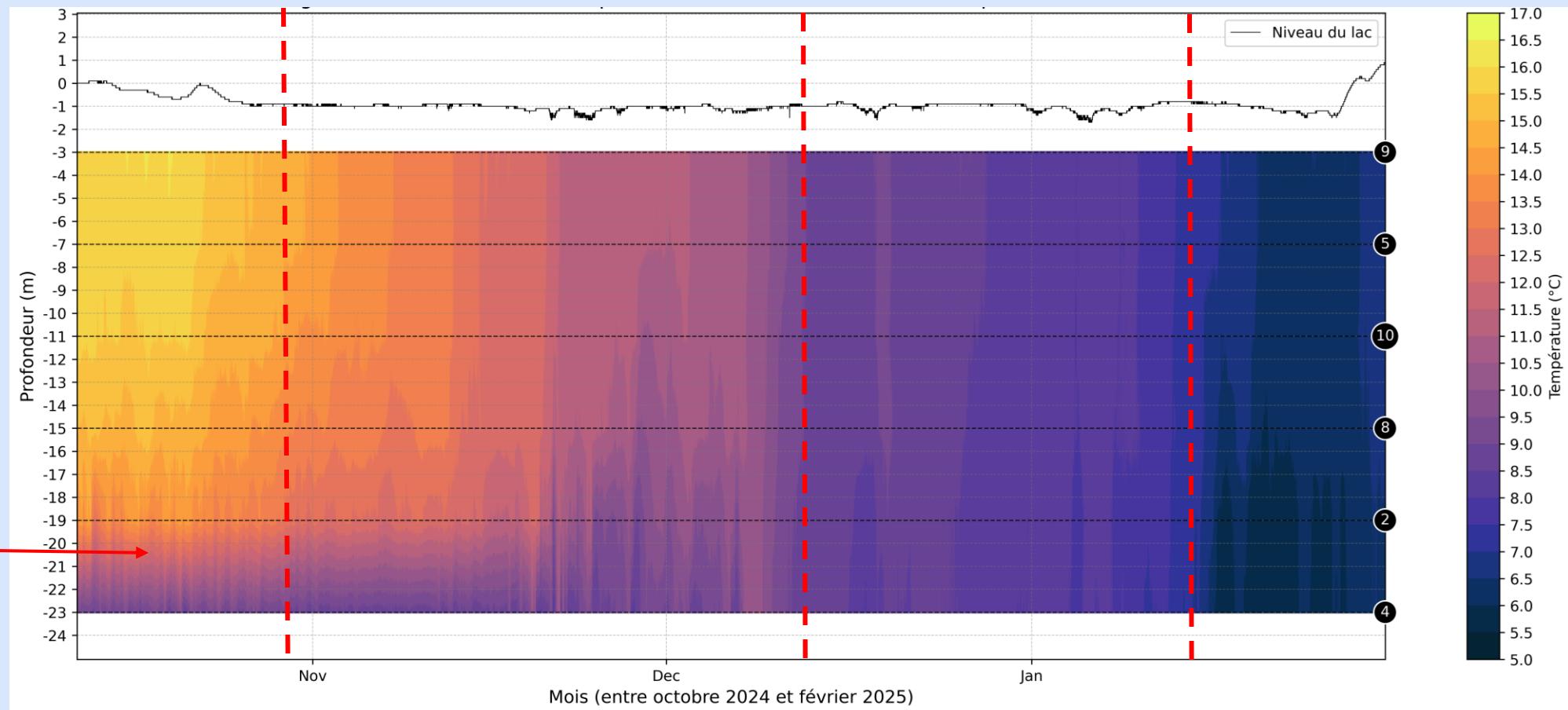


# Modèle CROCO - Simulation Réaliste Analytique



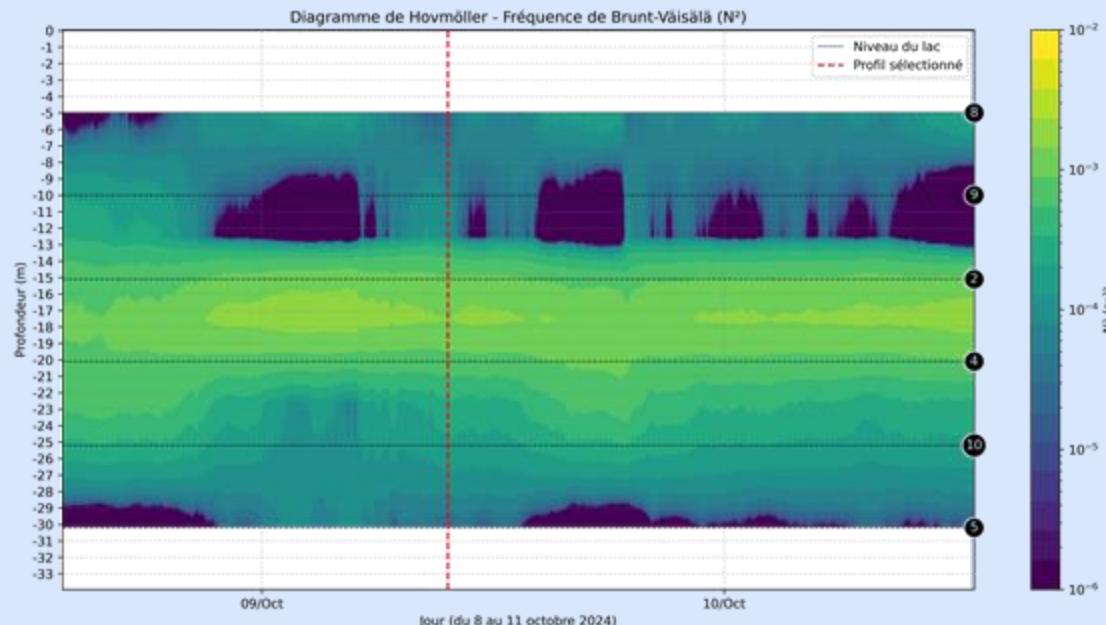
# Ondes internes

Forte stratification      Déstratification      Colonne d'eau homogène      Légère restratification

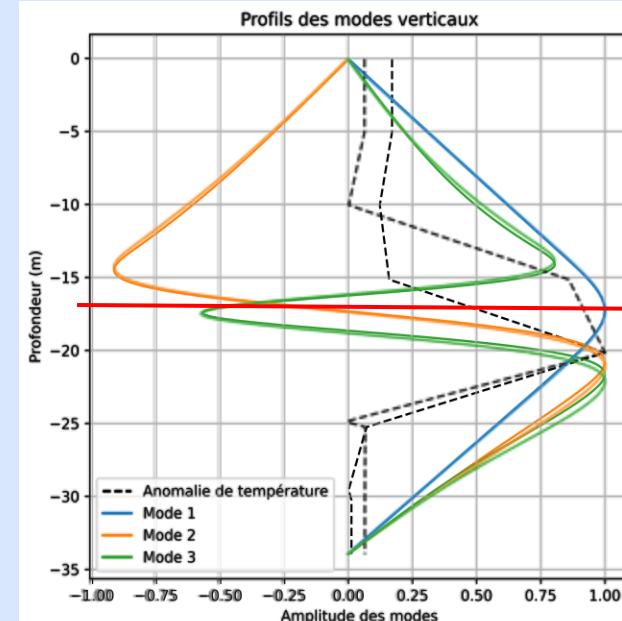


*Diagramme de Hovmöller à partir des données du mouillage 2024*

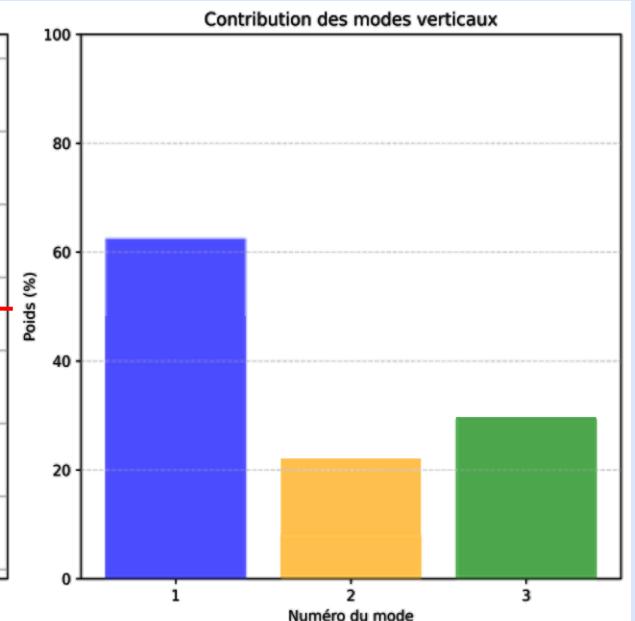
# Ondes internes – $N^2$ et modes verticaux



Hovmöller  $N^2$  MASTODON octobre 2024

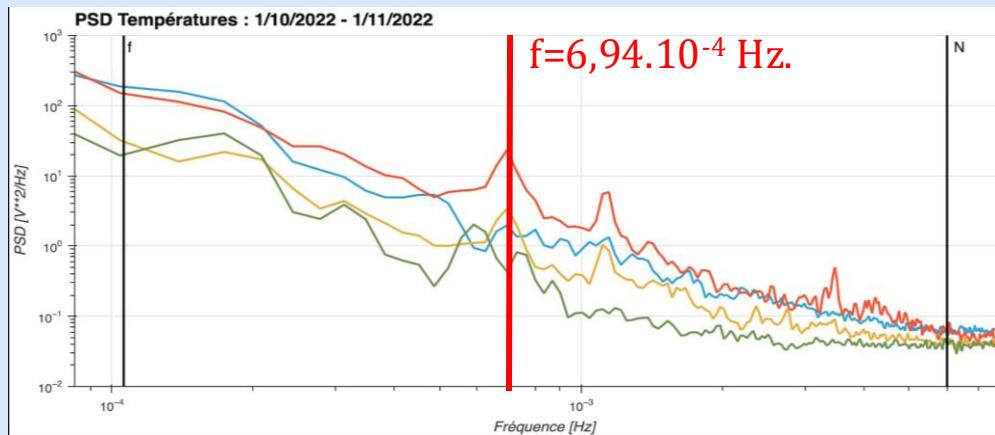


Modes verticaux, anomalie de température d'un profil par rapport à la moyenne hebdomadaire d'octobre 2024 et poids des modes

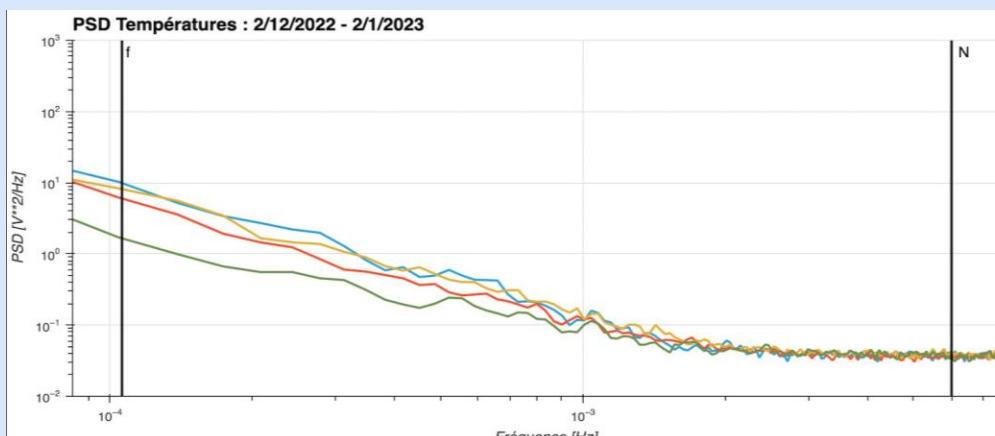


- ⇒ Le mode 1 capture la plus grande partie de l'énergie de l'anomalie de température.
- ⇒ De plus, la crête du mode 1 coïncide avec la position de la thermocline.
- ⇒ Fortes variabilités de température possiblement dues aux oscillations de la thermocline au passage d'une onde interne.
- ⇒ Stratification verticale propice à la formation et à la propagation d'ondes internes.

# Ondes internes – Étude fréquentielle



PSD octobre, période stratification



PSD décembre, colonne d'eau homogène

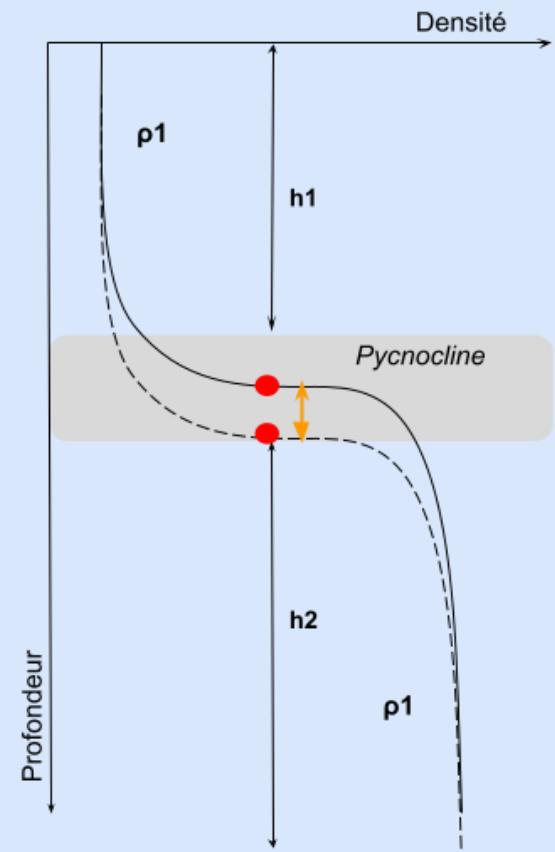
Fréquence des seiches internes théoriques :

Equation de Merian-Kelvin :

$$T = \frac{2l}{\sqrt{g \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\frac{\rho_2}{(h_2)} + \frac{\rho_1}{(h_1)}}}}$$

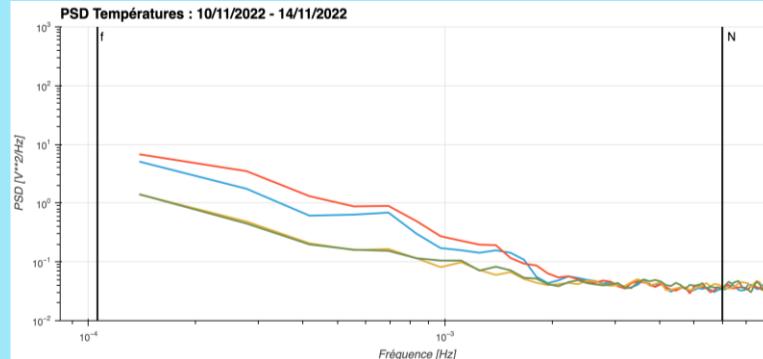
$T=26 \text{ min}$  ce qui correspond à  $f=6,4 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$

Les ondes internes observées semblent être des **seiches internes**.

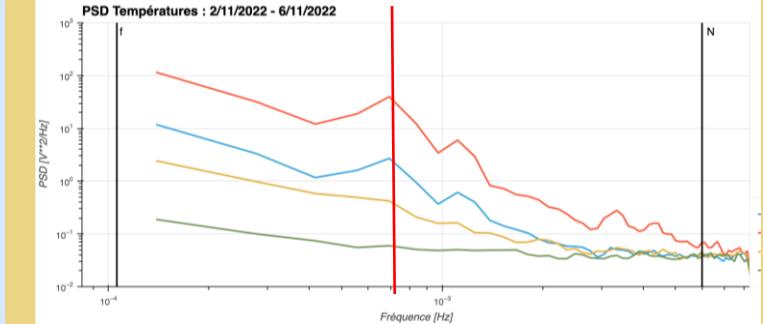


# Ondes internes – Génération par le vent

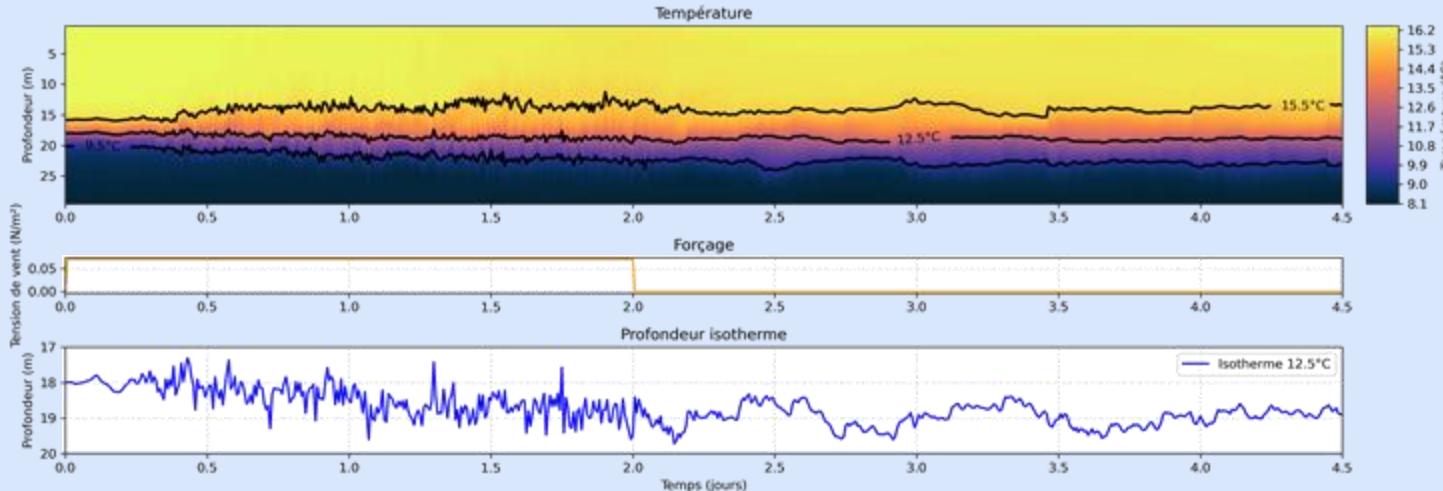
## Vents faibles



## Vents forts



Évolution de la température pour un point donné suite à un forçage en tension de vent, modèle CROCO



## Bilan

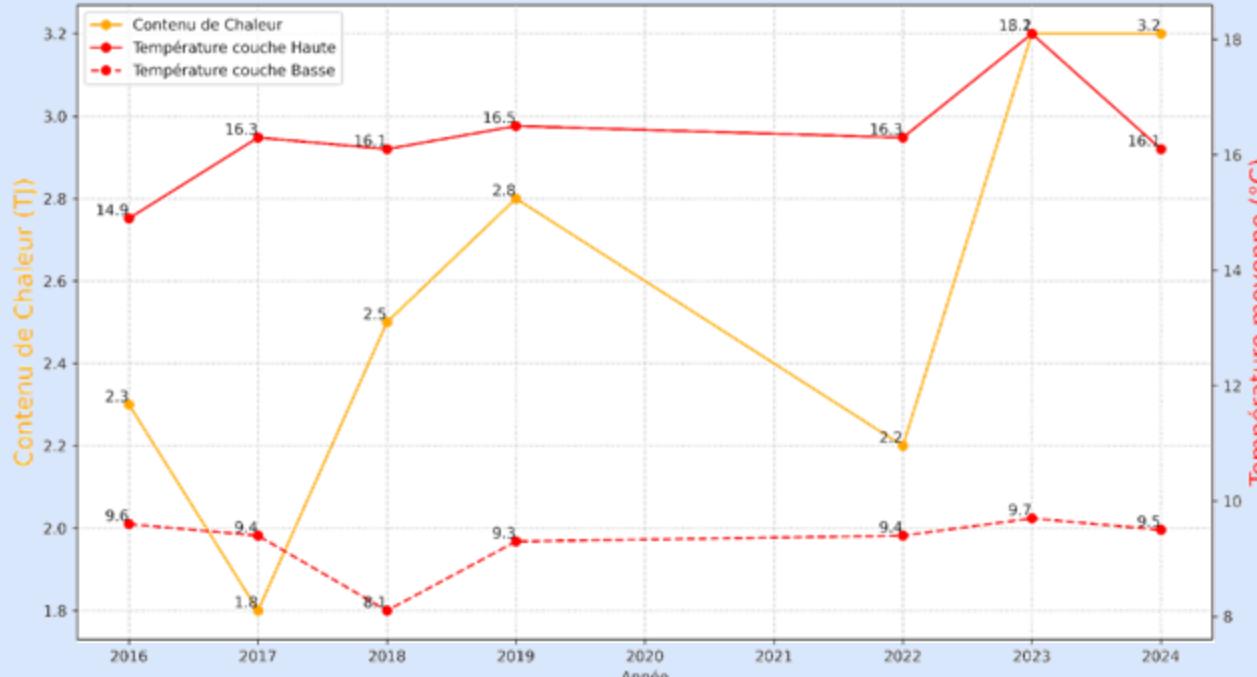
- Vent générateur des seiches internes
- Le turbinage ne semble pas les impacter

## Perspectives

- Etendre l'étude à d'autres variables météo
- Réitérer l'étude sur le turbinage

# Climatologie de la stratification

Lien entre le Contenu de Chaleur et la Température moyenne de la couche Haute et Basse



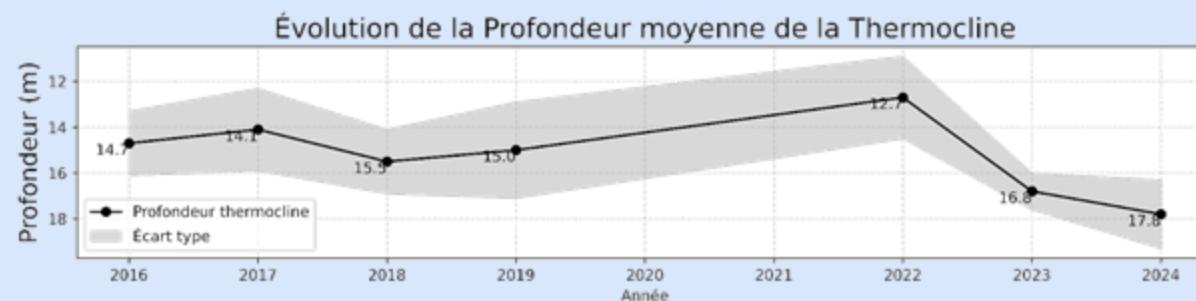
## Contenu de chaleur du lac:

**Energie absorbée et stockée** par le lac.

Nécessaire de mesurer la température à différents endroits et à différentes profondeurs du lac.

$$h' = \rho_0 C_p \int_{-D}^0 T(z) dz$$

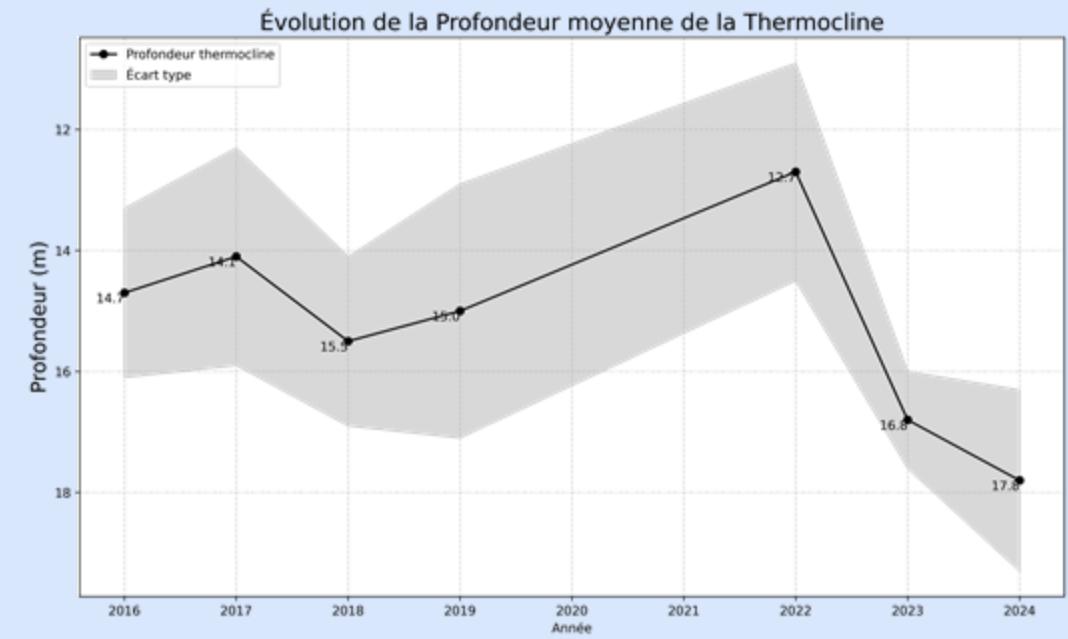
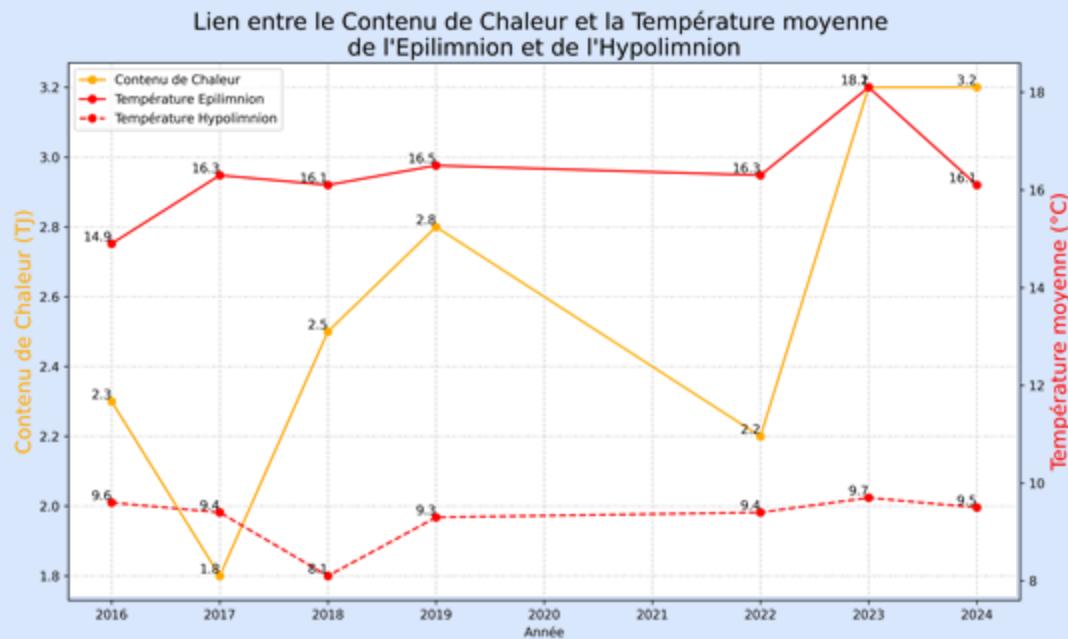
Contenu de chaleur d'une colonne d'eau



# Climatologie de la stratification

## Coefficients de corrélations

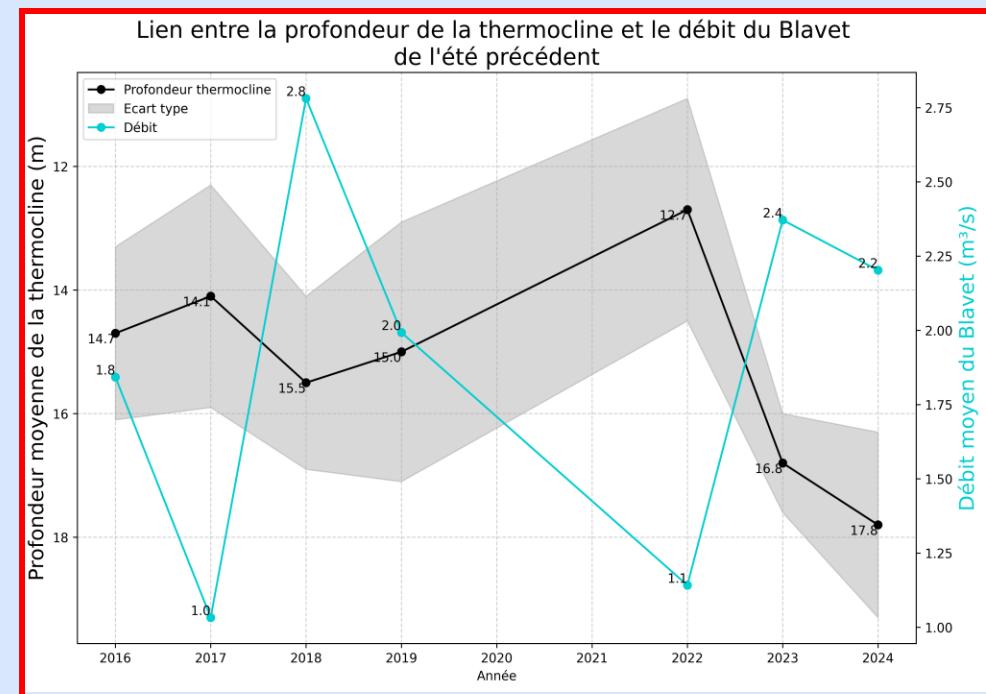
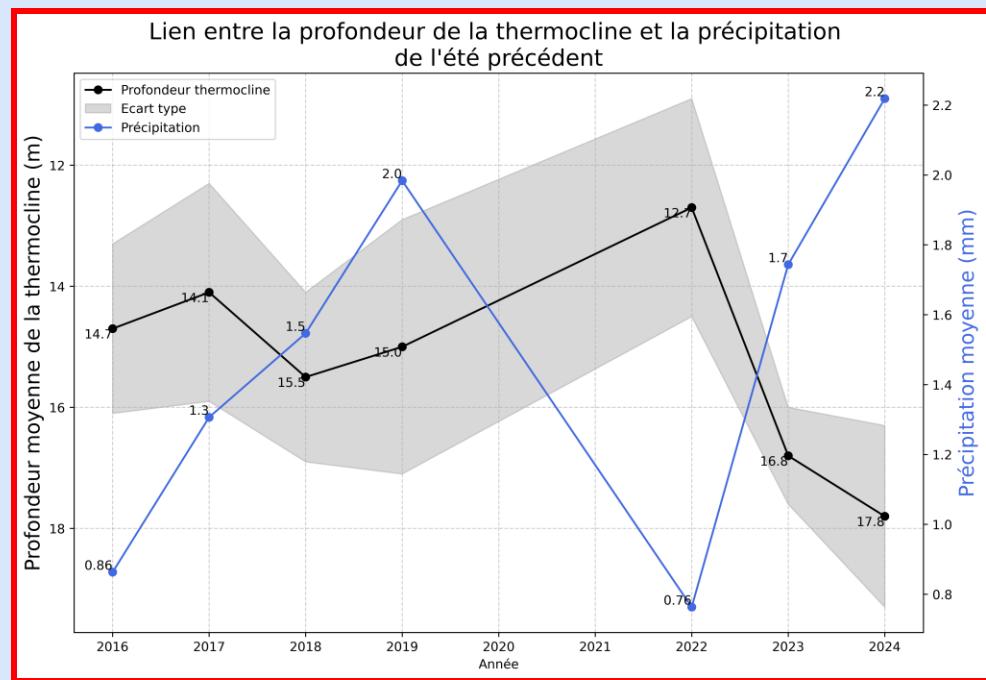
Paramètre	Température (ARPEGE)	Température (station)	Pluie	Débit	Vent total	Vent d'Est	Vent de Nord
$R^2$ Contenu de chaleur	0.033 %	11.7%	57.5 %	49.6 %	10.5 %	0.121 %	14.9 %
$R^2$ Profondeur thermocline	9.67 %	39.7 %	67.5 %	52.2 %	0.119 %	11.4 %	28.8 %
$R^2$ Température Couche Haute	35.9 %	4.72 %	17.0 %	3.9 %	0.342 %	0.109 %	13.0 %
$R^2$ Température Couche Basse	0.000188 %	9.16 %	0.32 %	22.9 %	16.3 %	37.1 %	37.8 %



# Climatologie de la stratification

## Coefficients de corrélations

Paramètre	Température (ARPEGE)	Température (station)	Pluie	Débit	Vent total	Vent d'Est	Vent de Nord
$R^2$ Contenu de chaleur	0.033 %	11.7%	57.5 %	49.6 %	10.5 %	0.121 %	14.9 %
$R^2$ Profondeur thermocline	9.67 %	39.7 %	67.5 %	52.2 %	0.119 %	11.4 %	28.8 %
$R^2$ Température Couche Haute	35.9 %	4.72 %	17.0 %	3.9 %	0.342 %	0.109 %	13.0 %
$R^2$ Température Couche Basse	0.000188 %	9.16 %	0.32 %	22.9 %	16.3 %	37.1 %	37.8 %



# Conclusion

- Lac stratifié en octobre puis homogène en février
- Ondes internes ⇒ seiches internes dues au vent
- Modèle :
  - ⇒ impact fort dû vent pour l'homogénéisation du lac
  - ⇒ impact des flux de chaleur sur la restratification en période de vents faibles
- Etude climatologique
  - ⇒ impact du vent faible
  - ⇒ impact important des précipitations et du débit du Blavet

# Discussion

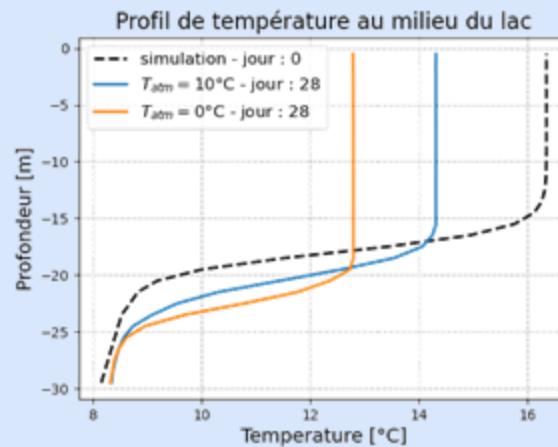
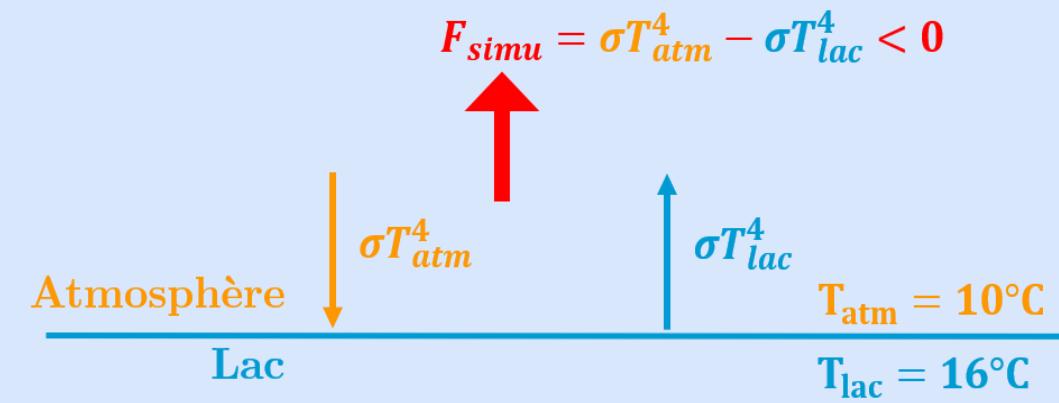
- Etude des données de turbinage pour les ondes internes
- Modélisation réaliste avec le débit du Blavet et les données météorologiques
- Suivi du processus de stratification en été
- Etudier les bras Est/Ouest et Nord/Sud du lac séparément

# Bibliographie

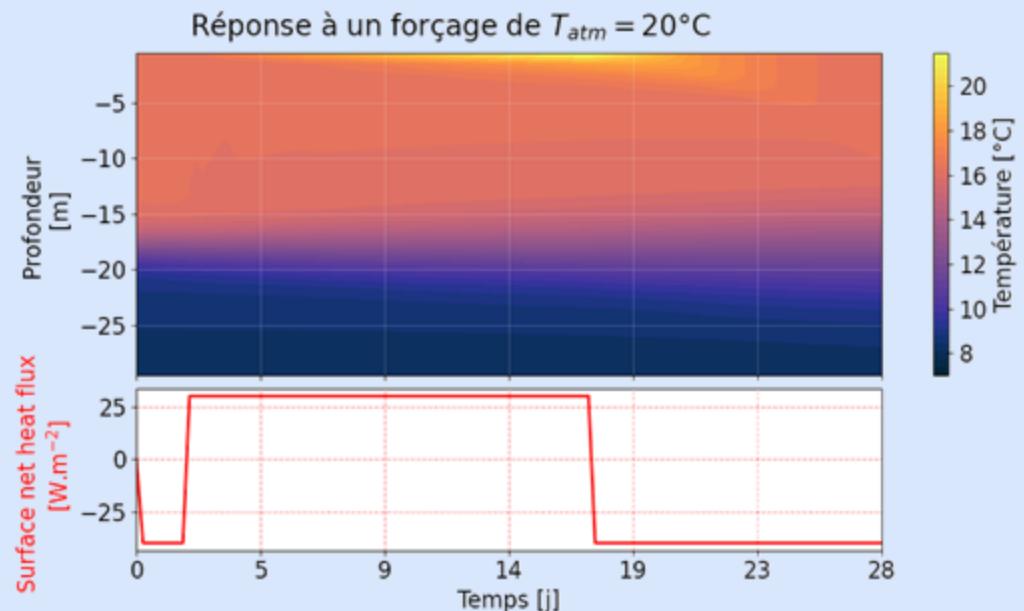
- Bocaniov, S. A., Ullmann, C., Rinke, K., Lamb, K. G., & Boehrer, B. (2014). Internal waves and mixing in a stratified reservoir : Insights from three-dimensional modeling. *Limnologica*, 49, 52-67.
- Boehrer, B., & Schultze, M. (2008). Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics*, 46(2).
- Cuypers, Y., Vinçon-Leite, B., Poulin, M., Bournet, P.-E., & Tassin, B. (2006). Ondes internes et mélange turbulent dans le lac du Bourget. *Autour du lac du Bourget*, 56-64.
- Drakos, N., Hennecke, M., Moore, R., Swan, H., Lippmann, J., Rouchal, M., & Wilck, M. (s. d.). Vertical mixing[Nemo]. Récupérée 4 février 2025, à partir de <https://www.nemo-ocean.eu/doc/node/67.html>
- Forcat, F., Roget, E., Figueroa, M., & Sánchez-Martin, X. (2011). Earth rotation effects on the internal wave field in a stratified small lake : Numerical simulations. *Limnetica*, 30(1), 0027-42.
- Gerkema, T., & Zimmerman, J. (2008). An introduction to internal waves. *Lecture Notes*, Royal NIOZ, Texel, 207, 207.
- Massot, J. (s. d.). Notebook de l'étude de stabilité automatique de couple de schémas WENO-RK(s,n). Récupérée 4 février 2025, à partir de <https://jmassot.perso.math.cnrs.fr/stability.html#1.3-M%C3%A9thodes-WENO-modifi%C3%A9es>
- Rondel, C., Danis, P., & Daufresne, M. (2012). Typologie thermo-mictique : Application à une classification des lacs français (thèse de doct.). irstea.
- Touchart, L. (2002). La limnologie dynamique, l'eau en mouvement dans les lacs et les étangs. *Limnologie physique et dynamique, une géographie des lacs et des étangs*, 167-236.
- WHOI. (1998). Introduction to internal waves [Consulté le 6 février 2025]. <https://www.whoi.edu/science/aope/people/tduda/isww/text/evans/node1.html> sur 48

# Annexes

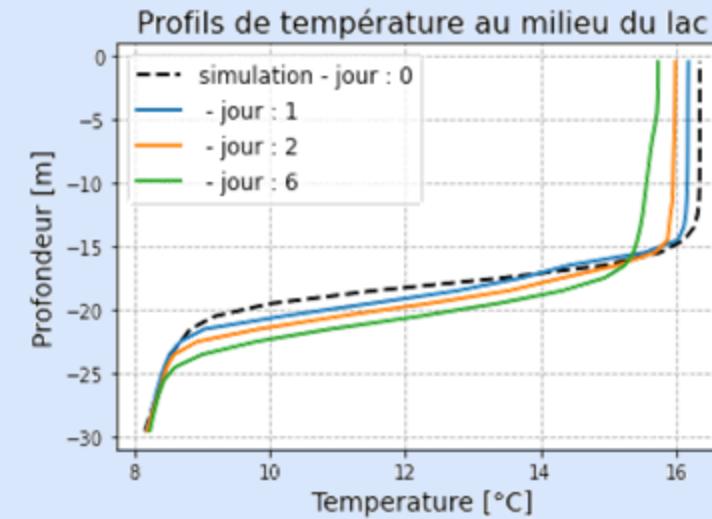
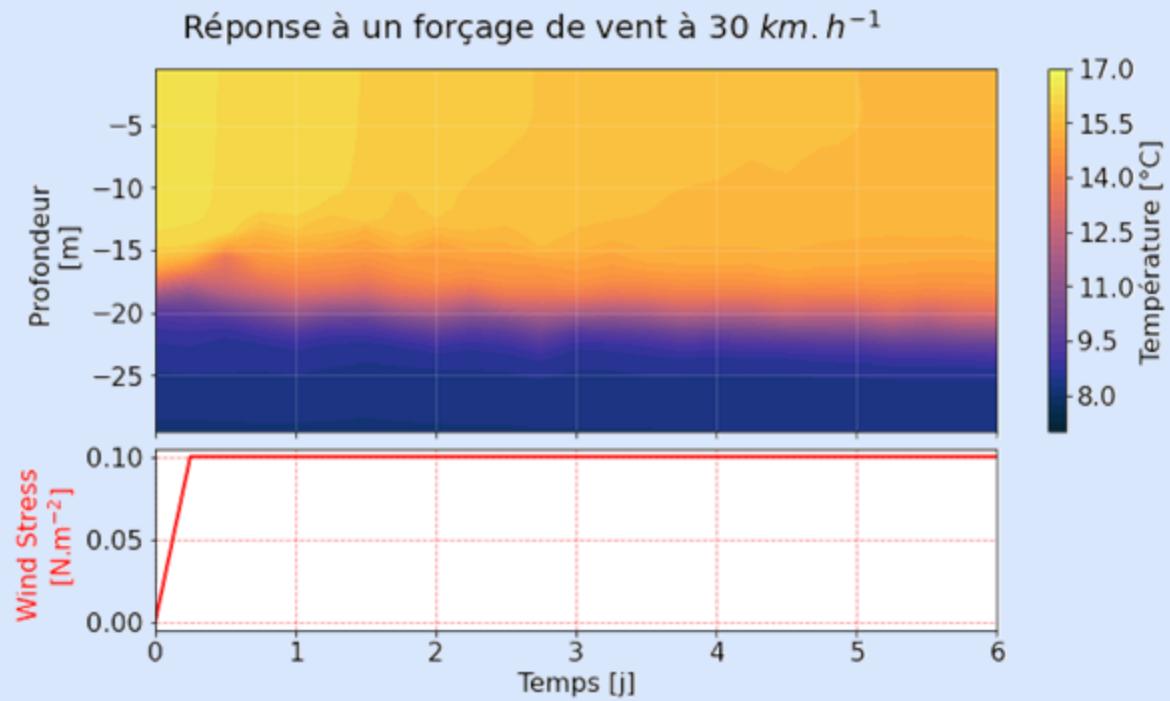
# Modèle CROCO : Forçages de Flux de Chaleur



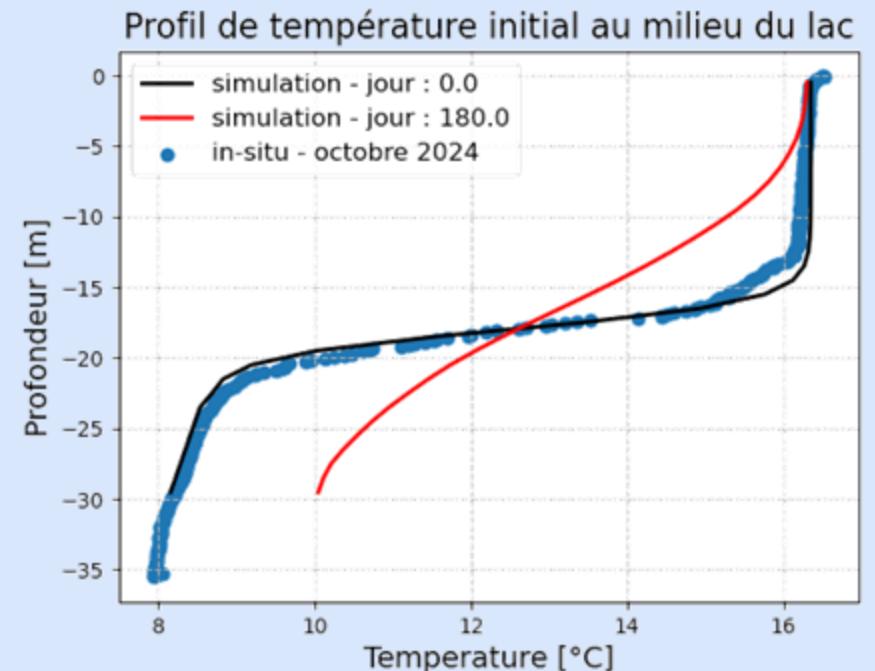
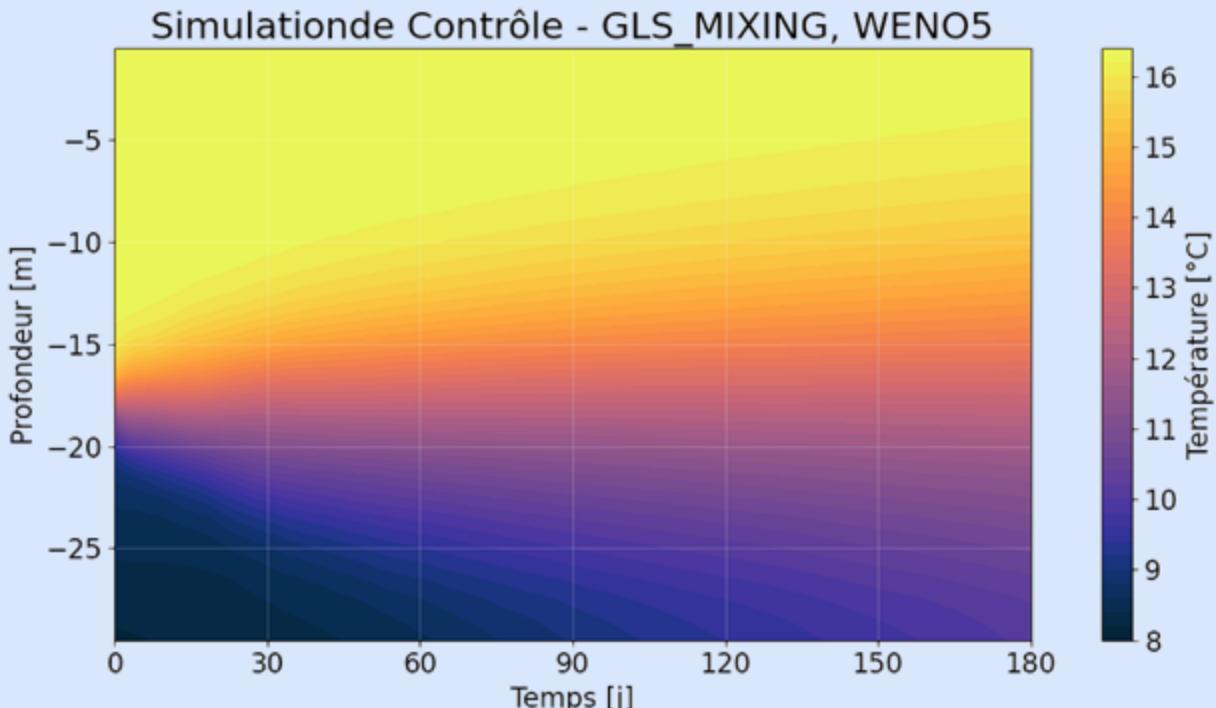
$$F_{simu} = \sigma T_{atm}^4 - \sigma T_{lac}^4$$



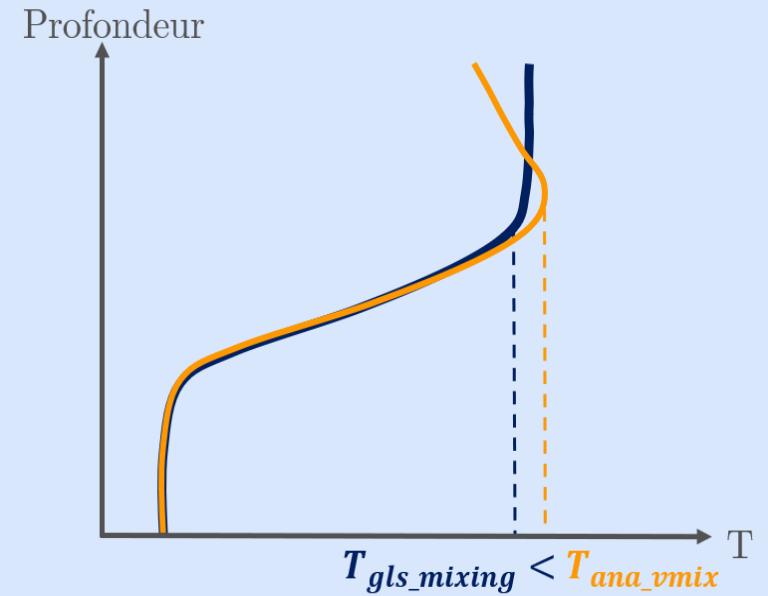
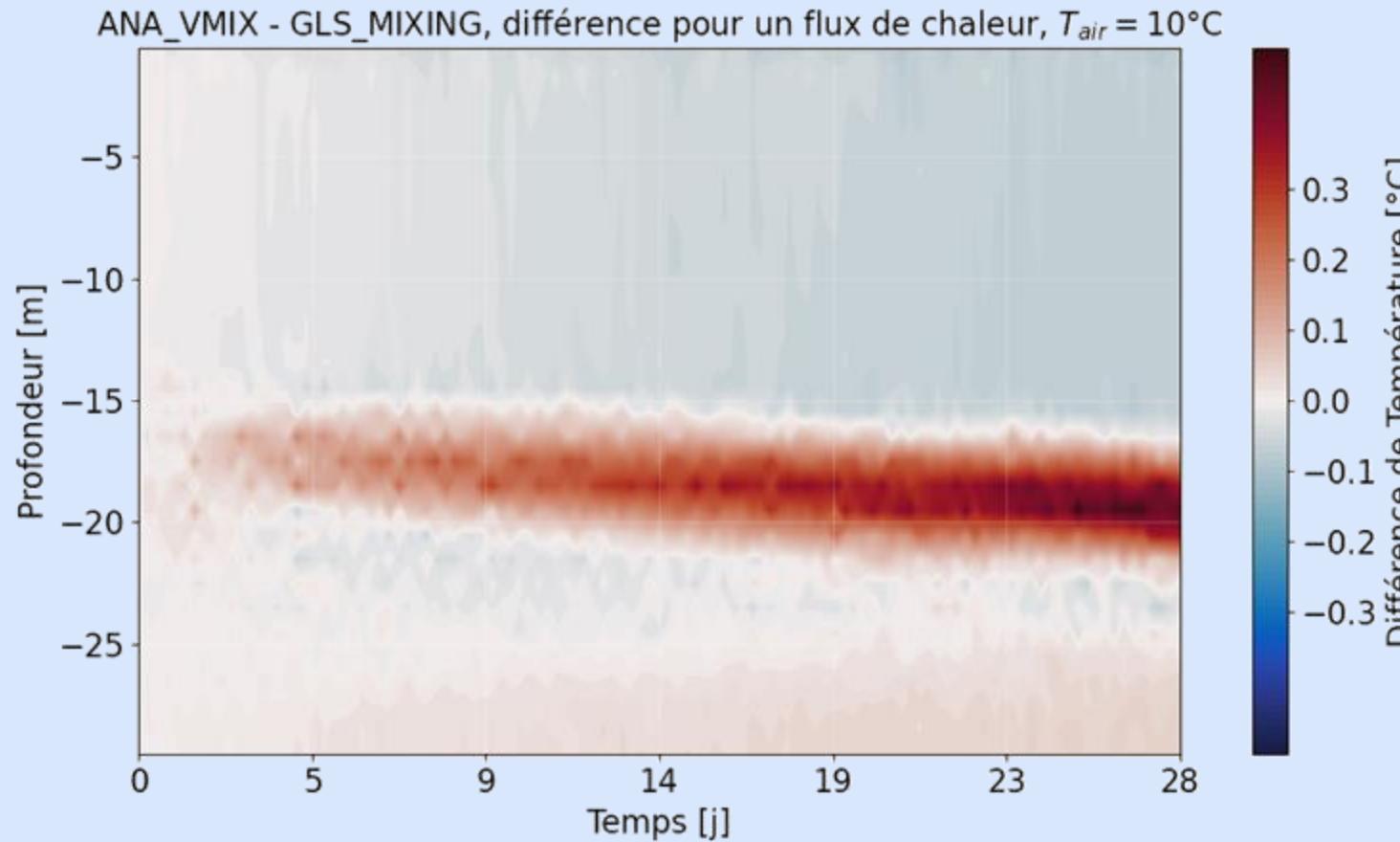
# Modèle CROCO : Forçages de vent



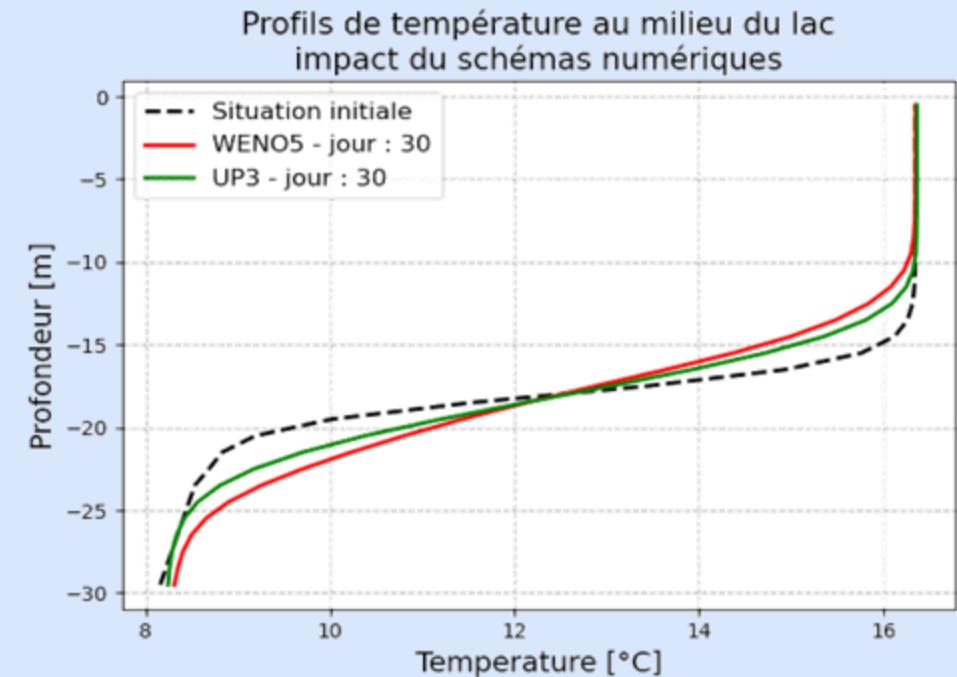
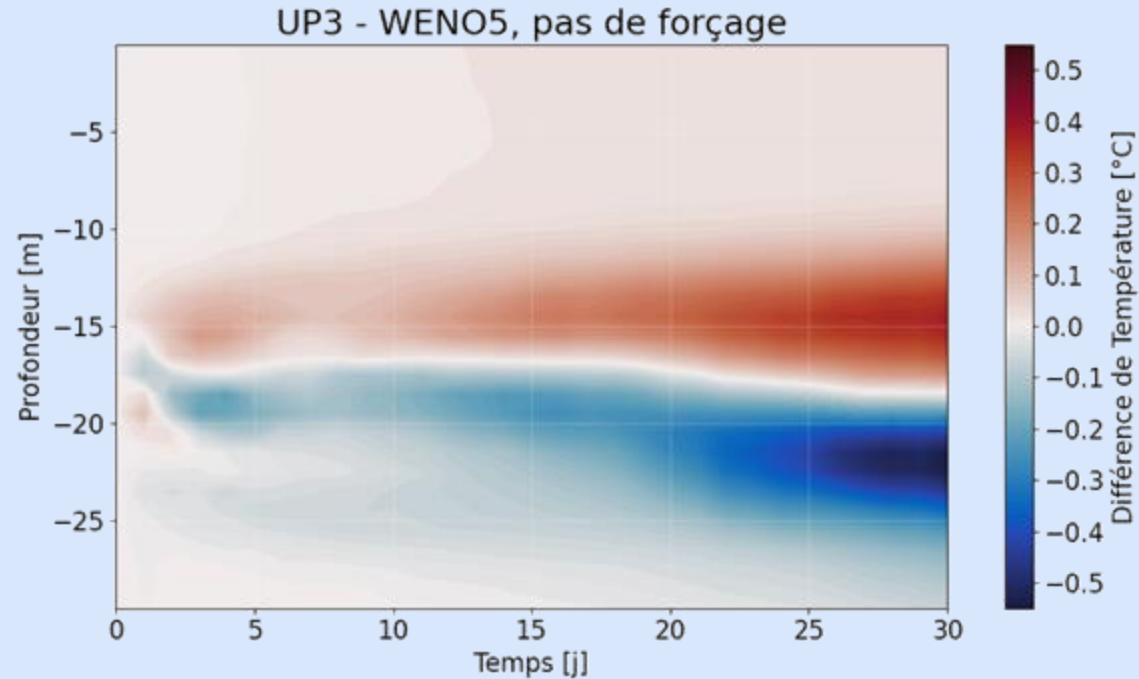
# Modèle CROCO : Etude Numérique



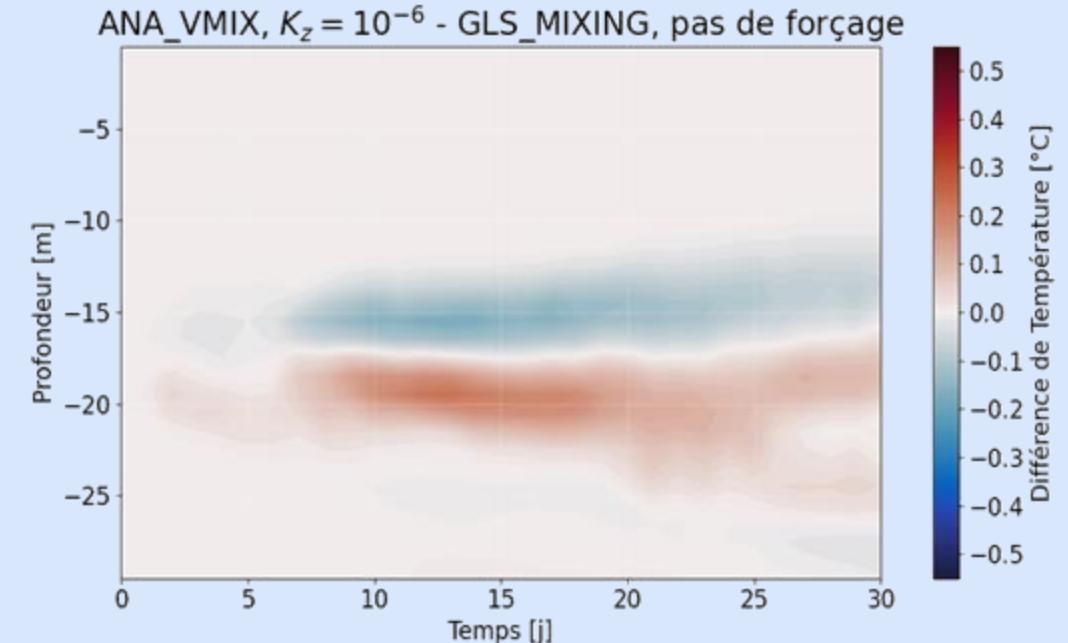
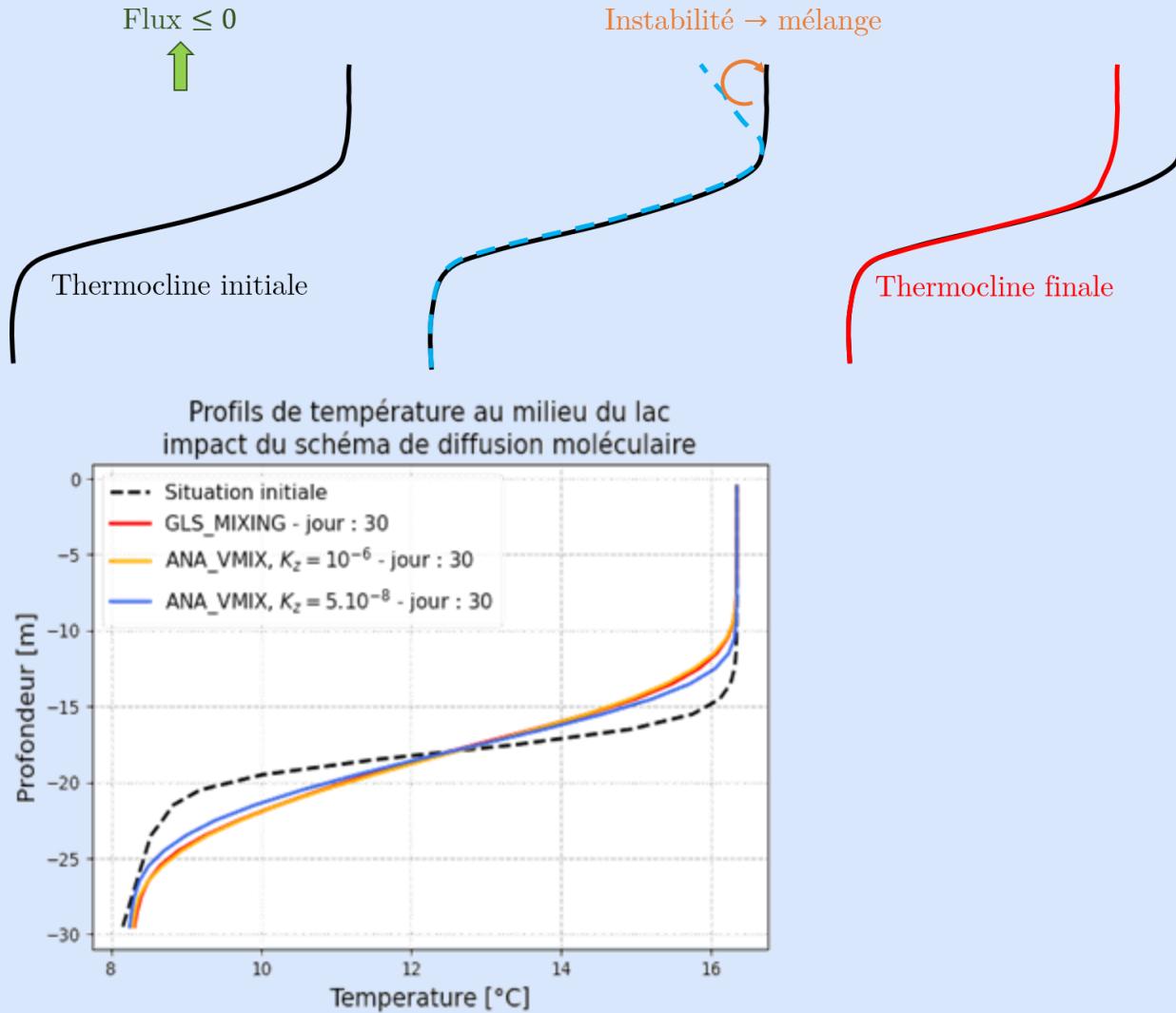
# Modèle CROCO : Etude Numérique



# Modèle CROCO : Etude Numérique



# Modèle CROCO : Etude Numérique



# Choix des interpolateurs

