

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

Lac de Guerlédan

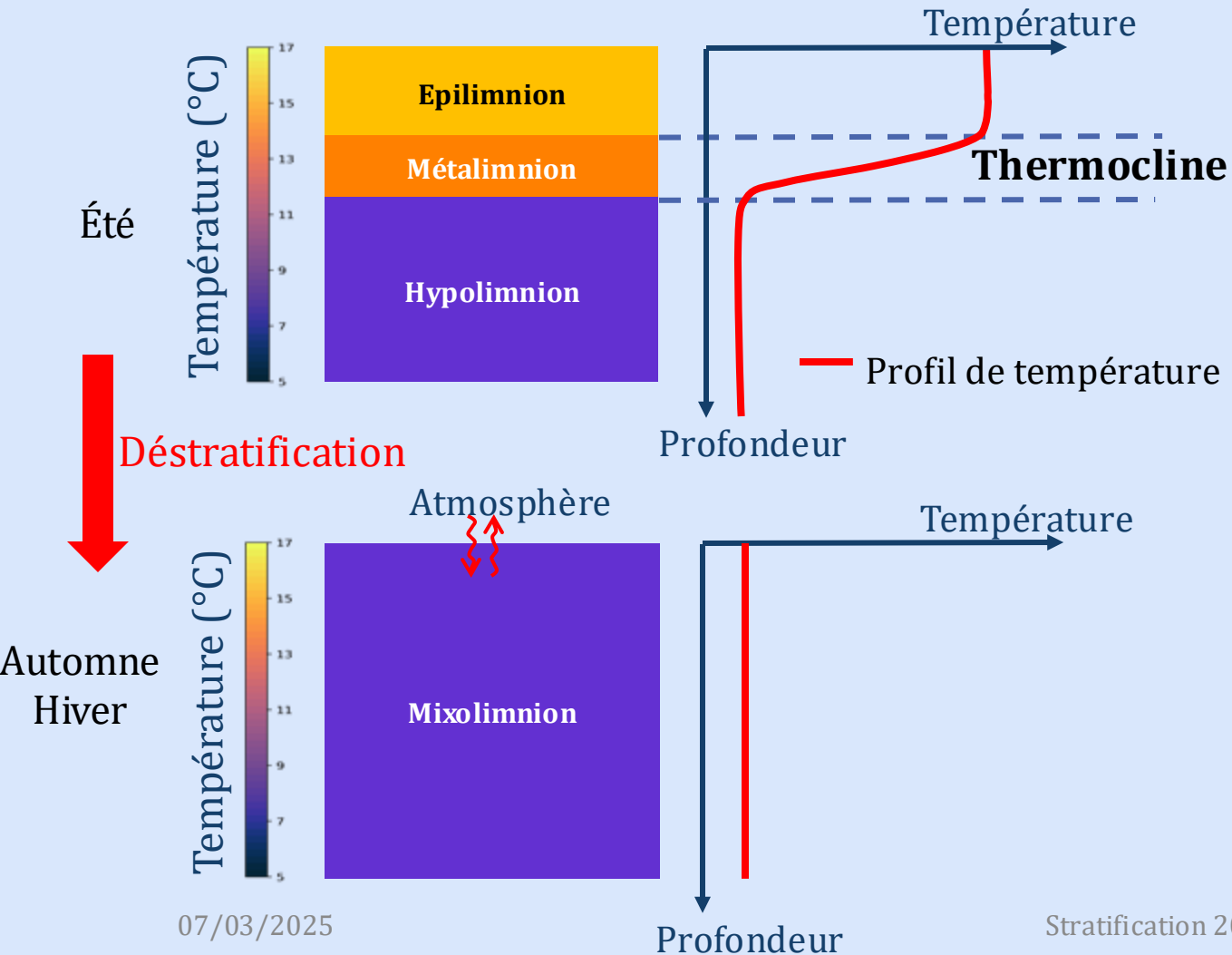
2024-2025

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

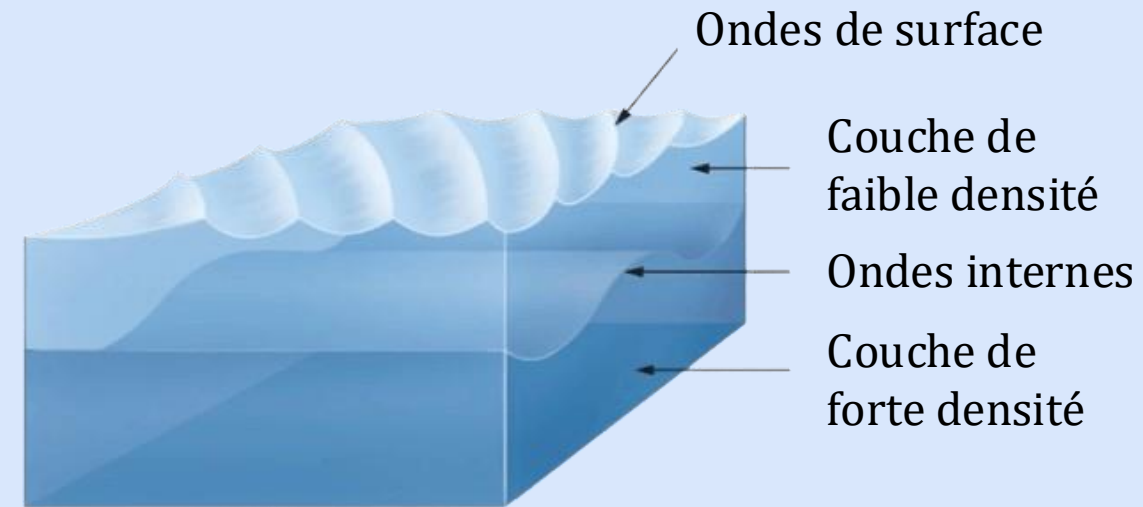
Encadrants : Jean-Baptiste Roustan, Amandine Nicolle

Introduction - Phénomènes physiques

Stratification



Ondes internes

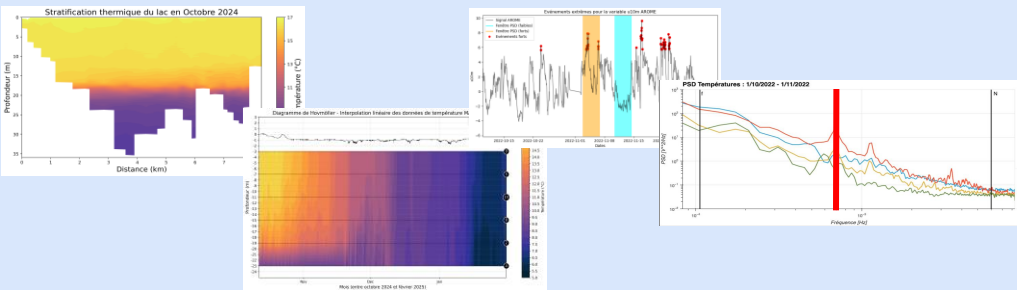


Introduction – Méthodes

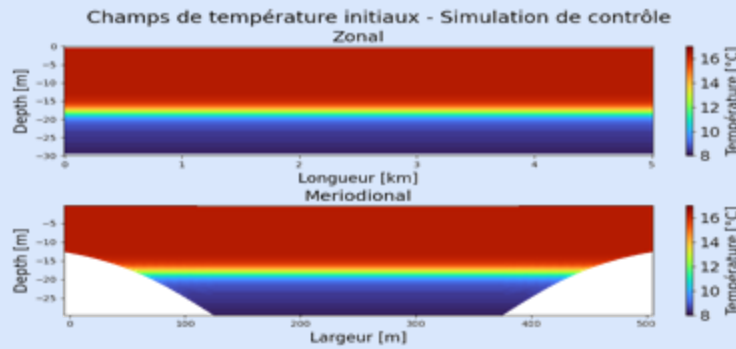
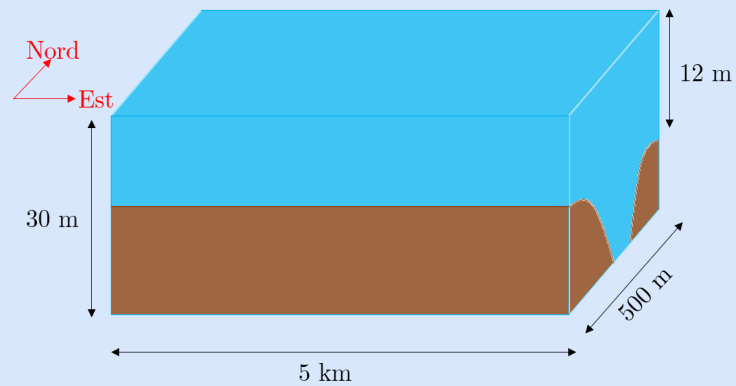
Mesures in situ



Traitement des données



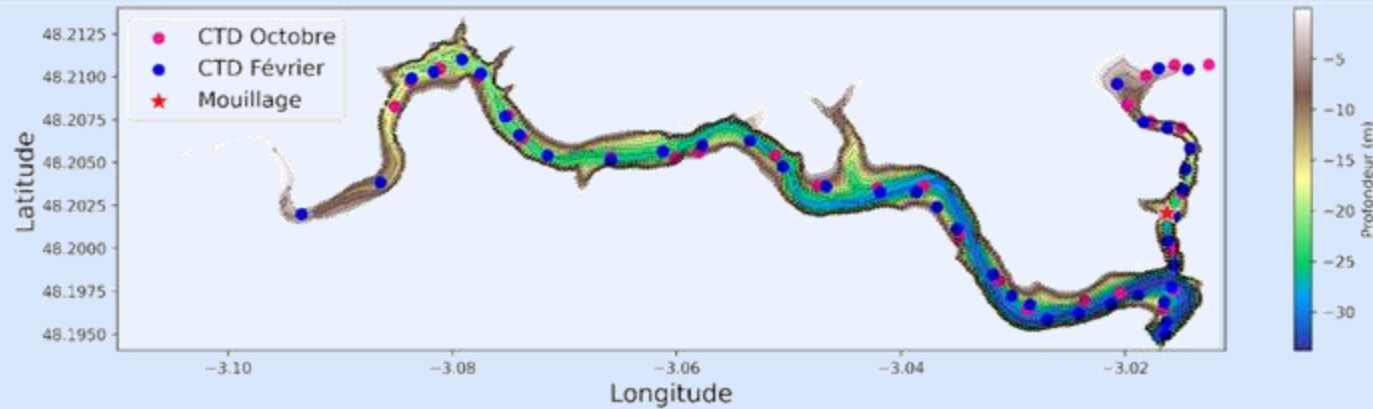
Modélisation numérique



↔
Comparaisons

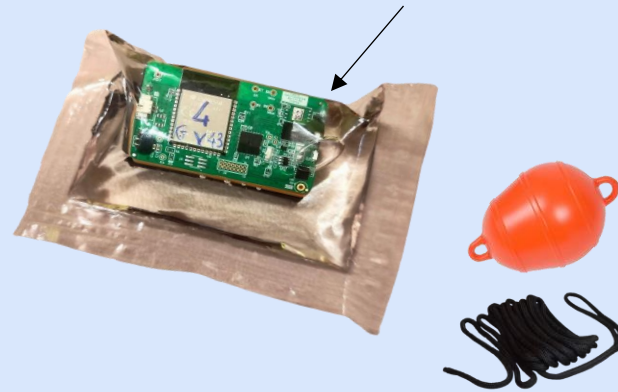
Introduction – Matériel

Emplacements du mouillage et des mesures CTD



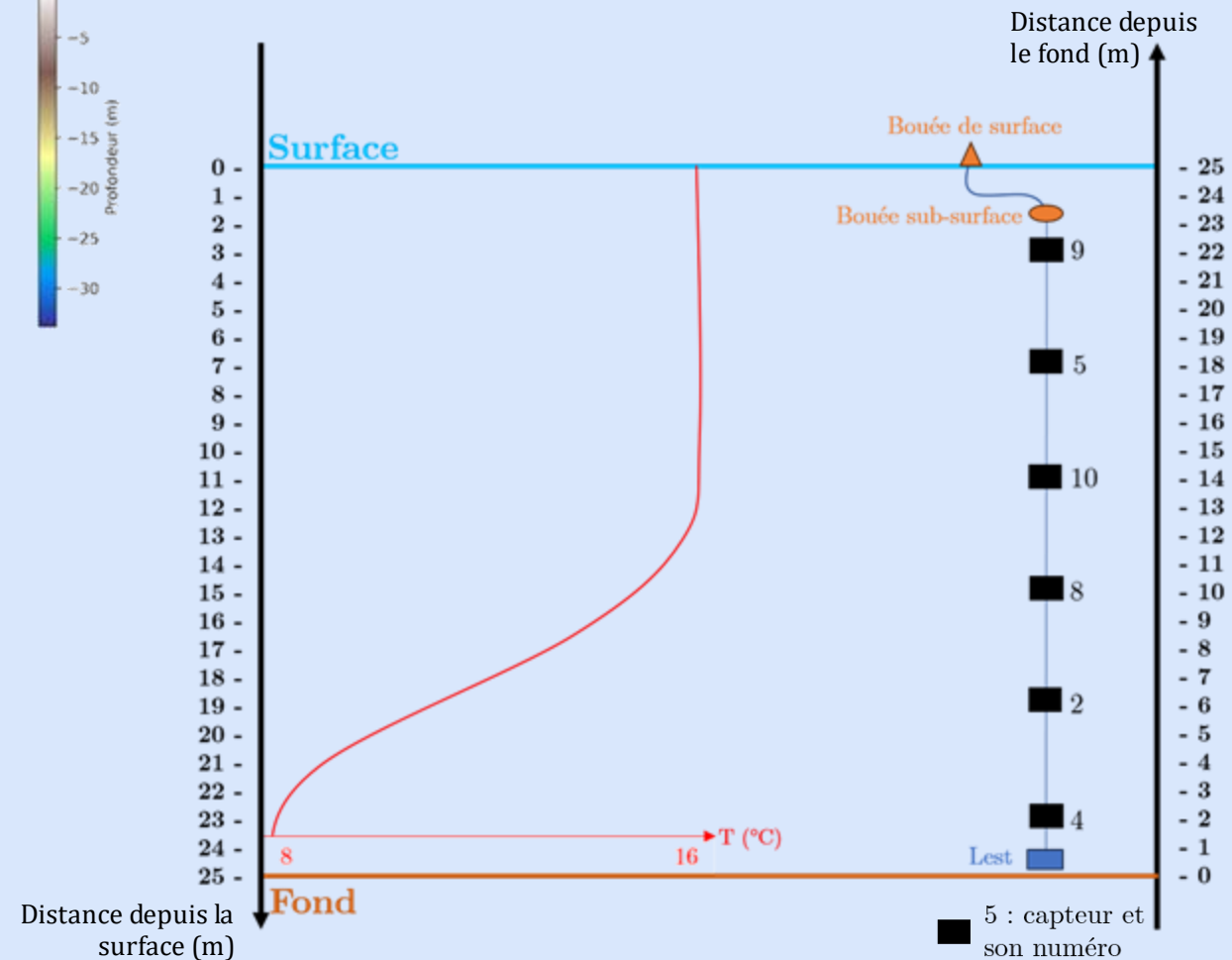
Sonde CTD (Conductivity, Temperature, Depth)

Thermistors MASTODON ×6

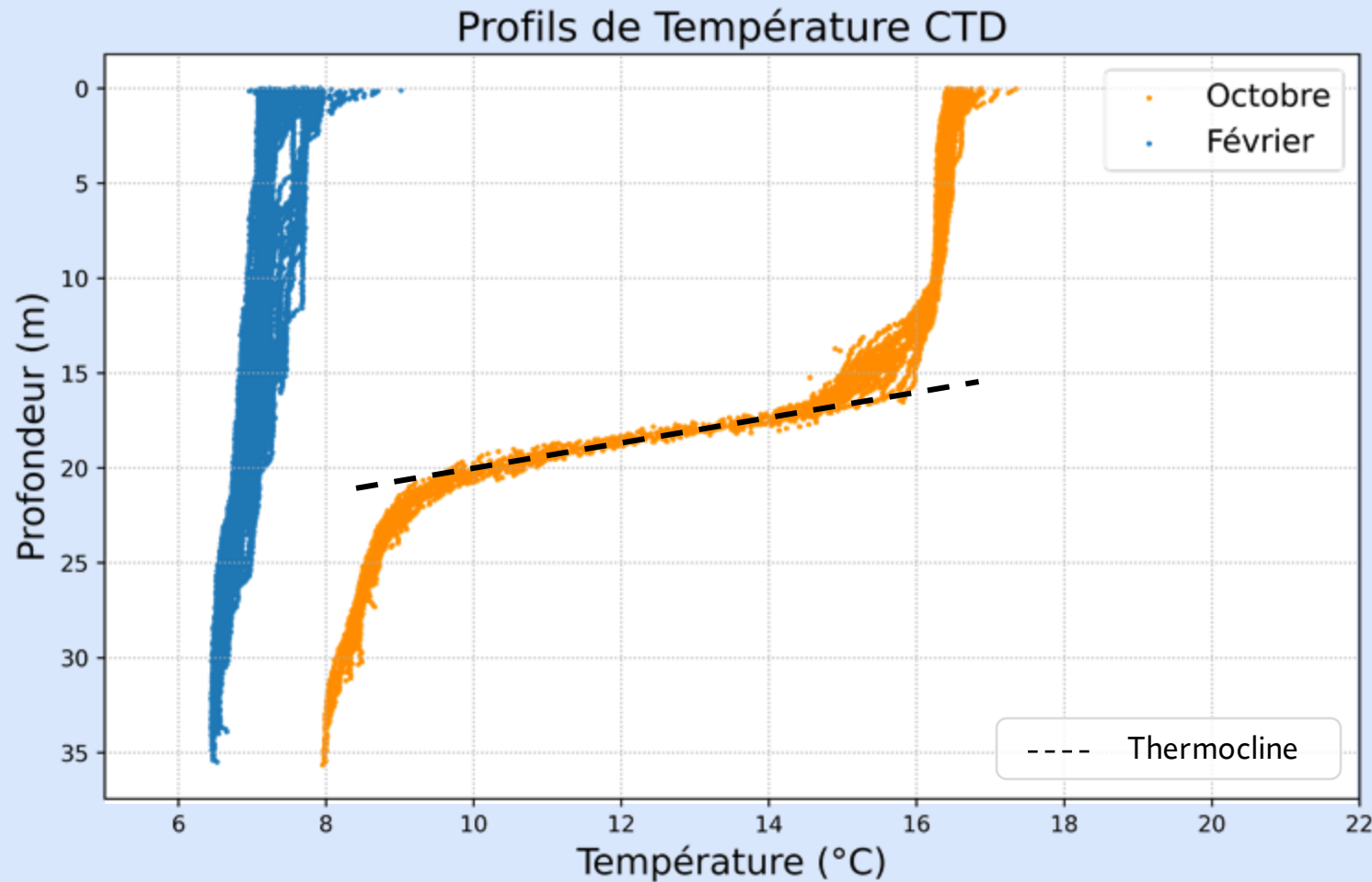


Ligne de mouillage

Schéma du mouillage Octobre 2024 → Février 2025



Stratification – Octobre 2024 et Février 2025

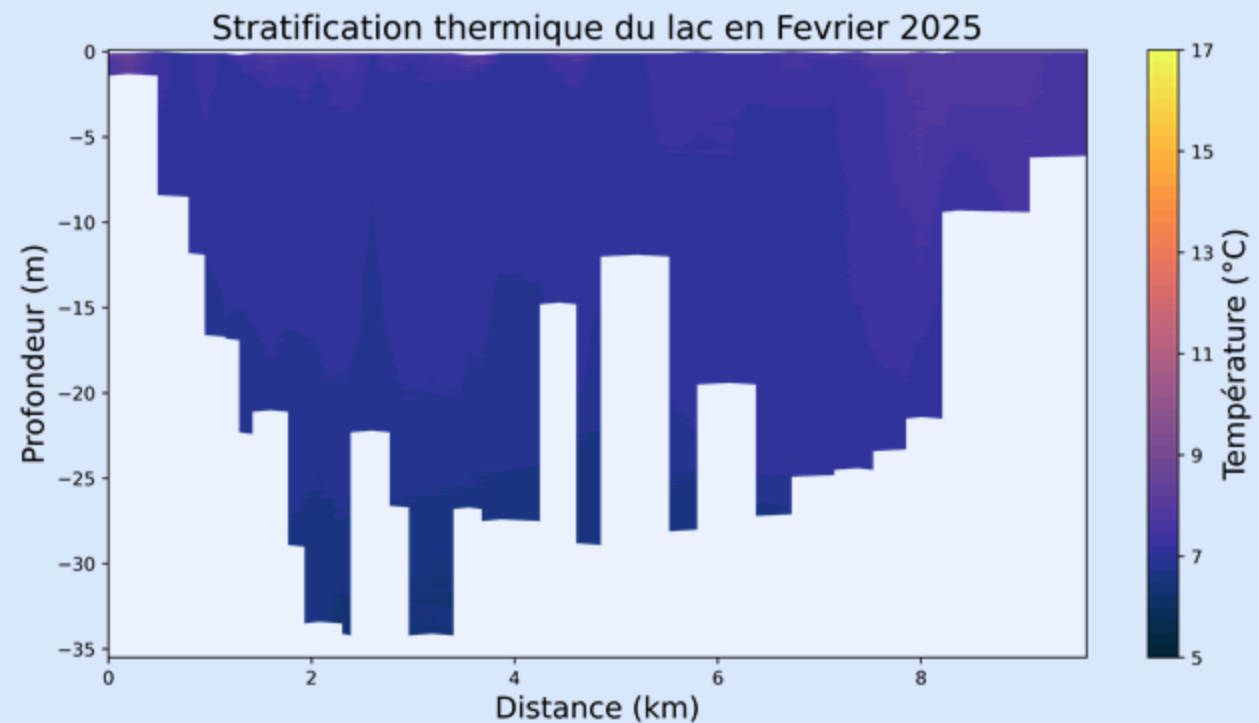
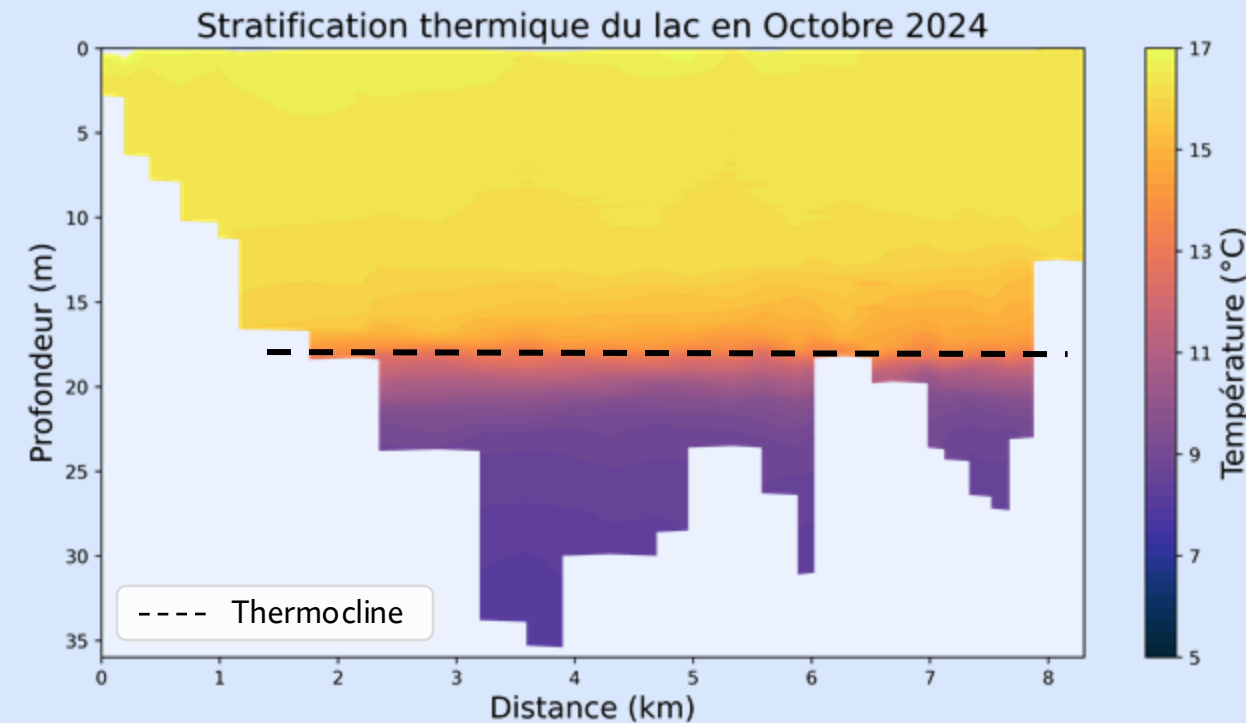


Thermocline :

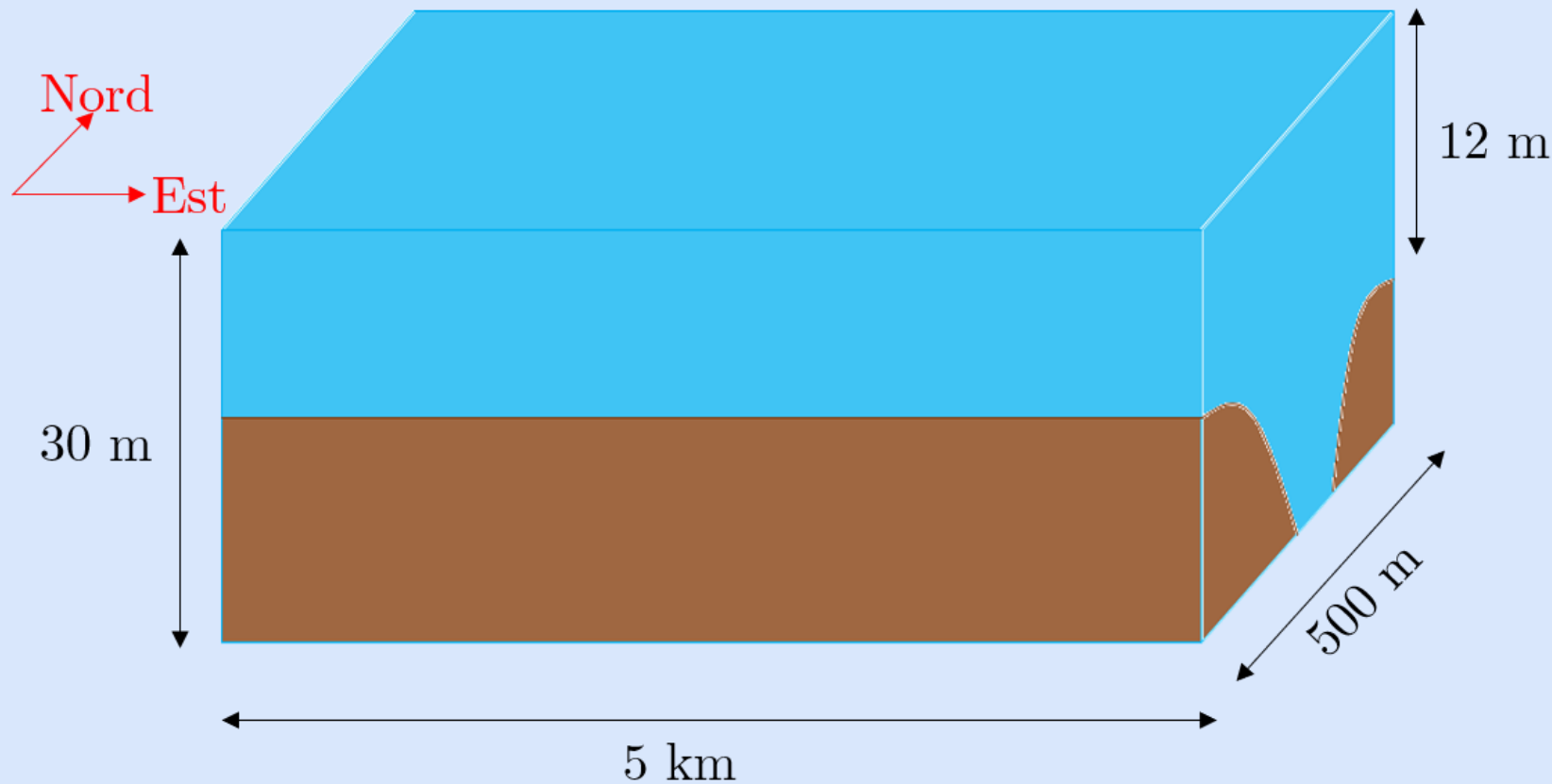
Profondeur où l'on trouve le plus fort gradient de température.

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

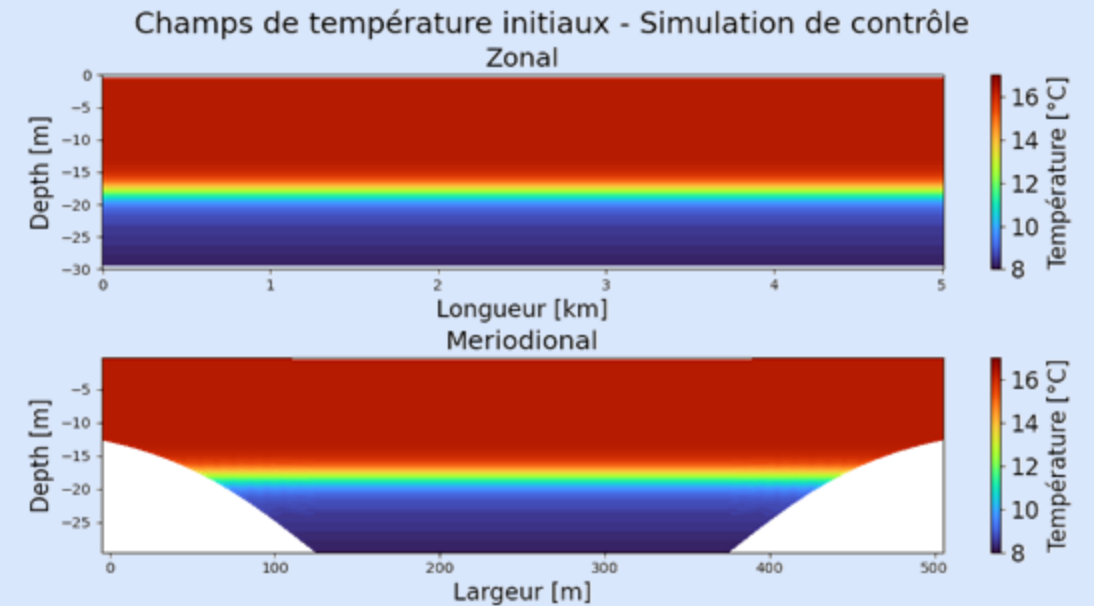
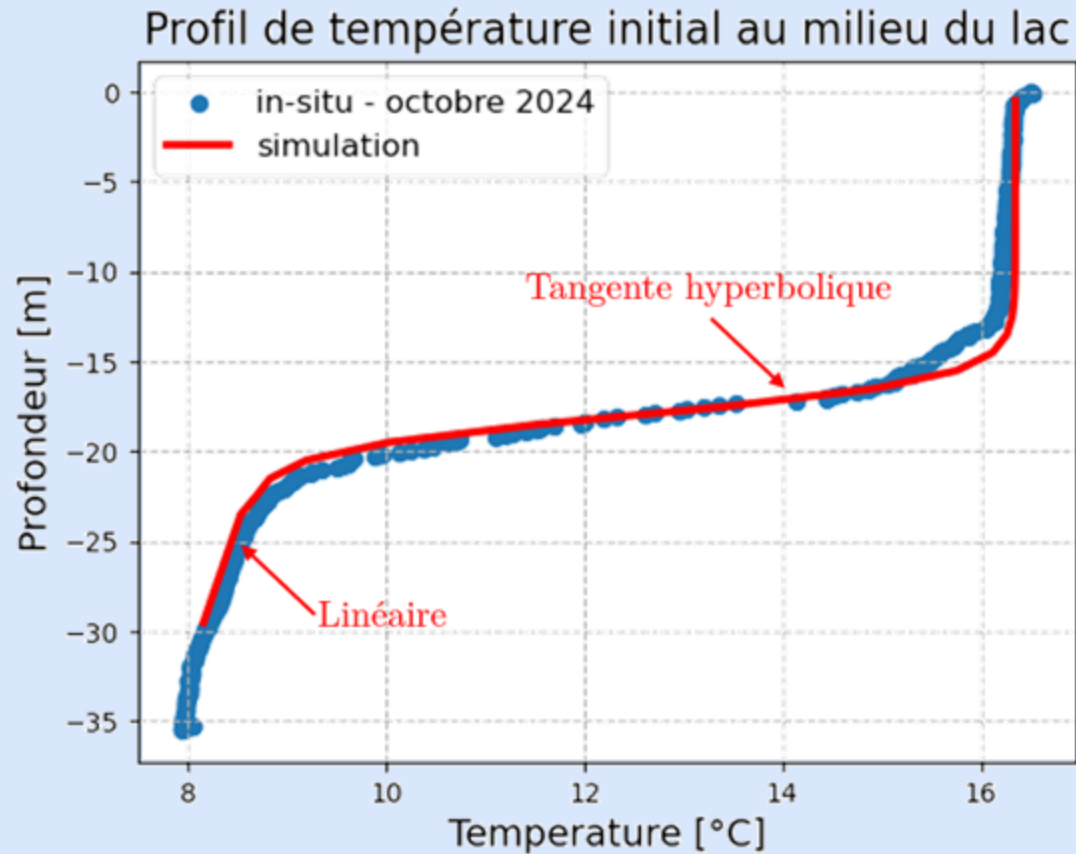


Modèle CROCO – Notre Configuration



- Boîte fermée, pas de source
- Résolution de $10\text{m} \times 10\text{m}$
- 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 ($W.m^{-2}$)

$$F_{simu} = F_{atm} - F_{lac} < 0$$



$$F_{atm} > 0$$

$$F_{lac} < 0$$

Lac

$$T_{lac} = 16^{\circ}C$$

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

Tension du vent ($N.m^{-2}$)

Est
→

$$\tau = \rho_{air} C_D U^2$$

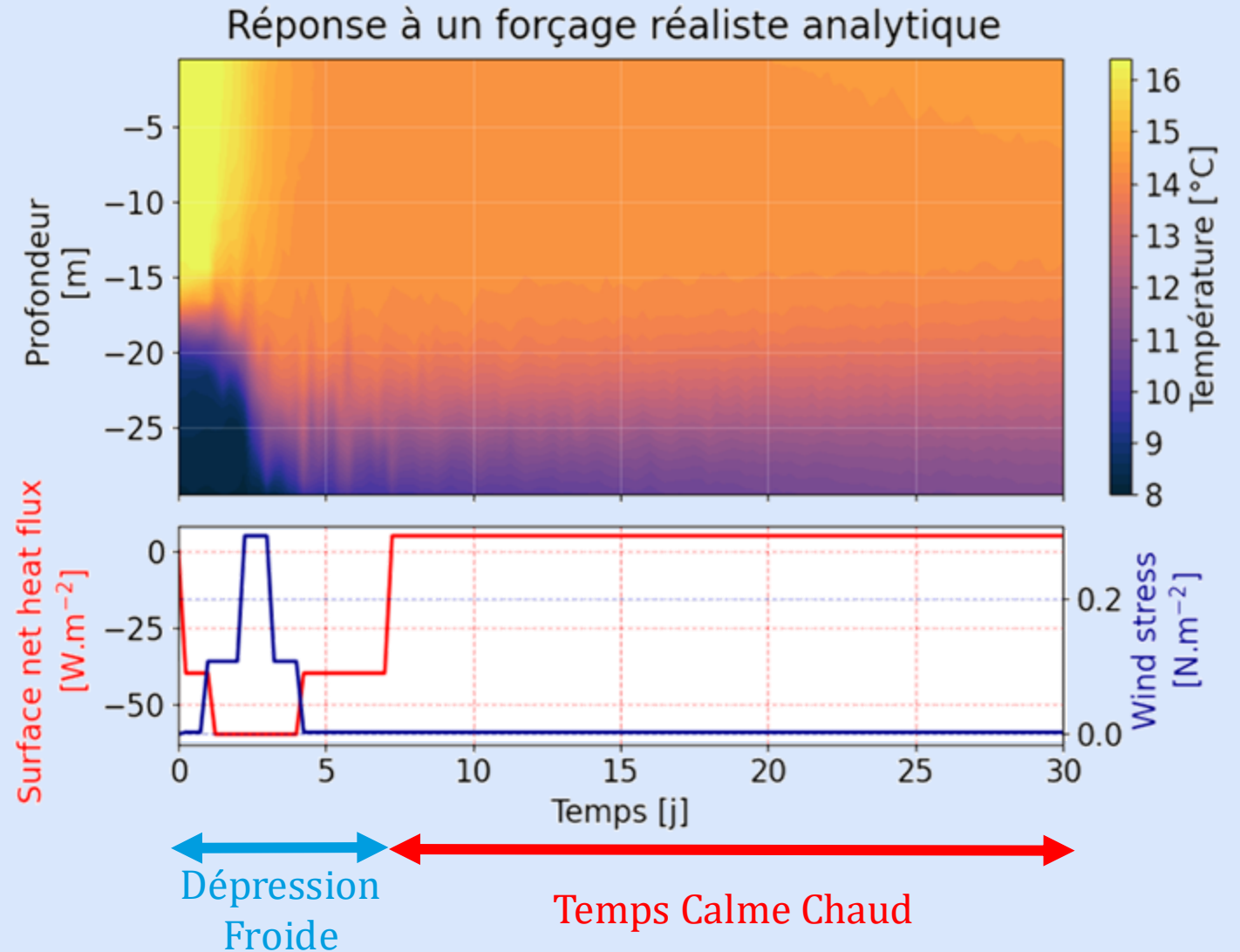
Atmosphère

Lac au repos

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

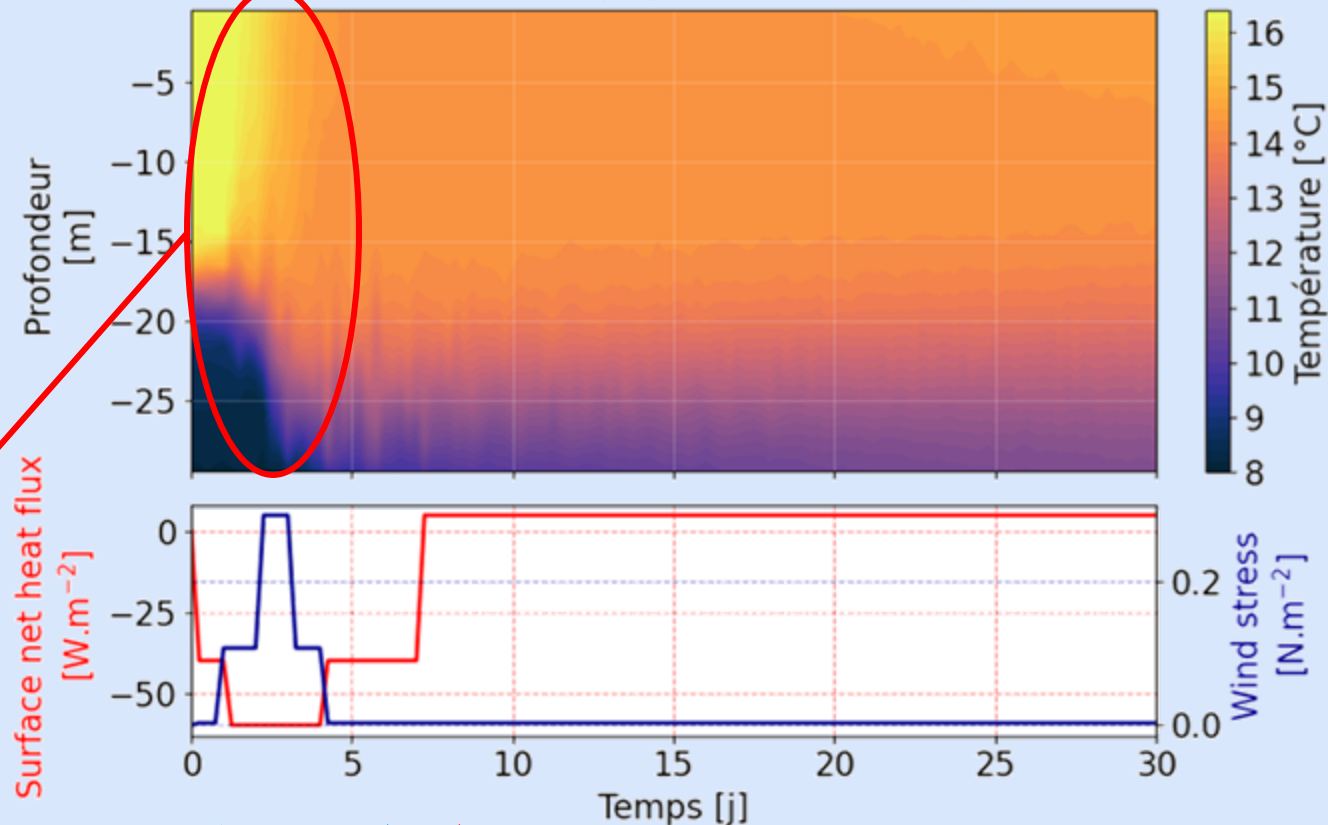
Modèle CROCO – Simulation Réaliste Analytique

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



Modèle CROCO – Simulation Réaliste Analytique

Réponse à un forçage réaliste analytique



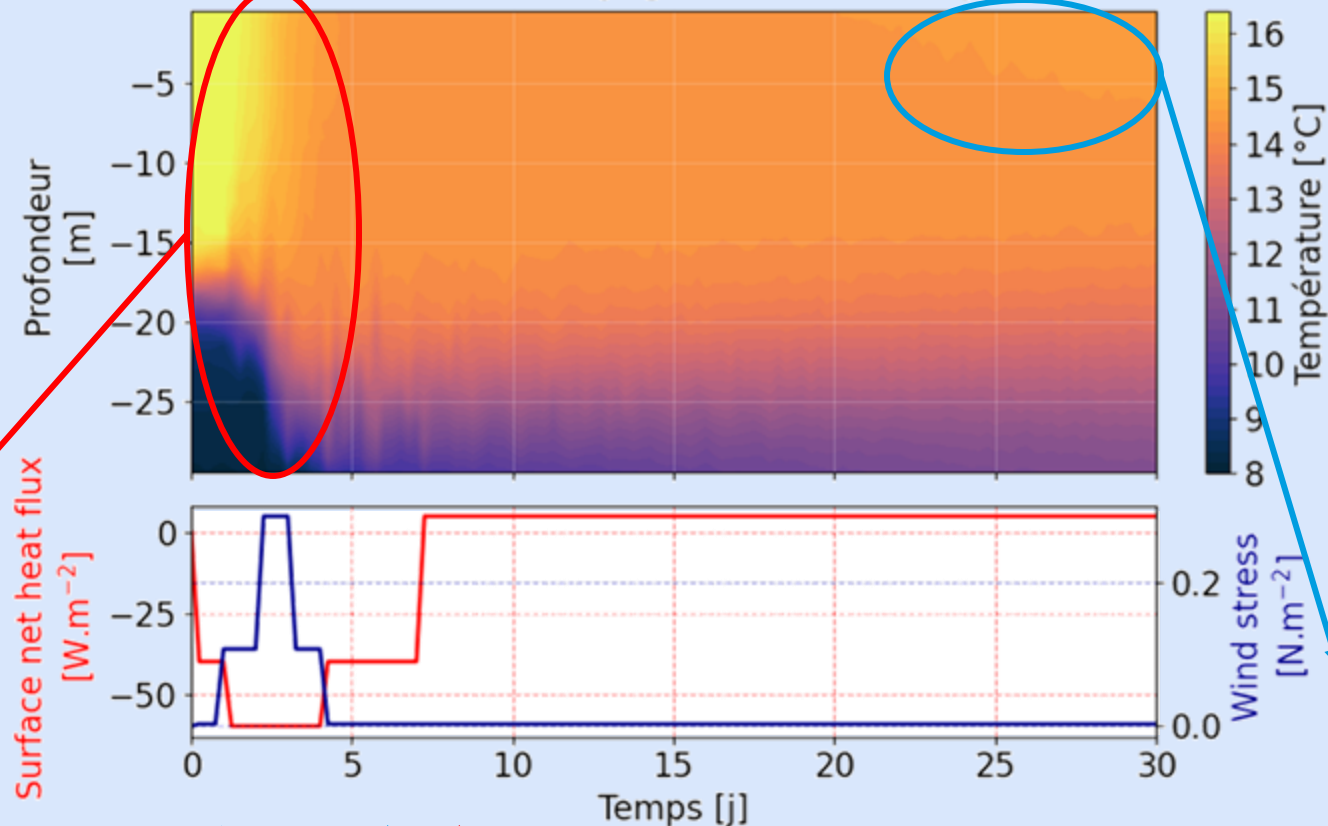
Mélange
rapide de la
colonne d'eau

↔
Dépression
Froide

→ Temps Calme Chaud

Modèle CROCO – Simulation Réaliste Analytique

Réponse à un forçage réaliste analytique



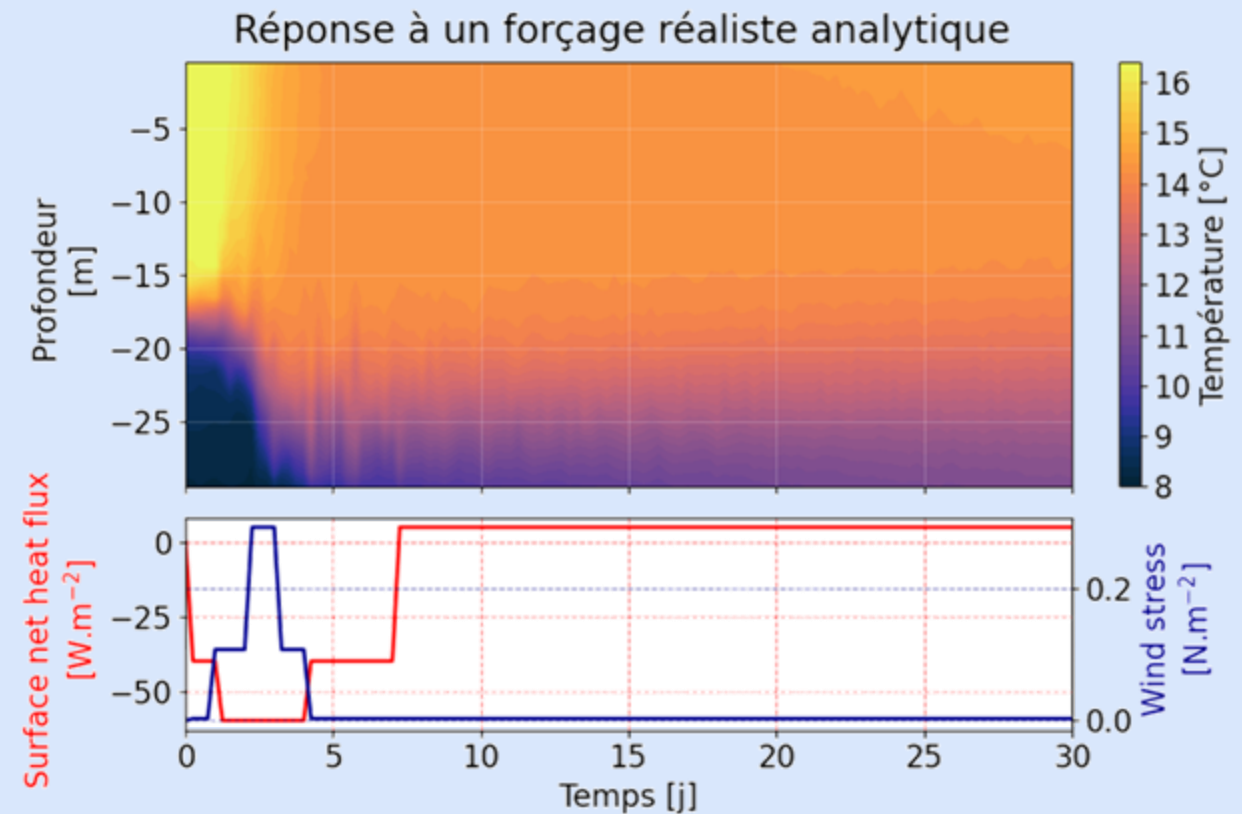
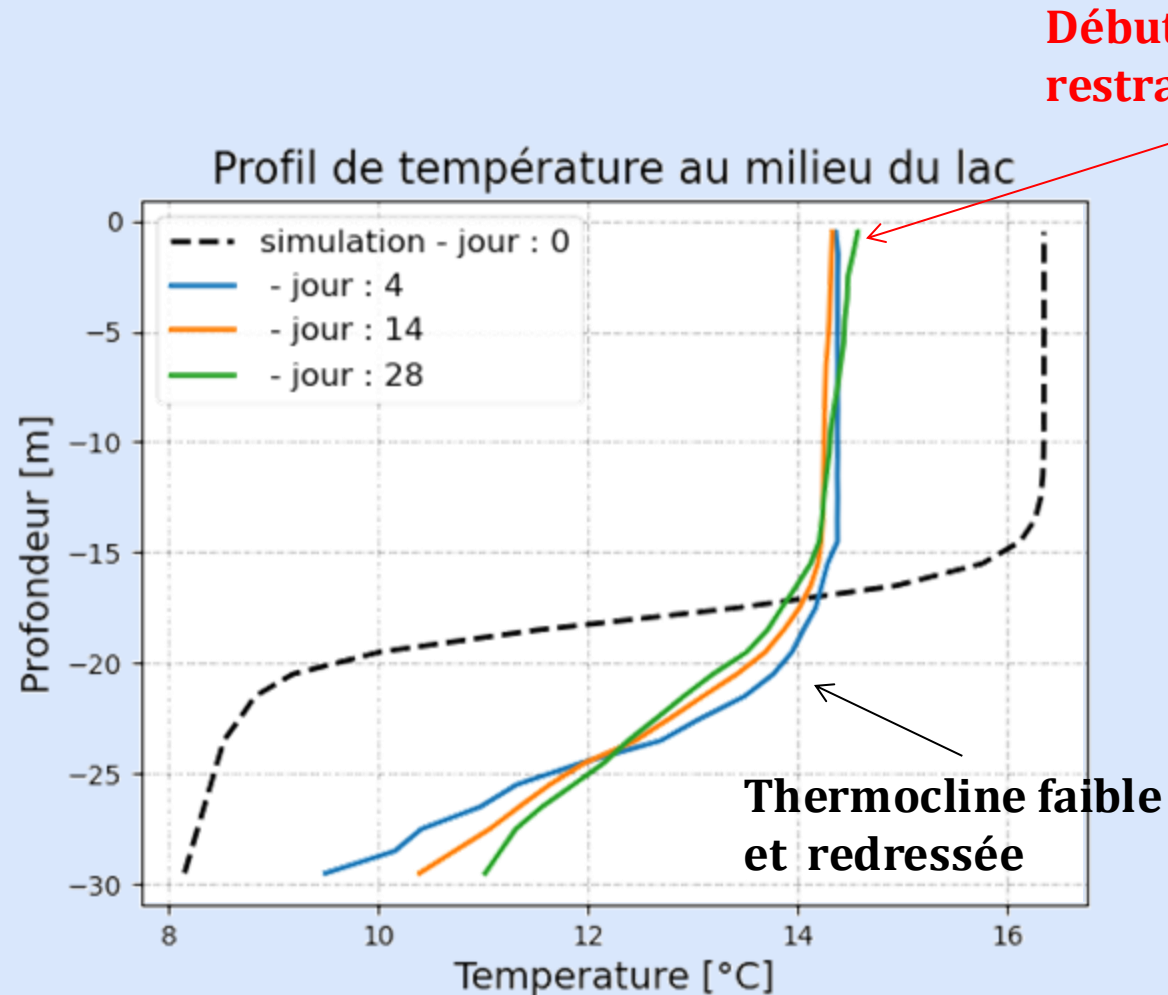
Mélange
rapide de la
colonne d'eau

Léger début de
restratification

←→
Dépression
Froide

→
Temps Calme Chaud

Modèle CROCO – Simulation Réaliste Analytique



Ondes internes

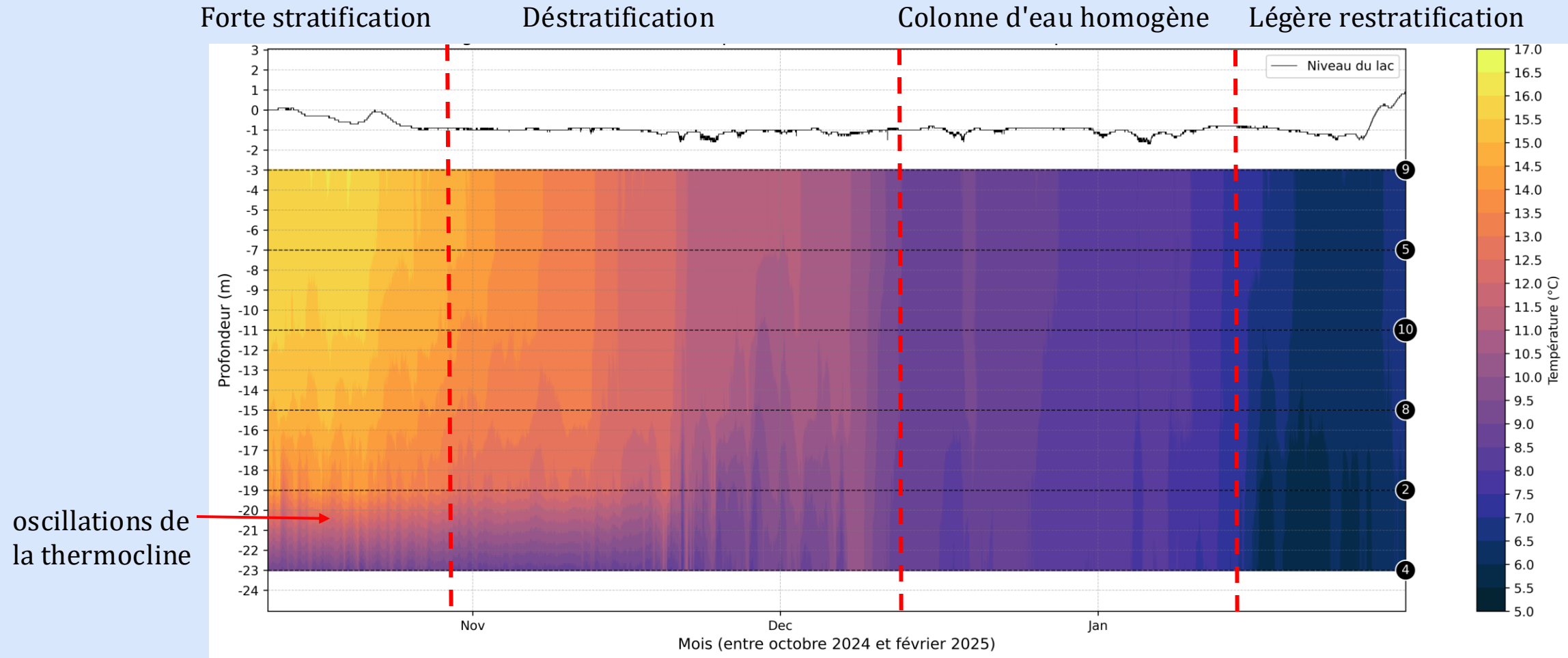
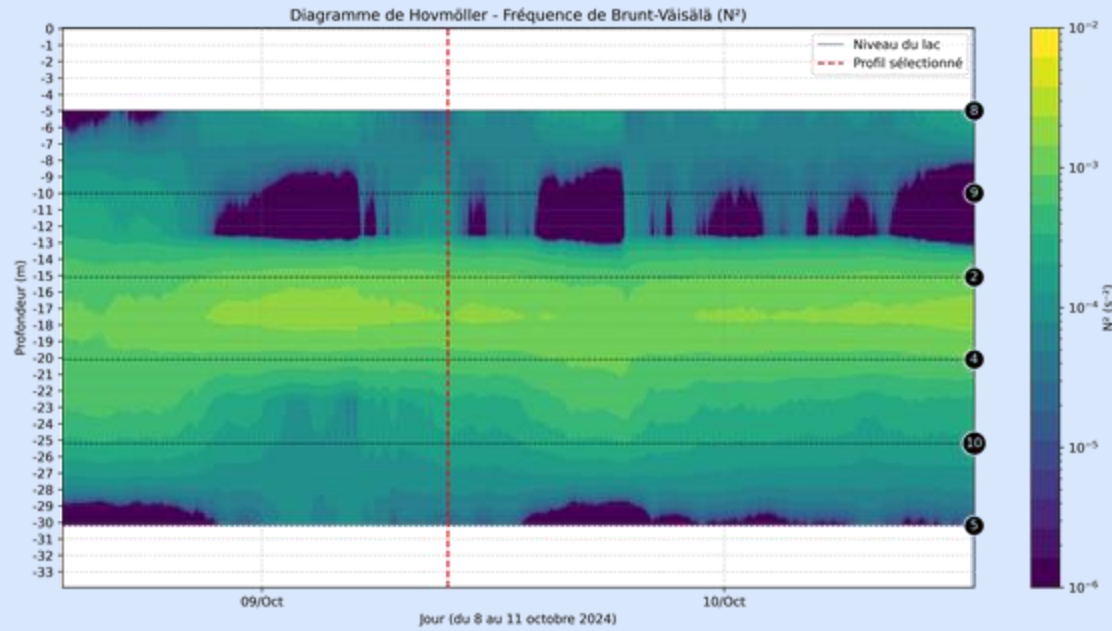
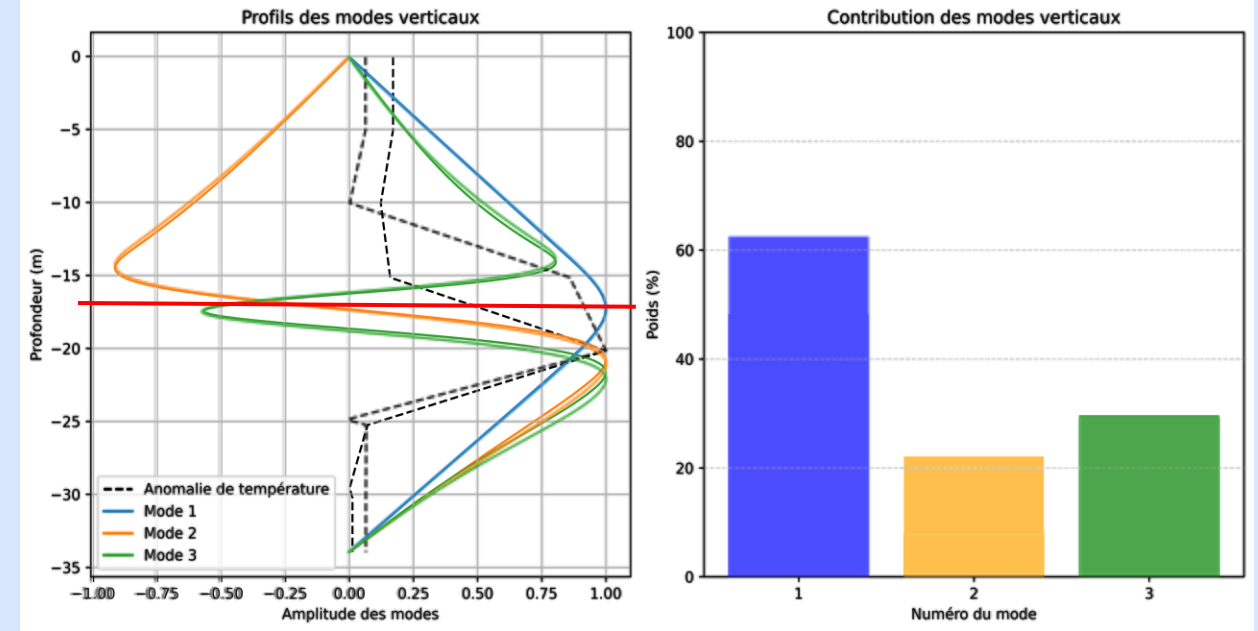


Diagramme de Hovmöller à partir des données du mouillage 2024

Ondes internes – N^2 et modes verticaux



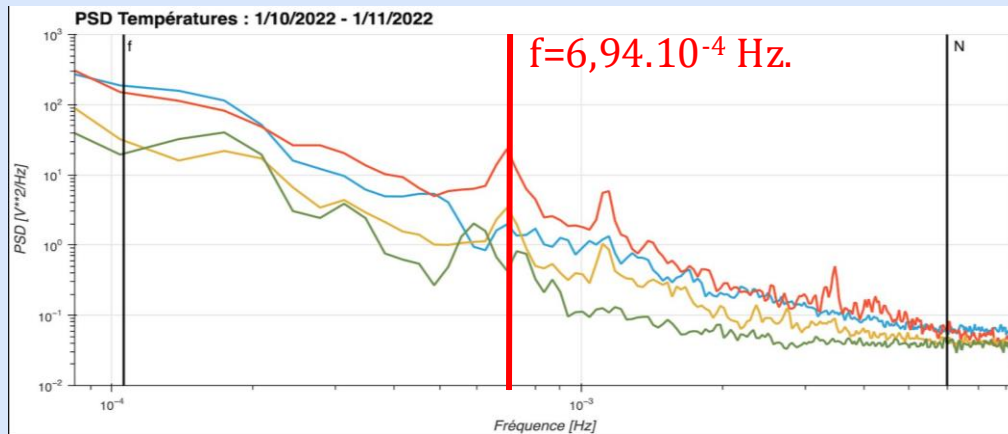
Hovmöller N^2 MASTODON octobre 2024



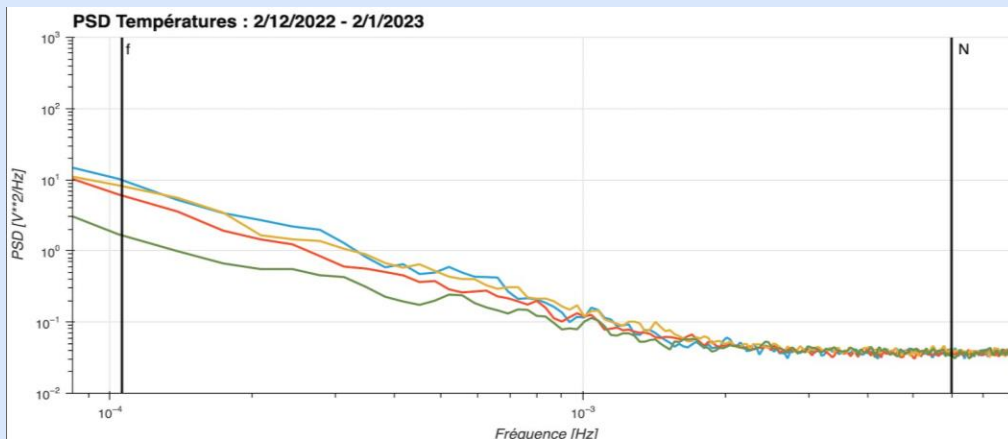
Modes verticaux, anomalie de température d'un profil par rapport à la moyenne hebdomadaire d'octobre 2024 et poids des modes

- ⇒ 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

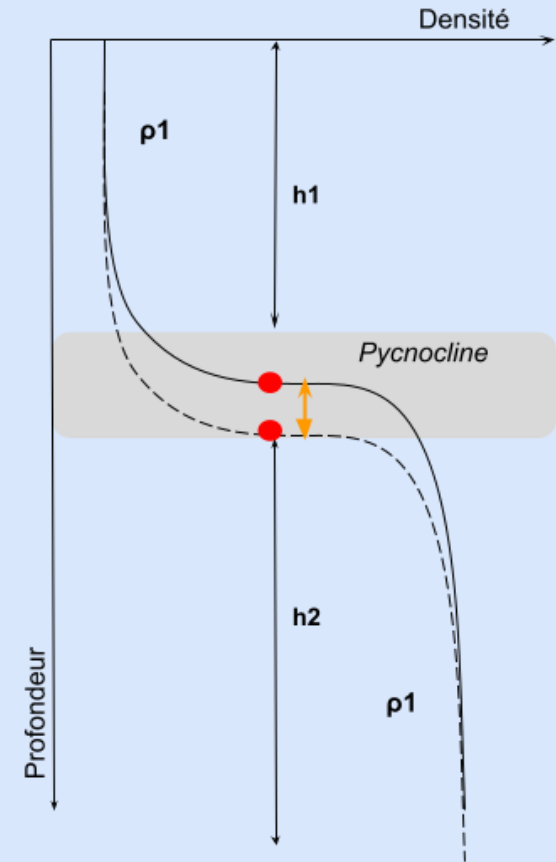
Fréquence des seiches internes théoriques :

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

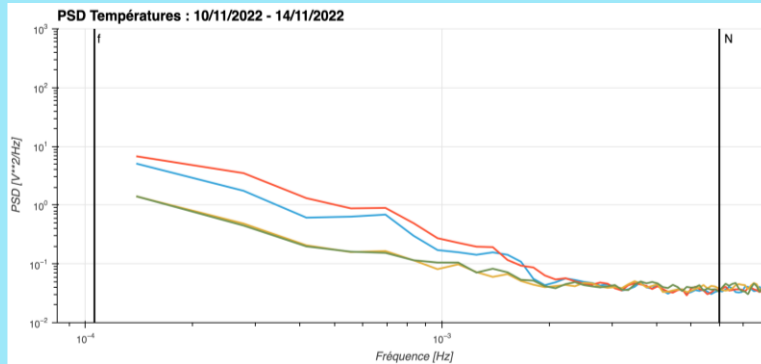
Les ondes internes observées semblent être des **seiches internes**.



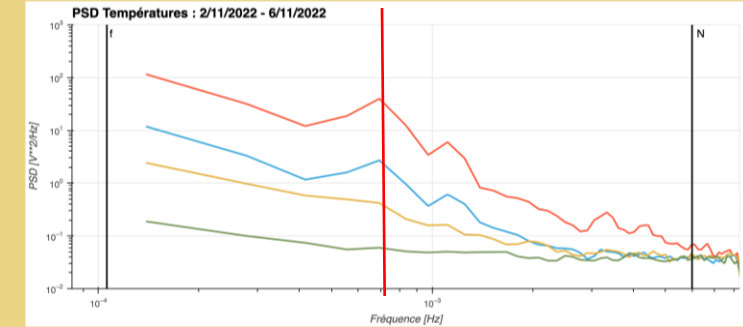
Ondes internes – Génération par le vent

Données in-situ

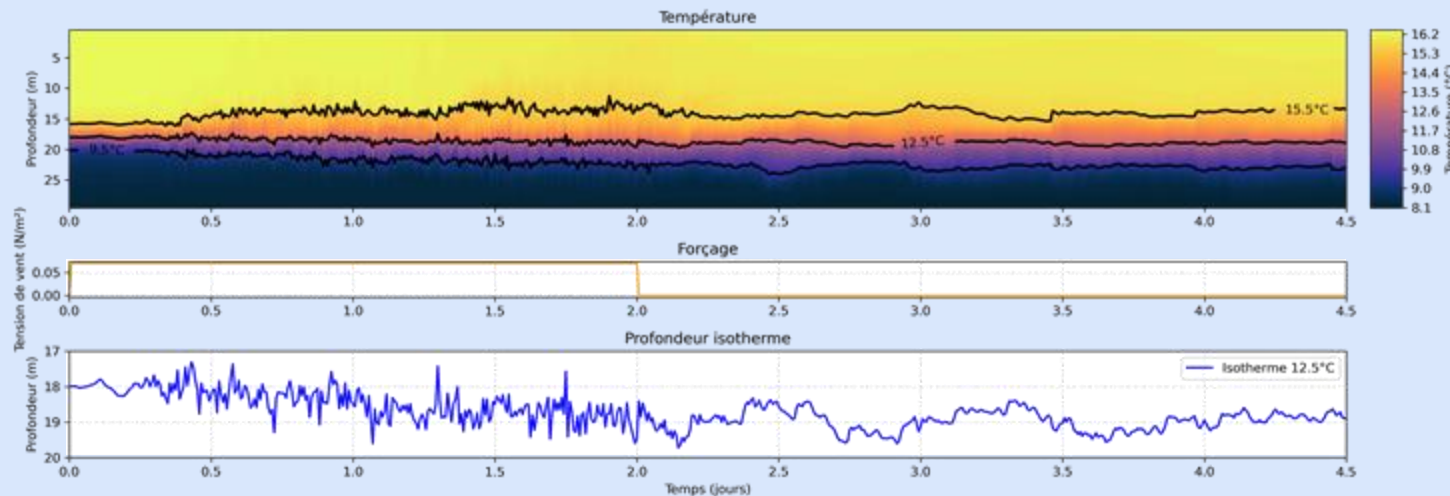
Vents faibles



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

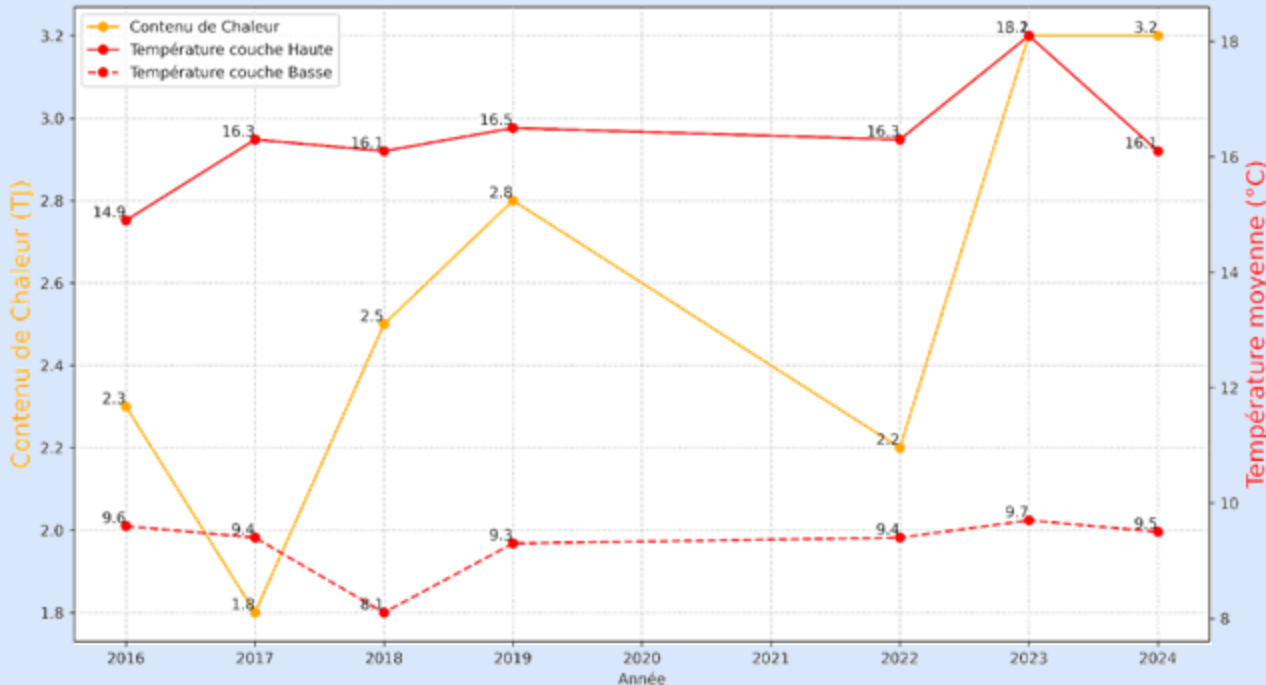
Perspectives

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

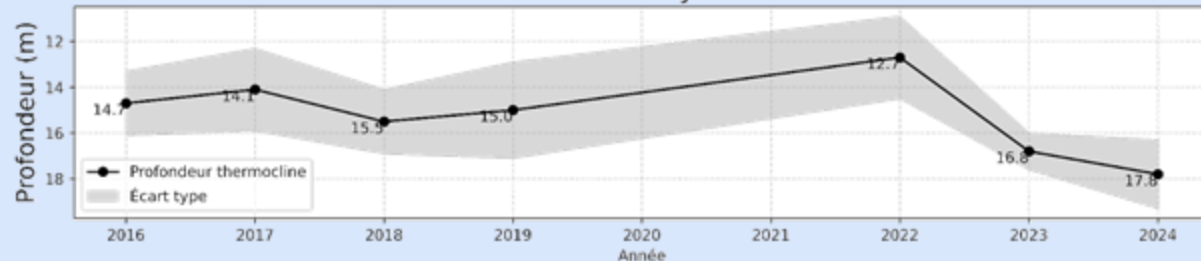
Modèle CROCO

Climatologie de la stratification

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



Évolution de la Profondeur moyenne de la Thermocline



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.

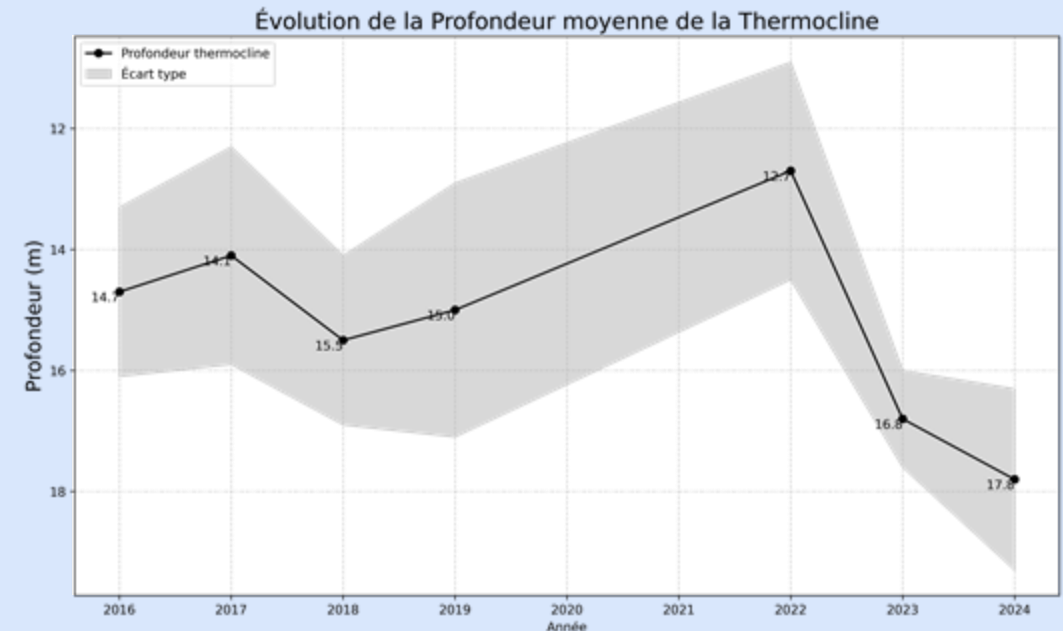
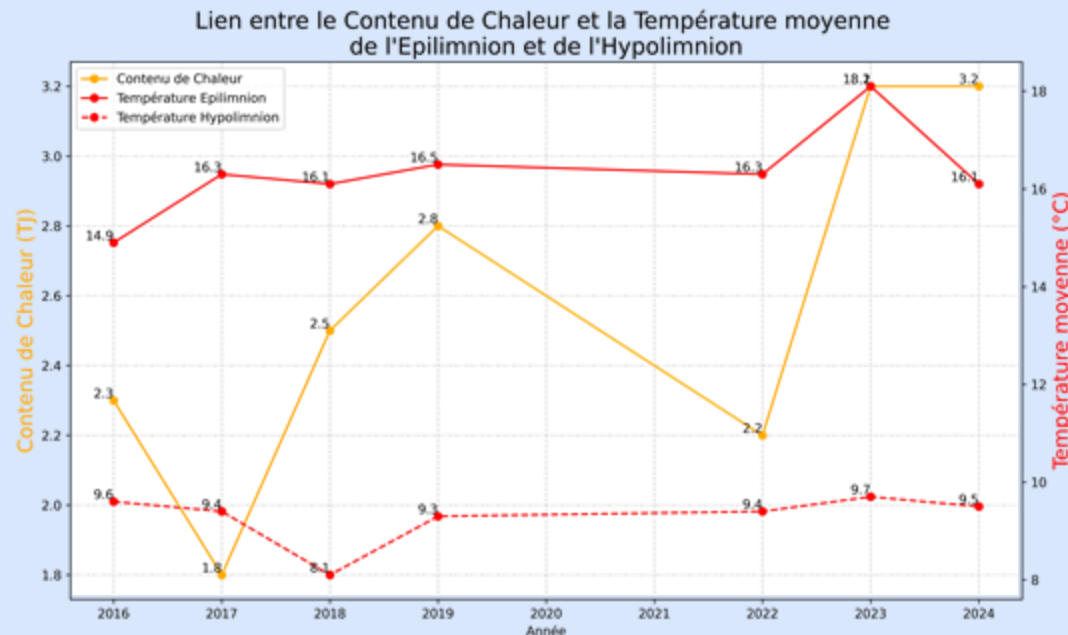
$$h' = \rho_0 C_p \int_{-D}^0 T(z) dz$$

Contenu de chaleur d'une colonne d'eau

Climatologie de la stratification

Coefficients de corrélations

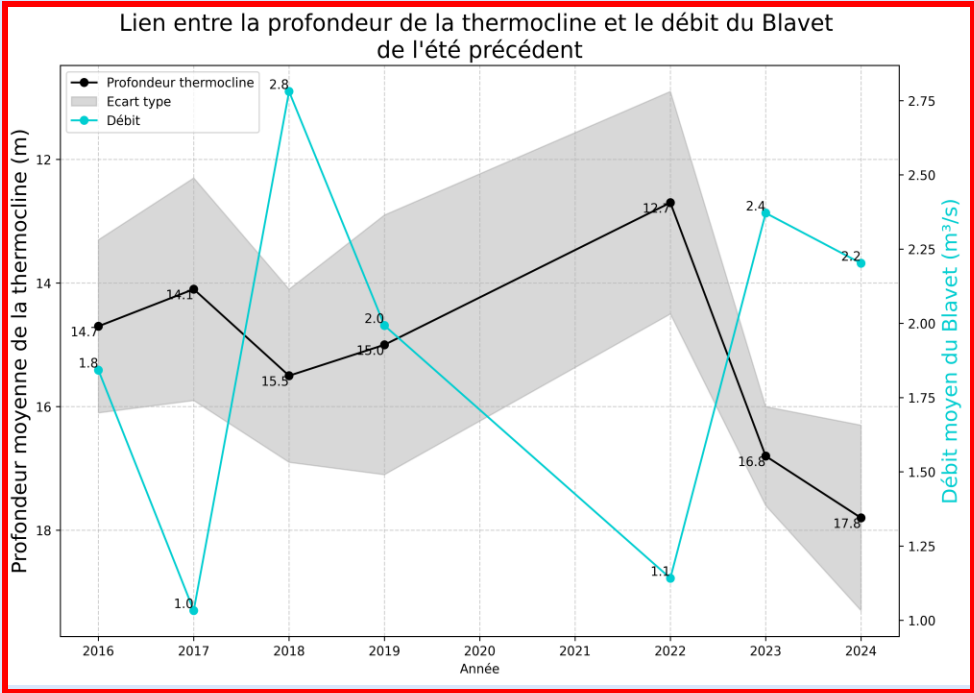
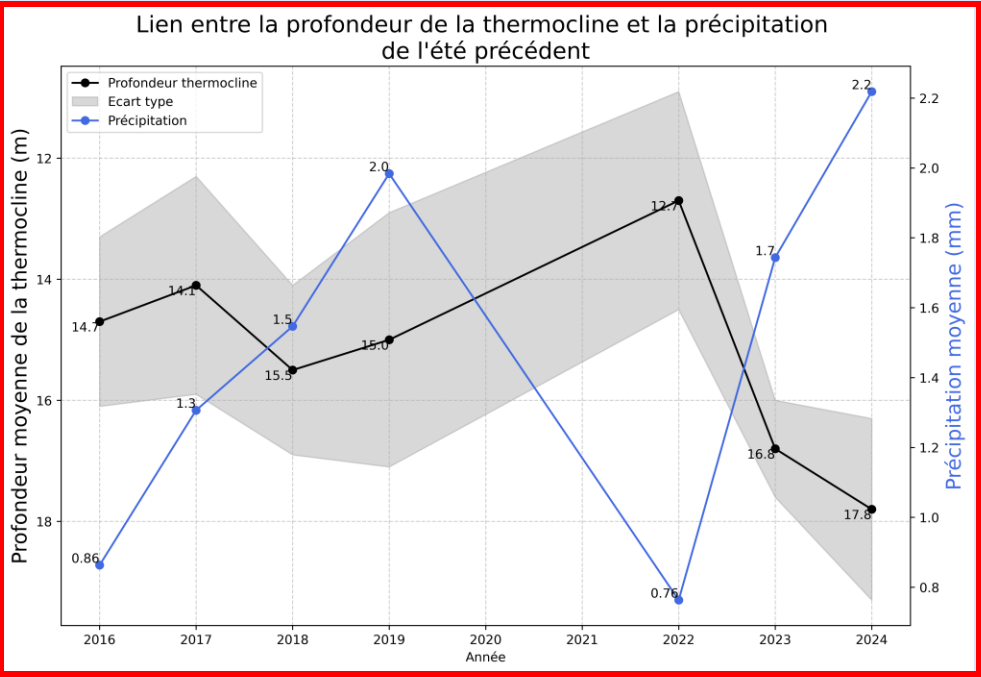
Paramètre	Température (ARPEGE)	Température (station)	Pluie	Débit	Vent total	Vent d'Est	Vent de Nord
R^2 Contenu de chaleur	0.033 %	11.7%	57.5 %	49.6 %	10.5 %	0.121 %	14.9 %
R^2 Profondeur thermocline	9.67 %	39.7 %	67.5 %	52.2 %	0.119 %	11.4 %	28.8 %
R^2 Température Couche Haute	35.9 %	4.72 %	17.0 %	3.9 %	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 \Rightarrow seiches internes dues au vent
- Modèle :
 - \Rightarrow impact fort dû vent pour l'homogénéisation du lac
 - \Rightarrow impact des flux de chaleur sur la restratification en période de vents faibles
- Etude climatologique
 - \Rightarrow impact du vent faible
 - \Rightarrow impact important des précipitations et du débit du Blavet

Discussion

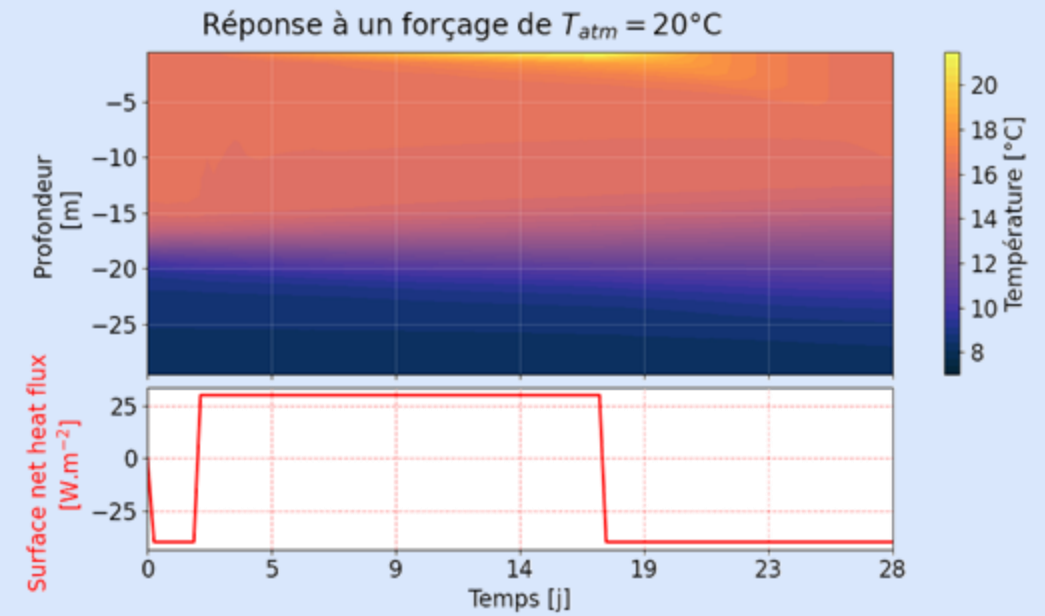
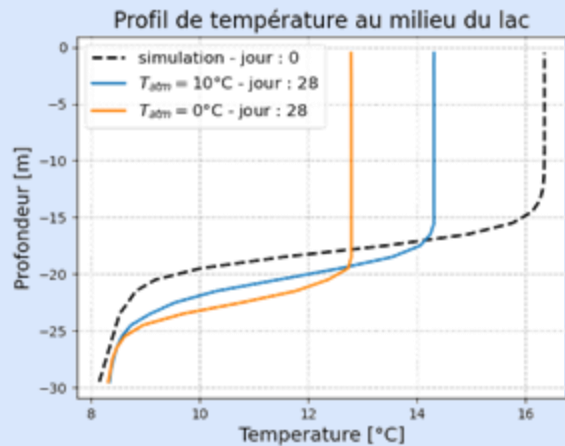
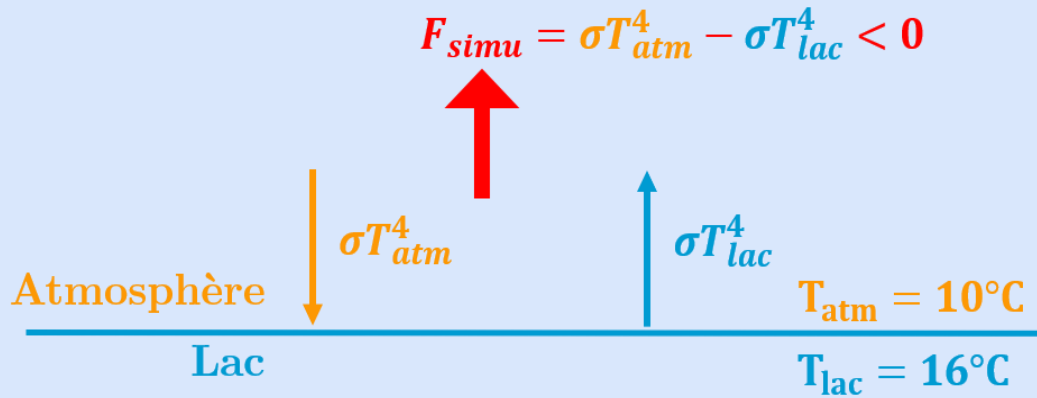
- Etude des données de turbinage pour les ondes internes
- Modélisation réaliste avec le débit du Blavet et les données météorologiques
- Suivi du processus de stratification en été
- Etudier les bras Est/Ouest et Nord/Sud du lac séparément

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. *Limnologia*, 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/node67.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> 41 sur 48

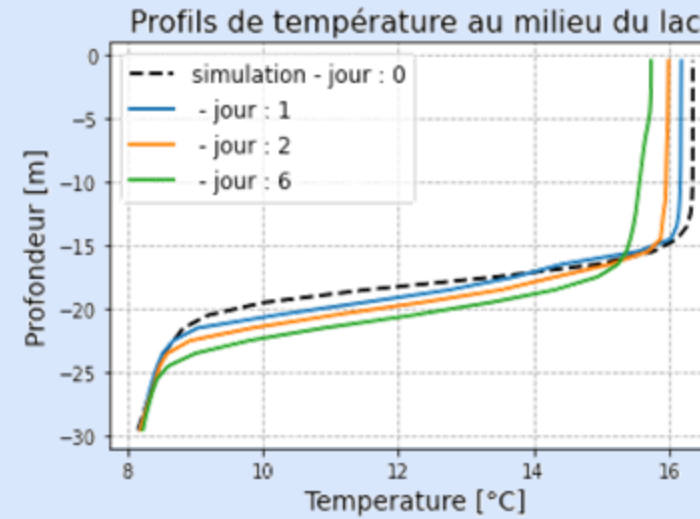
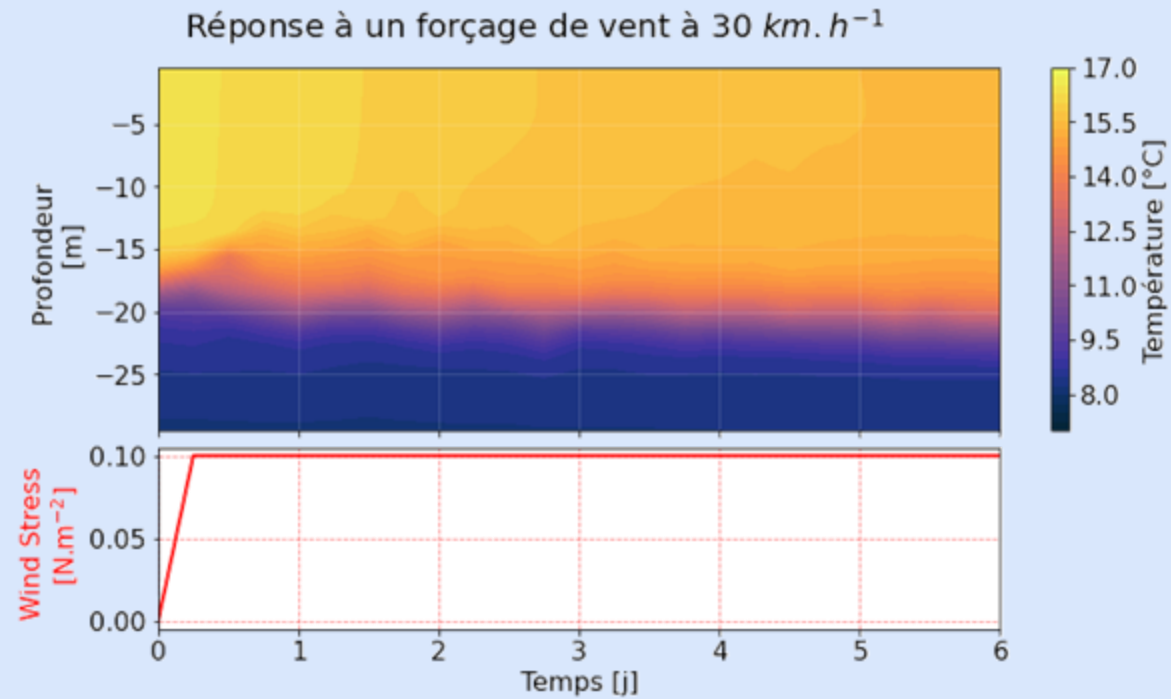
Annexes

Modèle CROCO : Forçages de Flux de Chaleur

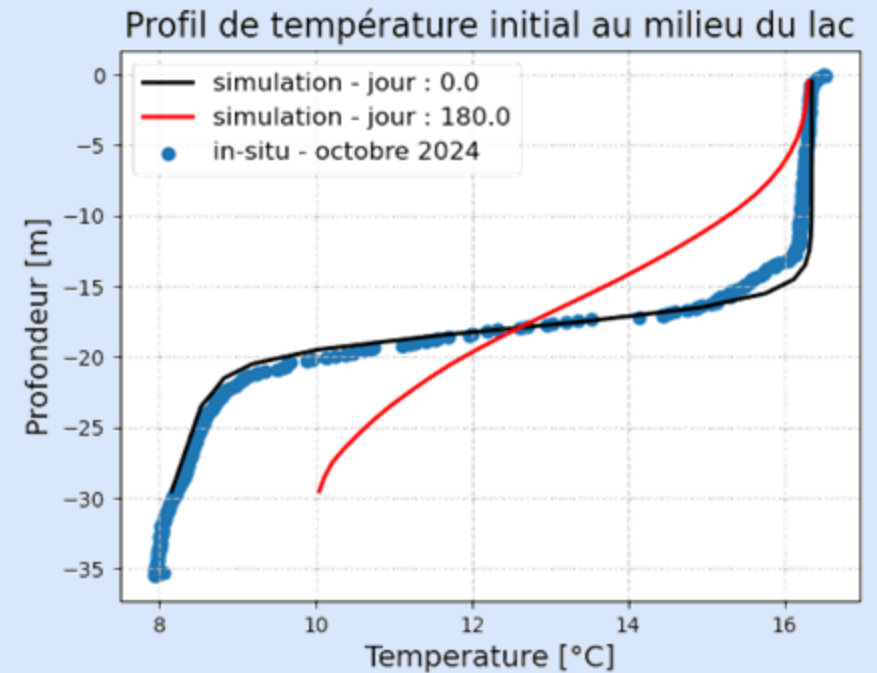
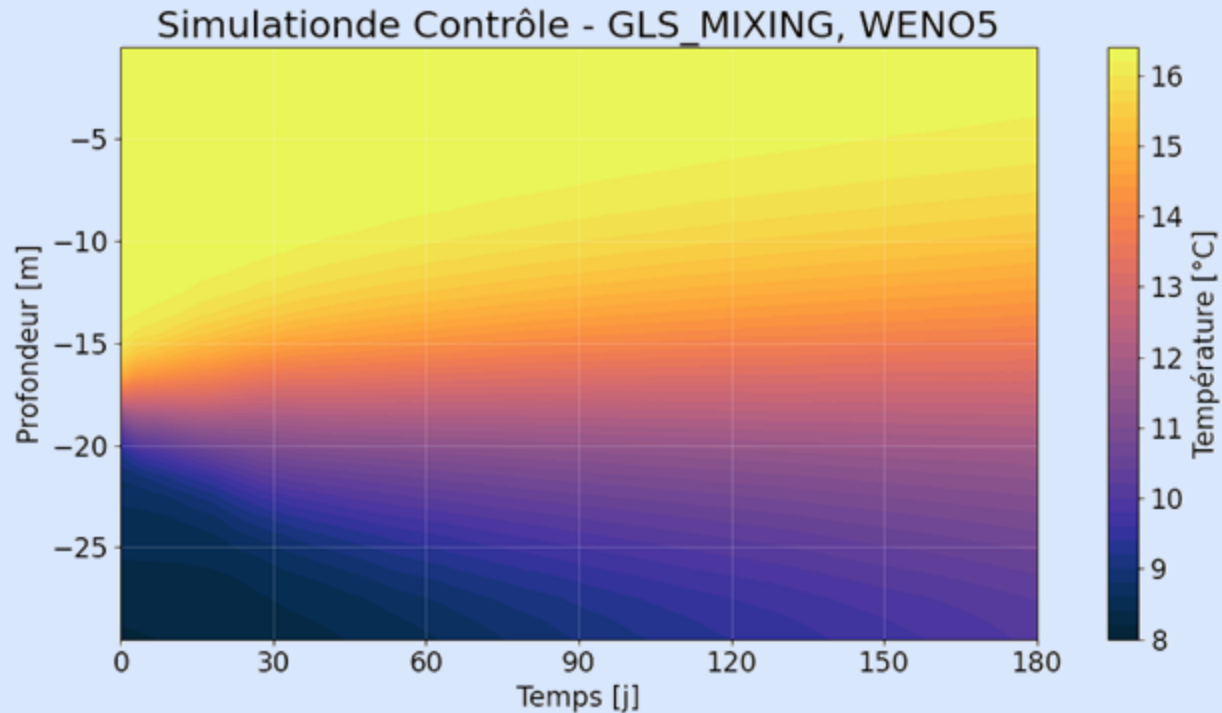


$$F_{simu} = \sigma T_{atm}^4 - \sigma T_{lac}^4$$

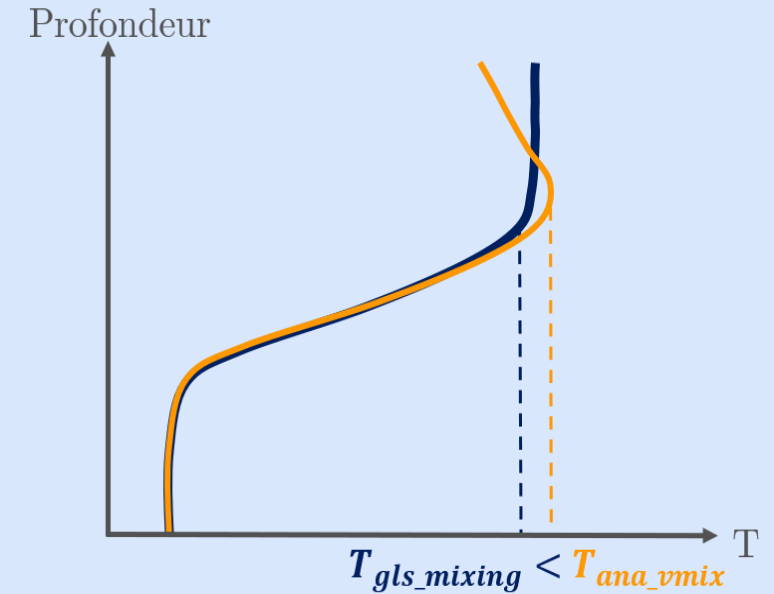
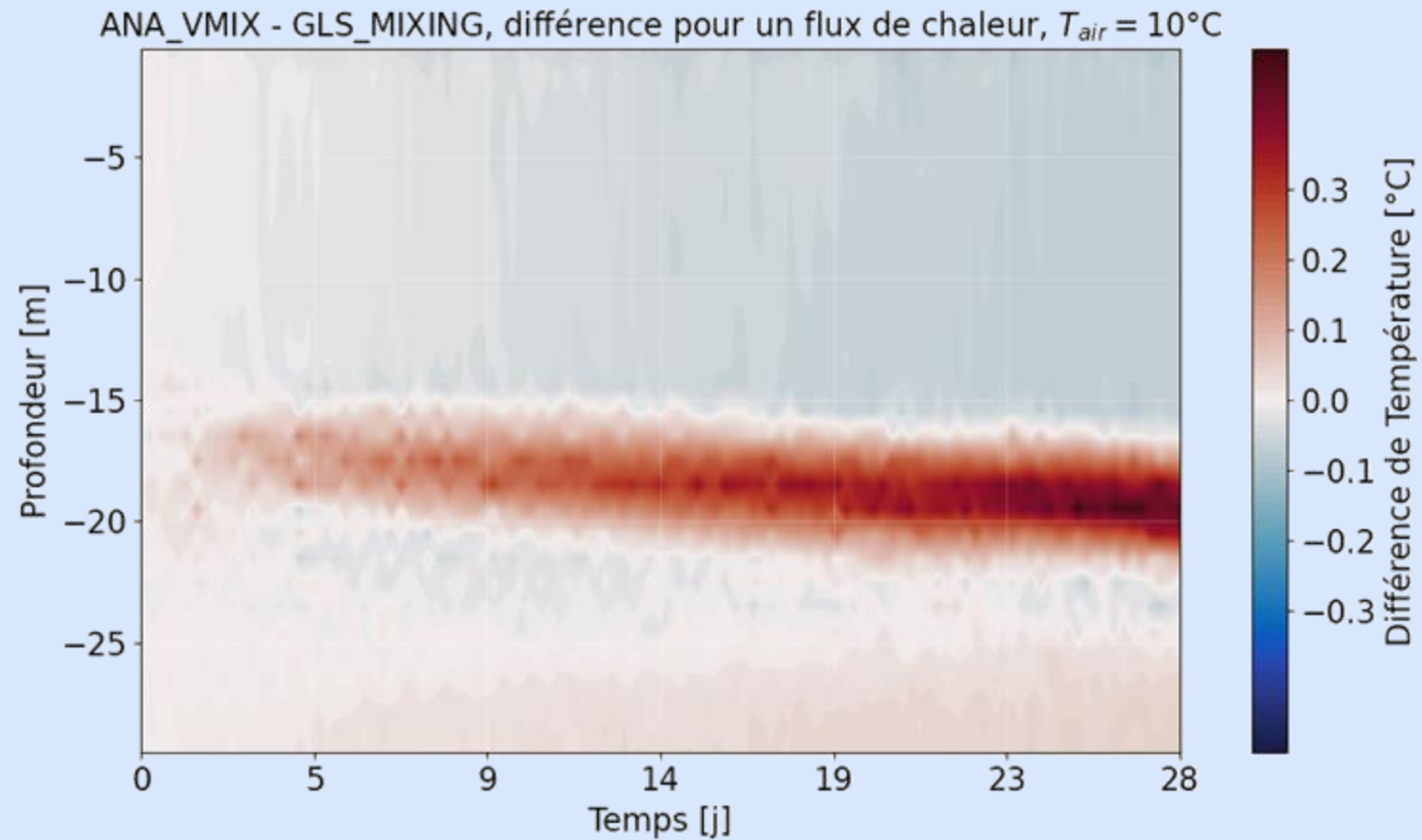
Modèle CROCO : Forçages de vent



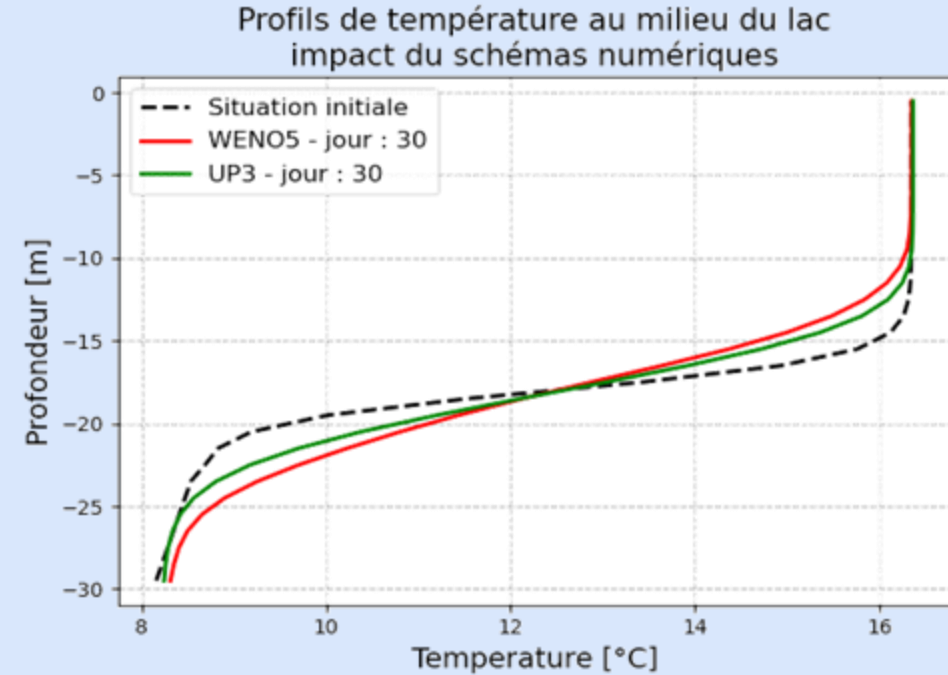
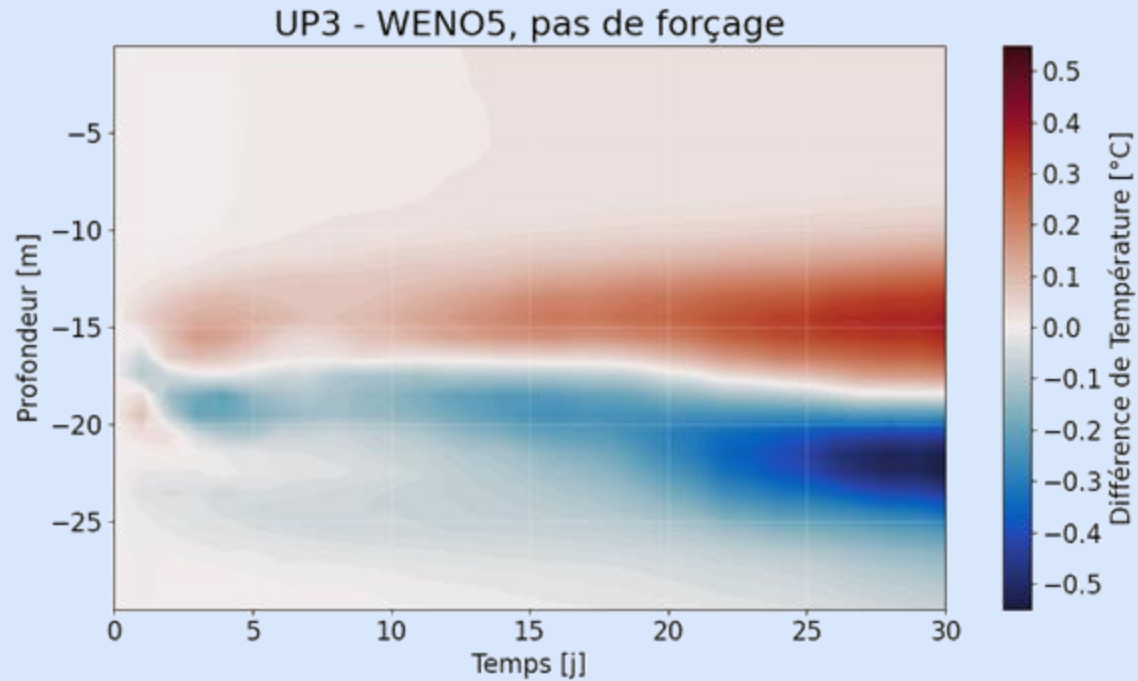
Modèle CROCO : Etude Numérique



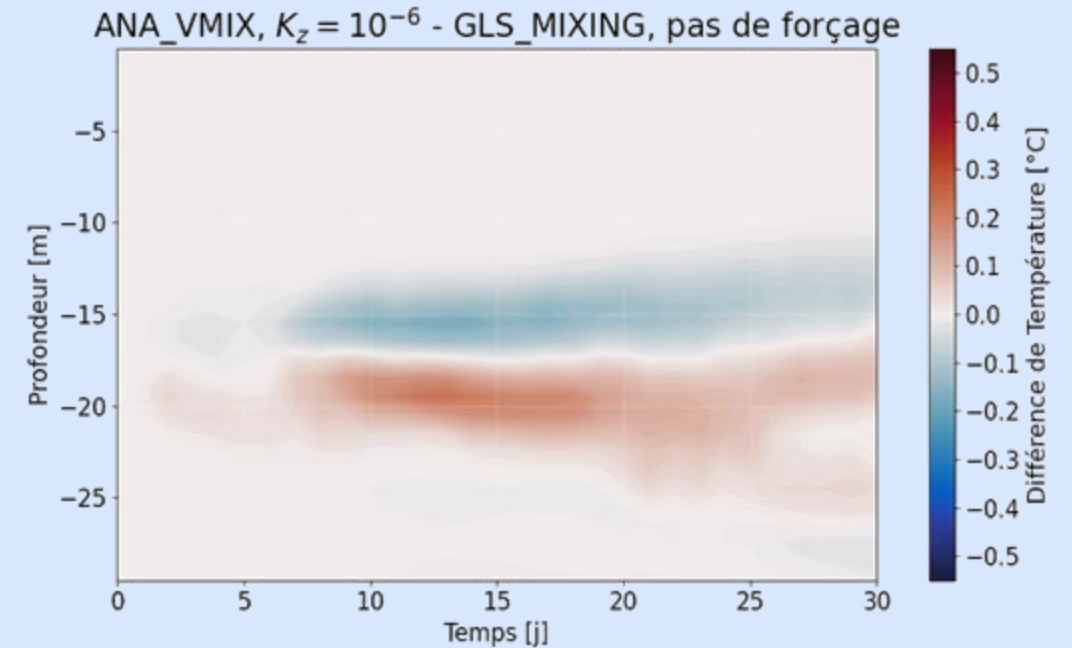
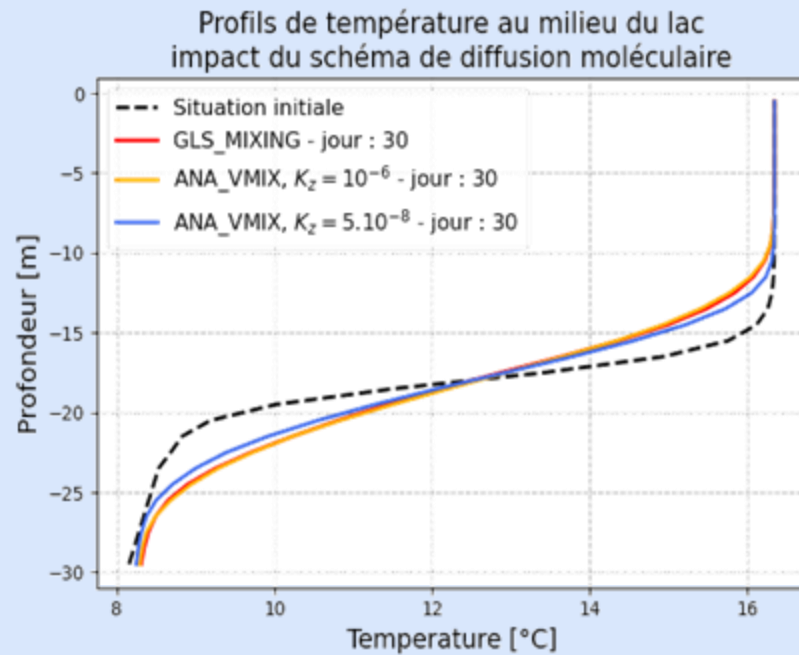
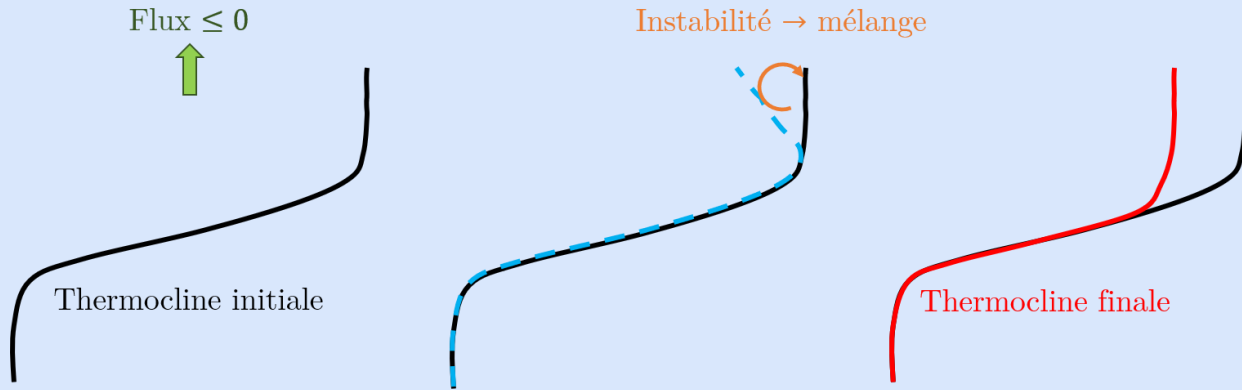
Modèle CROCO : Etude Numérique



Modèle CROCO : Etude Numérique



Modèle CROCO : Etude Numérique



Choix des interpolateurs

