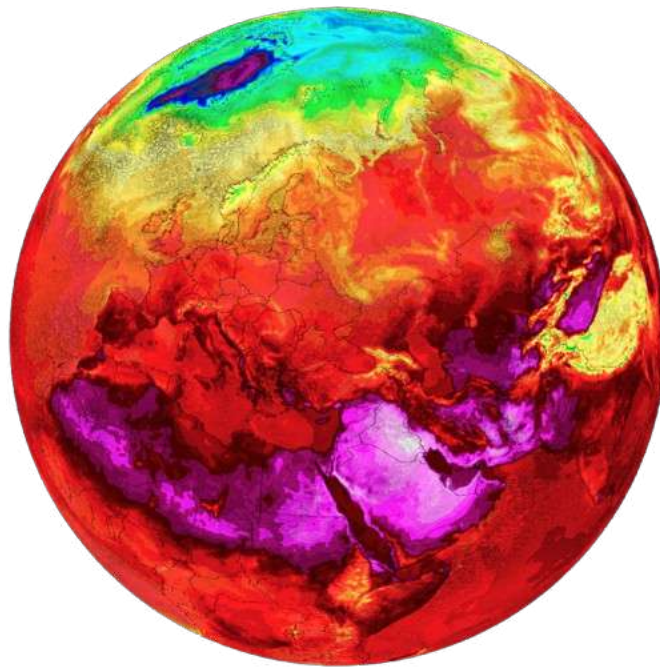

Évaluation d'un modèle de couche de mélange océanique dans la chaîne de prévision du temps globale ARPEGE



Nathan Grand

Polytech Tours — Département Aménagement et Environnement - 5A

Année universitaire 2024–2025

Tuteur.rice professionnel.le : Carole Labadie / Adrien Napoly

Tutrice scolaire : Séraphine Grellier

Résumé

L'objectif de ce stage de fin d'études, réalisé au Centre National de Recherche en Météorologie, est d'améliorer le modèle de prévisions atmosphérique global ARPEGE en optimisant la représentation des interactions océan-atmosphère à l'aide d'un modèle unidimensionnel de couche de mélange océanique (CMO1D), moins coûteux en calcul qu'un modèle tridimensionnel. Après correction d'un bug ayant limité l'appel au modèle, plusieurs tests de sensibilité ont été menés sur des paramètres clés : nombre de niveaux, albédo, turbidité et initialisation des courants. La configuration finale (NEW) inclut un appel corrigé de la CMO1D, une augmentation du nombre de niveaux de 12 à 26, un ajustement de l'albédo diffus, une turbidité plus claire et la prise en compte de la glace de mer. Les comparaisons avec les références (modèle Mercator, radiosondages et analyses IFS) montrent que la configuration NEW améliore significativement la prévision de la température de surface de la mer et la qualité des prévisions atmosphériques qui en résultent, en particulier sur la basse atmosphère. Des perspectives d'amélioration restent ouvertes, notamment via une paramétrisation variable de la turbidité et une évaluation plus approfondie du cyclage des courants lors d'événements extrêmes.

Mots-clés : Modélisation océanique ; Modèle global ARPEGE ; Couche de mélange océanique ; Interactions océan-atmosphère ; Prévision météorologique ; Température de surface de la mer ; Albédo ; Turbidité ; Courants océaniques ; Glace de mer ; Modèle Mercator ; Radiosondages ; Analyses IFS

Abstract

The objective of this internship taking place at the National Center for Meteorology (CNRM) is to improve the global meteorological model ARPEGE by optimizing the representation of ocean-atmosphere interactions using a one-dimensional ocean mixed-layer model (CMO1D), which is less computationally expensive than a three-dimensional ocean model. After fixing a bug that limited the model calls, several sensitivity tests were performed on key parameters : number of vertical levels, albedo, turbidity, and current initialization. The final configuration (NEW) includes a corrected CMO1D call, an increase in the number of vertical levels from 12 to 26, an adjustment of diffuse albedo, a clearer turbidity parameter, and the inclusion of sea ice. Comparisons with reference datasets (Mercator model, radiosonde observations, and IFS analyses) show that the NEW configuration significantly improves sea surface temperature (SST) forecasts and the resulting atmospheric forecasts, particularly in the lower atmosphere. Further improvements are planned, including a variable turbidity parameterization and a more thorough assessment of current cycling during extreme events.

Keywords : Oceanic modelling ; ARPEGE global model ; Ocean mixed-layer model ; Ocean-atmosphere interactions ; Weather forecasting ; Sea surface temperature ; Albedo ; Turbidity ; Ocean currents ; Sea ice ; Mercator model ; Radiosondes ; IFS analyses

Table des matières

Acronymes et abréviations	6
Introduction	7
1 Contexte et objectifs du stage	9
1.1 Description du modèle de CMO1D	9
1.1.1 Équations structurantes	9
1.1.2 Configuration opérationnelle	10
1.2 Bug : sous appel du modèle CMO1D	12
1.3 Objectifs	14
2 Tests de sensibilité	15
2.1 Nombre de niveaux	15
2.2 Albédo	16
2.3 Turbidité	17
2.4 Courants horizontaux	21
3 Focus sur deux aspects de la mise en œuvre de la CMO1D	25
3.1 Interactions océan-banquise	25
3.2 Points libres	27
4 Évaluation de la configuration retenue	30
4.1 Comparaison à Mercator	30
4.2 Comparaison aux bouées	33
4.3 Comparaison aux données atmosphériques : IFS et radiosondages	34
5 Étude de cas - le cyclone Chido	36
5.1 Conclusion sur l'étude	38
5.2 Retour sur expérience	40
A Tableau de discrétisation de la colonne d'eau en niveaux	43
B Tableau de correspondance des domaines et leurs coordonnées	44
C Scores aux analyses IFS et radiosondages : CYCL VS REFcour	45
D Différentes prévisions de SST sur le domaine EUROPE	46
E Scores aux analyses IFS et radiosondages : NEW vs DBLE	47

Table des figures

1.1	Version OPER (a) et version DBLE (b), (Réalisation : Carole Labadie, CNRM)	11
1.2	Évolutions moyennes de la température, aux 1er (50cm) et 12ème (18.5m) niveaux, de 5 prévisions consécutives de 102 h sur le domaine atlantique nord, prévues par : Mercator (noir), la chaîne DBLE (bleu) et la REF (tiretés rouges).	14
2.1	Évolutions moyennes de la température, aux 1er (50 cm), 12ème (18.5 m) et 26ème (186.1 m) niveaux, de 7 prévisions consécutives de 102 h sur le domaine atlantique nord, prévues par : Mercator (noir), la REF (bleu) et l'expérience avec 26 niveaux (tiretés rouges).	15
2.2	Évolutions moyennes de la température au 1er (50 cm) niveau, de 6 prévisions consécutives de 102 h sur le domaine Tropiques Pacifique, prévues par : Mercator (noir), la REFalb (bleu), l'expérience $\alpha_{diff} = \alpha_{Mercator}$ (albmER, tiretés rouges) et l'expérience $\alpha_{diff} = \alpha_{Mercator}$ et $\alpha_{dir} : Seferian(2014)$ (SEF, tiretés verts).	17
2.3	Évolution du rayonnement solaire $I(z)/I_0$ présent en fonction de la profondeur z pour les différentes paramétrisations de turbidité évaluées.	19
2.4	Évolutions moyennes de la température aux 1er (50 cm) 12ème (18.5 m) et 26ème (186.1 m) niveaux, de 8 prévisions consécutives de 102 h sur les domaines hémisphère nord ([20,60], a) et hémisphère sud ([-20,-60], b) prévues par : Mercator (noir), REFTurb (paramètres "Eau claire", courbe bleue) et l'expérience avec les nouvelles valeurs de turbidité (tiretés rouges et tiretés verts).	19
2.5	Biais de température de la version DBLE calculés par rapport aux radiosondages pour le domaine hémisphère nord ([20,90]) sur le mois de juin 2025. En ordonnée les niveaux pression de l'atmosphère, en abscisse les échéances de prévision en jours.	20
2.6	Concentration en chlorophylle d'un mois de janvier moyen en mg/m^3 , sur le globe et utilisée dans la prévision saisonnière à Météo France via le modèle ARPEGE-NEMO. Source : ESA-CCI	21
2.7	Spirale d'Ekman (Source : www.offshoreengineering.com)	22

2.8	Évolutions de 6 prévisions de SST (a) et des composantes u (b) et v (c) des courants à 102 h au 1er niveau (50 cm), en un point (latitude :0.6; longitude : -27.7), prévues par : Mercator (noir), la REFcour (courbe bleue) et l'expérience avec le cyclage des courants à chaque nouvelle prévision CYCL (tiretés rouges).	23
2.9	Différence moyenne sur 6 jours de la SST entre les expériences CYCL et REFcour à l'échéance 96 h. 19 - 24/10/2024	24
2.10	Évolutions moyennes de la température aux 1er (50 cm) et 12ème (18.5 m) niveaux, de 6 prévisions consécutives de 102 h sur le domaine pacifique sud-ouest prévues par : Mercator (noir), la référence REFcour (bleu) et l'expérience avec les courants cyclés CYCL (en rouge).	24
3.1	Évolutions moyennes de la température aux 1er (50 cm) et 12ème (18.5 m) niveaux, de 3 prévisions consécutives de 102 h sur le domaine sud-polaire, prévues par : Mercator (noir), la REFice (courbe bleue) et l'expérience ICE modélisant l'effet de la présence de banquise (tiretés rouges), entre le 19 et le 22/10/2024.	26
3.2	Différence de SST entre l'expérience modélisant l'effet de la banquise dans le couplage océan-atmosphère (ICE) et la référence REFice qui n'en tient pas compte, sur le pôle sud pour le cycle de prévision du 19/10/2024 à l'échéance 12 h.	27
3.3	Exemple de présence de points libres dans les fjords norvégiens présentant des valeurs de SST plus faibles que celles des points non-libres environnants. Prévision du 10/06/2025, réseau 0 h à l'échéance 0 h	28
3.4	Biais entre les valeurs de SST d'un point libre et d'un point non-libre à proximité pour quatre localisations : Bangladesh, Venezuela, Norvège, Pôle Sud.	28
4.1	Évolutions moyennes de la température aux 1er (50 cm) et 12ème (18.5 m) niveaux, de prévisions de 102 h entre le 1er et le 28/06/2025 (à gauche) et entre le 19/10 et le 03/11/2024 (à droite) sur les domaines Hémisphère Nord, Tropiques-Pacifique et Hémisphère Sud : Mercator (noir), la DBLE (tiretés rouges) et l'expérience avec la configuration retenue, NEW (courbe bleue).	32
4.2	Biais en traits pleins et écarts-types en traits pointillés entre les expériences (DBLE en noir et NEW en bleu) et les mesures des bouées sur la période 01 - 27/06/2025 pour les domaines NORD20 (en haut), TROPIQUES (au milieu) et SUD20 (en bas). L'axe vertical de droite indique la quantité de bouées retenues pour évaluer la CMO1D, représentée par les barres verticales jaunes, à chaque réseau.	33

4.3	Différence relative de REQM (racine de l'erreur quadratique moyenne) entre la nouvelle configuration NEW et l'expérience DBLE; calculée par rapport aux radiosondages (à gauche - a,c,e) et aux analyses IFS (à droite - b,d,f) pour le domaine Nord20 (a,b), le domaine Tropiques (c,d) et le domaine Sud20 (e,f) sur le mois de juin 2025. En ordonnée les niveaux de pression atmosphérique, en abscisse les échéances de prévision en jours. . .	35
5.1	Différences de SST entre les prévisions de la NEW et celles de la DBLE à l'échéance 96 h pour la prévision du 12/12/2024.	37
5.2	Évolution de la température au 12ème (18.5 m) niveau, de 5 jours (du 10 au 14/12/2024) de prévisions consécutives de 102 h sur le point de coordonnées (Lat : -10; Lon : 53) : Mercator (noir), la DBLE (bleu) et la NEW (rouge)	37
C.1	Différence relative de REQM (racine de l'erreur quadratique moyenne) entre l'expérience avec les courants cyclés CYCL et de l'expérience avec les courants non cyclés REFcour; calculée par rapport aux radiosondages (à gauche) et aux analyses IFS (à droite) pour le domaine Nord20 (haut), le domaine Tropiques (milieu) et le domaine Sud20 (bas) sur le mois de juin 2025. En ordonnée les niveaux de pression atmosphérique, en abscisse les échéances de prévision en jours.	45
D.1	Évolutions moyennes de la température aux 1er (50cm) et 12ème (18.5m) niveaux, de prévisions de 102h entre le 1er et le 28/06/2025 (à gauche) et entre le 19/10 et le 03/11/2024 (à droite) : Mercator (noir), la DBLE (rouge) et l'expérience avec la configuration retenue, NEW (bleu) sur le domaine EUROPE	46
E.1	Différence relative de REQM (racine de l'erreur quadratique moyenne) entre l'expérience NEW et la DBLE; calculée par rapport aux radiosondages (à gauche) et aux analyses IFS (à droite) pour le domaine Nord20 (haut), le domaine Tropiques (milieu) et le domaine Sud20 (bas) sur les mois d'octobre et novembre 2024 (25 jours). En ordonnée les niveaux de pression atmosphérique, en abscisse les échéances de prévision en jours. . .	47
F.1	Vent méridien (à gauche) et vent zonal (à droite) de surface au passage du cyclone Chido, dans la prévision ARPEGE du réseau 0h du 12/12/2024, au term 96h.	48

Liste des tableaux

2.1	Valeurs des coefficients de paramétrisation de la turbidité	18
-----	---	----

Acronymes et abréviations

ARPEGE : Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle

CEPMMT : Centre Européen de Prévisions météorologiques à Moyen Terme

CMO : Couche de Mélange Océanique

CMO1D : Modèle de Couche de Mélange Océanique unidimensionnel

CNRM : Centre National de Recherche Météorologique

DBLE : Version test, appelée "double" du modèle de prévision ARPEGE

IFS : Integrated Forecasting System. Modèle de prévision atmosphérique du CEPMMT

MOI : Mercator Ocean International

OPER : Version opérationnelle du modèle de prévision ARPEGE

SST : Sea Surface Temperature

Introduction

Le Centre National de Recherche Météorologique (CNRM) est une unité de recherche mixte, dépendante de Météo-France et en lien étroit avec le Centre National de la Recherche Scientifique. Il s'agit d'un laboratoire dont le but est de développer des outils et d'élargir la connaissance dans les domaines de la météorologie et de la climatologie. Ce centre est constitué de 6 groupes de recherche, eux-mêmes subdivisés en plusieurs équipes. Ce stage s'effectue dans le groupe nommé « Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision » et plus particulièrement au sein des équipes « Prévisibilité » et « Processus ». Je suis sous la tutelle de Carole Labadie, spécialiste des prévisions d'ensembles et d'Adrien Napoly, spécialiste des phénomènes de surface. Mon travail s'inscrit dans la continuité d'un projet initié il y a plusieurs années, qui a fait l'objet d'un stage en 2023, réalisé par Lola Ormières. Nous ferons référence à son travail au cours de ce rapport.

Concernant les moyens à ma disposition pour réaliser les missions qui me sont confiées, je dispose d'un PC sous Linux et j'ai appris les bases du langage Shell pour naviguer entre les différents serveurs et arborescences disponibles. L'essentiel de mon travail consiste à programmer en langage Python des algorithmes de diagnostics fournissant des sorties graphiques, à analyser ces résultats et à proposer de nouveaux tests à effectuer afin d'améliorer un modèle de prévisions. Nous utilisons également Gitlab, afin de partager et modifier ces algorithmes.

Une des missions institutionnelles de Météo-France est d'assurer la sécurité des personnes et des biens. Ainsi, le rôle majeur des prévisions météorologiques est d'alerter la population en cas de possibilité de survenance d'événements extrêmes. Pour réaliser ces différentes prévisions, des modèles météorologiques sont utilisés. Ils s'appuient, entre autres, sur les équations de la mécanique des fluides (Navier-Stokes) et permettent de prévoir l'évolution de variables telles que la pression, la température ou l'humidité par exemple. Le modèle sur lequel porte ce travail de recherche est le modèle ARPEGE, il couvre l'entièreté du globe et sa maille est variable. Cela signifie que l'espacement entre deux points de prévision n'est pas égal sur toute la surface du globe. En effet, la maille la plus petite est de 5 km, centrée sur la France et la maille la plus large, aux antipodes, est d'environ 25 km. L'enjeu ici est de participer à améliorer ce modèle de prévision grâce à une modélisation plus juste de la température de l'océan via la représentation des interactions océan/atmosphère et ce, à l'aide d'un modèle unidimensionnel (noté 1D) de couche de mélange océanique. Il existe déjà des modèles tridimensionnels capables d'effectuer de telles prévisions, mais leur mise en place est coûteuse et leurs temps de calcul sont actuellement trop longs pour une mise en œuvre opérationnelle au sein du système de prévision. L'objectif est alors de déterminer si un modèle 1D, moins énergivore, est capable de fournir des résultats réalistes.

Ce stage se concentrera donc sur l'évolution de la température de surface (notée SST pour Sea Surface Temperature dans ce rapport) ainsi que sur la partie superficielle de l'océan sous l'influence de l'atmosphère appelée « couche de mélange océanique » (notée CMO dans ce rapport). Cette zone s'étend sur plusieurs centaines de mètres de profondeur

jusqu'à la thermocline, zone limite au-delà de laquelle la température chute avec un fort gradient. C'est un modèle de CMO1D initialement couplé à un modèle d'atmosphère par C. Lebeaupin-Brossier [2] qui permettra de représenter l'effet de cette CMO sur la SST. Son impact sur la qualité des prévisions atmosphériques sera lui aussi évalué.

Pour mener à bien cette étude, nous utiliserons des données mesurées grâce à un ensemble de bouées en mer ainsi que les prévisions fournies par Mercator Ocean International (MOI, ci-après nommé Mercator), une organisation européenne spécialisée dans l'océanographie opérationnelle. Fondée en 2002 et basée à Toulouse, elle est aujourd'hui une actrice clé de la surveillance et de la prévision de l'état des océans. Mercator mène plusieurs missions de manière simultanée. Parmi elles, la prévision de l'état de l'océan (température, salinité, courants, niveau de la mer, etc), la surveillance des paramètres biogéochimiques marins et le soutien à la recherche scientifique et aux politiques environnementales. Grâce à un modèle capable de simuler en trois dimensions l'évolution de l'océan en tenant compte de phénomènes physiques variés, comme la turbulence, les échanges thermiques ou encore l'influence des vents, Mercator prévoit l'évolution des différentes variables d'état telles que la température de l'eau, la salinité et les courants marins notamment. Pour que ce modèle reste au plus près de la réalité observée, Mercator utilise des techniques d'assimilation de données pour initialiser ses prévisions. Cette étape représente un ajustement continu entre ce qui est observé et ce qui est prévu, permettant ainsi d'affiner les simulations au fil du temps.

1 Contexte et objectifs du stage

1.1 Description du modèle de CMO1D

1.1.1 Équations structurantes

Le modèle de CMO1D utilisé est basé sur le modèle unidimensionnel d'énergie cinétique turbulente proposé par Gaspar et al. (1990) [3]. Les variables pronostiques sont l'énergie cinétique turbulente notée e (J.kg^{-1}), la température de l'eau T (K), la salinité S (g.kg^{-1}) et le courant $\mathbf{u}$. Chaque variable α est décomposable en la somme de sa valeur moyenne temporelle $\bar{\alpha}$ et d'une perturbation α' par rapport à la valeur moyenne ($\alpha = \bar{\alpha} + \alpha'$). Les équations d'évolution temporelles ou équations de conservation sont

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \frac{F_{sol}}{\rho_0 c_p} \frac{\partial I(z)}{\partial z} - \frac{\partial \overline{T'w'}}{\partial z}, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} = - \frac{\partial \overline{S'w'}}{\partial z}, \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} = -f\mathbf{k} \times \mathbf{u} - \frac{\partial \overline{\mathbf{u}'w'}}{\partial z}, \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{e'w'} + \frac{\overline{p'w'}}{\rho_0} \right) - \overline{\mathbf{u}'w'} \times \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial z} + g\overline{\rho'w'} - \epsilon \quad (1.4)$$

où w est le courant vertical, ρ la densité de l'eau de mer, ρ_0 la densité de référence pour l'eau de mer, c_p la capacité thermique massique à pression constante pour l'eau de mer, f le paramètre de Coriolis, p la pression, ϵ la dissipation turbulente, g la gravité, $\mathbf{k}$ le vecteur unitaire selon la direction verticale, F_{sol} le rayonnement solaire reçu par la surface et $I(z)$ la fraction de F_{sol} atteignant la profondeur z (la fonction $I(z)$ décroît exponentiellement avec la profondeur) (Lebeaupin-Brossier *et al.*, 2008 [2]). Pour chacune des dérivées temporelles, on remarque un terme de forme $\overline{\alpha'w'}$ qui n'est pas résolu explicitement, c'est-à-dire qui ne peut être calculé directement. Afin de pouvoir réaliser les calculs d'évolution des variables pronostiques, il est donc nécessaire d'ajouter des équations de fermeture (1.9, 1.5, 1.7, 1.6, 1.8) détaillées ci-dessous qui permettent d'approximer les termes non résolus, fournissant ainsi un système soluble, avec autant d'équations que d'inconnues.

$$-\overline{\rho'w'} = K_\rho \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z}, \quad (1.5)$$

$$-\overline{T'w'} = K_h \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}, \quad (1.6)$$

$$-\overline{S'w'} = K_s \frac{\partial \bar{S}}{\partial z}, \quad (1.7)$$

$$-\overline{\mathbf{u}'w'} = K_m \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial z}, \quad (1.8)$$

$$-\left(\overline{e'w'} + \frac{\overline{p'w'}}{\rho_0}\right) = K_e \frac{\partial \bar{e}}{\partial z} \quad (1.9)$$

Les termes en $\overline{\alpha'w'}$ sont donc représentés comme le gradient vertical de α multiplié par un coefficient de diffusion K_* dépendant de l'énergie cinétique turbulente et défini de la manière suivante : $K_* = c_* l_* e^{-\frac{1}{2}}$, avec c_* la capacité thermique massique de l'eau et l_* la longueur de mélange définie d'après le schéma de turbulence de Bougeault et Lacarrère (1989) [1]. Pour résumer, les termes $\overline{\alpha'w'}$ représentent la turbulence pour la variable α et donc sa capacité à se diffuser dans la colonne océanique de notre modèle 1D. Pour finir, des équations de conditions aux limites ont été posées, afin de déterminer les comportements diffusifs des variables de température, de salinité et de courants en surface ($z=0$) :

$$-\overline{T'w'}(0) = \frac{H + LE + F_{ir}}{\rho_0 c_p}, \quad (1.10)$$

$$-\overline{S'w'}(0) = \frac{E - P}{\rho_0 c_p}, \quad (1.11)$$

$$-\overline{\mathbf{u}'w'}(0) = \frac{\boldsymbol{\tau}}{\rho_0} \quad (1.12)$$

Les termes H , LE et F_{ir} sont respectivement les flux de chaleur sensible (W/m^2), de chaleur latente (W/m^2) et le rayonnement infrarouge (W/m^2). Concernant la salinité, elle augmente positivement avec E qui représente l'évaporation et négativement avec P le taux de précipitations. Enfin, les conditions aux limites pour la turbulence du vecteur courant $\mathbf{u}$ sont régies par $\boldsymbol{\tau}$, le stress lié au vent. Tous ces coefficients sont divisés par $\rho_0 c_p$ pour des raisons d'homogénéité, afin de transformer les flux énergétiques en termes cinématiques.

1.1.2 Configuration opérationnelle

Dans le cadre de l'évolution de la chaîne opérationnelle de prévision du temps à échelle globale (système ARPEGE), le modèle de CMO1D a été activé pour chaque point océanique. La configuration retenue consiste en une grille verticale non régulière discrétisant la colonne d'eau de l'océan sur 12 niveaux (en annexe A).

La version actuelle du modèle ARPEGE opérationnel (notée ci-après "OPER", en

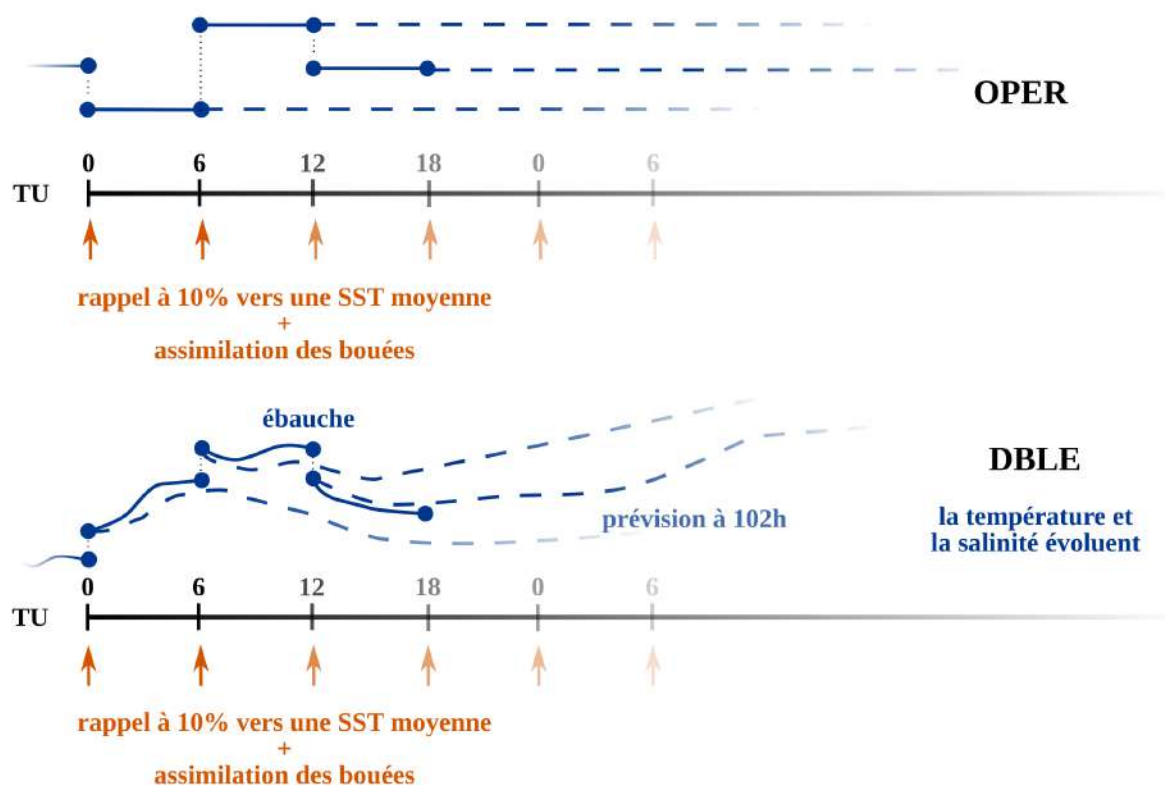


FIGURE 1.1 – Version OPER (a) et version DBLE (b), (Réalisation : Carole Labadie, CNRM)

référence à la version du système de prévision actuellement utilisée par les prévisionnistes) considère la SST constante au sein d'une prévision de 102 h (Fig. 1.1 - OPER).

De manière simplifiée, le système de prévision se compose de ce qu'on appelle le cycle d'assimilation : c'est-à-dire une alternance de prévisions à échéance 6h, appelées ébauches, et d'analyses atmosphériques et de surface. Ces analyses sont produites à partir d'ébauches, qui sont corrigées par les mesures in-situ disponibles au moment de leur conception. Une ébauche est elle-même issue de l'analyse du réseau de prévision précédent, elle-même issue d'une ébauche, etc. En ce qui concerne l'analyse de surface de la partie océanique, on incorpore les prévisions de SST du système global de Mercator ainsi que les mesures des bouées/bateaux disponibles (traits pleins Fig. 1.1). Ce cycle d'assimilation permet donc d'avoir à chaque instant un état référence aussi proche de la réalité que possible depuis lequel sont exécutées les prévisions longues (102h au maximum pour le système ARPEGE, traits tiretés Fig. 1.1) qui sont mises à disposition des prévisionnistes. Ce sont ces prévisions que nous évaluerons au cours des tests de cette étude.

La version actuellement en test en parallèle de la version OPER, appelée version double (notée "DBLE"), propose de ne plus faire l'approximation de SST constante au cours de la prévision. Ici, les variations de SST sont considérées grâce à l'activation du modèle CMO1D, ce qui est illustré sur la figure 1.1 - DBLE.

Étant unidimensionnel, ce modèle ne considère pas les transferts horizontaux des masses d'eau ni les gradients de pression horizontaux. Chaque colonne d'eau modélisée est indépendante de sa voisine sans qu'aucun échange ne se produise entre elles. Afin que le modèle 1D ne dérive pas et donne des résultats cohérents avec le réel, il est contraint

par un modèle océanique 3D global. Pour cela, c'est le système global de Mercator qui a été choisi. Un rappel vers les champs de données Mercator de salinité et de température est réalisé à chaque analyse, soit toutes les 6 h pour le modèle ARPEGE, et la force de rappel est fixée à 10 % (cf Fig 1.1). Ainsi, pour un niveau de profondeur i , la température de la CMO corrigée par les 10 % de Mercator s'écrit :

$$T_{CMO}(i) = 0.9T_{CMO}(i) + 0.1T_{Merc}(i) \quad (4)$$

avec T_{CMO} la température de l'eau prévue par l'ébauche et T_{Merc} la température prévue par le modèle Mercator. i représente le nombre de niveaux, compris entre 1 et 12. Il en va de même pour la salinité.

Dans un deuxième temps, on réalise une analyse de la température de surface grâce aux bouées disponibles :

$$T_{surf.analyse} = f(T_{CMO}(1), T_{bouees}) \quad (5)$$

avec T_{bouees} la température de l'eau mesurée par les bouées installées en mer et f une fonction d'interpolation utilisée afin de réaliser l'analyse. Cette température de surface analysée est alors utilisée pour corriger les premières couches du modèle selon :

$$\Delta T = T_{surf.analyse} - T_{CMO}(1) \quad (6)$$

$$T_{CMO.final}(i) = T_{CMO}(i) - \Delta T \frac{1}{2^{i-1}} \quad (7)$$

avec i le nombre de niveaux, compris entre 1 et 5, limite en deçà de laquelle on considère que l'ajustement par des observations in-situ de surface n'est plus valable. Grâce à cette dernière équation, on donne ainsi plus de poids à l'incrément d'analyse pour les couches proches de la surface. Pour des raisons de coût d'écriture des fichiers de sortie et de faible impact sur les résultats, les composantes horizontales u et v des courants sont initialisées à 0 en début de prévision. La turbidité de l'eau, représentée par la fraction de rayonnement solaire $I(z)$ atteignant la profondeur z (Eqn. 1.1), est une mesure de son degré d'opacité. Elle est paramétrée constante en temps et en espace et correspond aux valeurs 'Clear water' de Jerlov (5, 1968) décrite dans l'article de Paulson et Simpson ([9], 1977).

Enfin, lors d'une première évaluation du modèle de CMO1D, il a été constaté que le modèle avait tendance à accumuler de la chaleur au fil de la prévision, en excès par rapport aux données de référence (bouées, sorties Mercator). Pour contrer cet effet de dérive de la température, une correction pragmatique a été appliquée : le rayonnement net incident (solaire et infra-rouge) reçu par la CMO est artificiellement diminué de 10%. L'évaluation de cette modification a montré qu'elle agit dans le sens d'une amélioration pour la SST et pour l'atmosphère et a été introduite dans le modèle de CMO1D en DBLE en attendant d'identifier l'origine du problème.

1.2 Bug : sous appel du modèle CMO1D

Dans la version en DBLE, on remarque que les amplitudes des cycles diurnes de la SST sont plus faibles que celles de Mercator (Fig. 1.2, courbe bleue pour DBLE, Mercator

en noir). Après avoir repris les paramètres de couplage entre ARPEGE et la CMO1D, c'est un problème de fréquence d'appel du modèle de CMO1D qui semble être à l'origine de cet écrasement du cycle diurne. Pour comprendre ce problème, revenons rapidement sur le fonctionnement de l'appel de la CMO1D dans ARPEGE.

Par défaut, le modèle CMO1D n'est pas appelé à tous les pas de temps du système (240 secondes pour ARPEGE) mais seulement tous les pas de temps correspondant à des multiples de 300 secondes. La raison, historique, vient du fait que ce modèle a été développé initialement dans le cadre d'un couplage avec un modèle atmosphérique de méso-échelle pour des études sur les événements extrêmes en mer Méditerranée. Les pas de temps habituels de ces modèles sont de l'ordre de quelques secondes à quelques dizaines de secondes. Étant donné que l'évolution des variables océaniques, généralement plus lente, ne nécessite pas forcément un pas de temps aussi fréquent, il a été codé par défaut, et de manière empirique, que l'on appellerait la CMO1D toutes les 300 s (en lui communiquant les conditions limites intégrées sur ces mêmes 300 s). En effet, en dessous de ce pas de temps, l'évolution océanique est faiblement modifiée et il s'agit d'un multiple d'un grand nombre de valeurs, idéal pour une large gamme de pas de temps des modèles atmosphériques de méso-échelle (par ex : 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 100 s) (cf. (Lebeaupin-Brossier, 2008 [2])).

En conséquence, comme le système ARPEGE a un pas de temps de 240 s, la CMO1D n'est appelée que toutes les 1200 s (premier multiple de 240 et 300), soit une fois tous les cinq pas de temps.

Nous sommes par conséquent en présence d'un bug car on tient compte d'un cumul de rayonnement solaire de 240 s toutes les 1200 s. Le cumul des 960 s restantes est oublié, ce qui explique la faiblesse du cycle diurne résultant. C'est la découverte de cette anomalie qui a initié la mise en place de cette étude. Afin de la corriger, nous construisons une expérience avec un appel de la CMO1D à chaque pas de temps du modèle (toutes les 240 s) et nous supprimons le coefficient artificiel d'atténuation de rayonnement incident net. Cette nouvelle expérience sera notée "REF" par la suite.

La figure 1.2, courbe rouge tiretée, montre l'effet de cette modification. Le tracé de la température de surface (Fig. 1.2 a.) nous permet de constater que les amplitudes des cycles diurnes de la version DBLE (courbe bleue) sont plus faibles que celles prévues par Mercator faisant office de référence (courbe noire). L'expérience REF (courbe rouge) présente des amplitudes de cycles diurnes plus importantes que la DBLE et que Mercator. Ces différences, présentées ici pour le domaine atlantique nord, sont constatées quelle que soit la position choisie sur le globe (non montrées). Concernant la température de l'eau en profondeur (Fig. 1.2 b.), on constate des cycles diurnes quasi-inexistants pour la version DBLE et l'expérience REF à la différence de Mercator. De plus, d'un point de vue temporel, Mercator prévoit un refroidissement au cours des 102 h alors que les deux expériences avec CMO1D prévoient plutôt du réchauffement au cours des 102 h de prévision. Ce graphique nous permet d'illustrer la dérive de température à la hausse décrite en partie 1.1.2. Notons que celle-ci est plus importante dans la REF que dans la DBLE que ce soit en surface ou en profondeur.

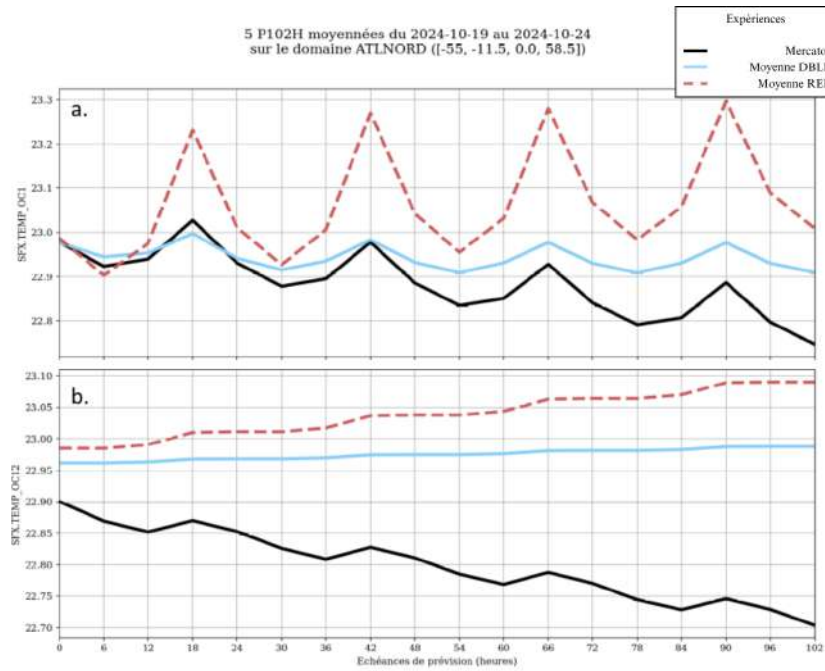


FIGURE 1.2 – Évolutions moyennes de la température, aux 1er (50cm) et 12ème (18.5m) niveaux, de 5 prévisions consécutives de 102 h sur le domaine atlantique nord, prévues par : Mercator (noir), la chaîne DBLE (bleu) et la REF (tiretés rouges).

1.3 Objectifs

L'expérience REF est l'expérience de référence sur laquelle on se basera pour effectuer des tests de sensibilité. Il s'agira de retrouver des amplitudes diurnes et une dynamique qui tendent vers la référence donnée par le modèle 3D de Mercator d'une part, et par les bouées en mer, d'autre part. Pour ce faire, nous effectuerons les tests de sensibilité sur les paramètres et variables suivants :

- nombre de niveaux,
- albédo,
- turbidité,
- état initial des courants,

afin de déterminer quelle configuration de paramètres et variables est la plus efficace. Dans un deuxième temps, nous espérons pouvoir montrer que la configuration retenue permet d'améliorer les scores atmosphériques actuels, en comparant nos résultats de prévisions aux données des radiosondages et aux analyses du modèle IFS (Integrated Forecasting System : modèle de prévision du temps du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme - CEPMMT). Ces dernières constituent des références indépendantes de notre modèle atmosphérique.

2 Tests de sensibilité

2.1 Nombre de niveaux

Commençons par évaluer l'effet du nombre de niveaux verticaux du modèle sur les valeurs de SST prévues. En effet, jusqu'ici le niveau le plus bas est le niveau 12, correspondant à une profondeur d'environ 18 m. Lors des derniers travaux sur la CMO1D, durant le stage de L. Ormières en 2023 [7], il a été montré que davantage de niveaux n'offrait pas d'amélioration significative mais imposait des fichiers de sortie bien plus lourds et donc des surcoûts de stockage. Cependant, ces conclusions ont été tirées sur la base d'un pas de temps d'appel du modèle de CMO1D erroné (cf. 1.2). Il semble donc pertinent d'essayer des valeurs différentes maintenant que le pas de temps est corrigé. Pour ce test de sensibilité, nous choisissons de modéliser 26 niveaux, c'est-à-dire une profondeur d'environ 186 m (expérience 26LVL). Cette profondeur est choisie de manière cohérente avec celle utilisée dans les systèmes opérationnels dédiés à la prévision des cyclones dans les départements d'outre-mer (Arome-OM). Ce faisant, nous espérons pouvoir diminuer la température de l'eau en supposant que le mélange vertical peut remonter des masses d'eau plus froides présentes dans les niveaux plus profonds.

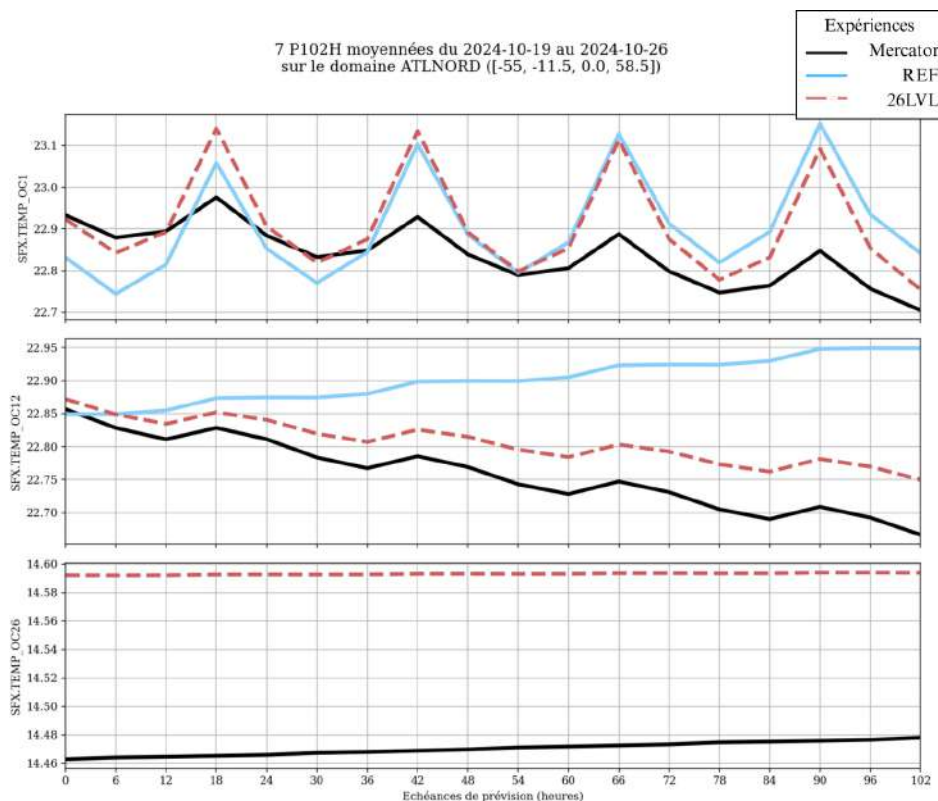


FIGURE 2.1 – Évolutions moyennes de la température, aux 1er (50 cm), 12ème (18.5 m) et 26ème (186.1 m) niveaux, de 7 prévisions consécutives de 102 h sur le domaine atlantique nord, prévues par : Mercator (noir), la REF (bleu) et l'expérience avec 26 niveaux (tiretés rouges).

On constate que l'expérience 26LVL (courbe rouge tiretée) fait décroître la température au cours des 102 h au 12ème niveau de profondeur (Fig. 2.1) suivant ainsi un peu mieux l'évolution de Mercator. Ce refroidissement par le bas semble à son tour permettre de faire diminuer la température de la SST. On observe une évolution satisfaisante également sur l'ensemble des domaines testés (non montrés ici).

Ainsi, l'ajout de niveaux représente un facteur d'amélioration en diminuant le biais chaud de température. Par ailleurs, le choix de 26 niveaux est arbitraire et en choisir davantage pourrait peut-être continuer d'améliorer les prévisions de SST. Nous avons donc effectué un test similaire avec 30 niveaux, soit une profondeur de 380 m, doublant ainsi la profondeur maximale par rapport au test à 26 niveaux. Cette expérience n'a pas montré de différences significatives avec le test à 26 niveaux. Dans ce cas, le gain d'espace de stockage d'un modèle à 26 niveaux par rapport à un modèle à 30 prime. Toutefois, nous constatons sur la figure 2.1 et sur d'autres domaines non montrés que malgré une modification de l'évolution de la SST, l'amplitude du cycle diurne demeure encore trop importante par rapport aux données Mercator et la dérive de température à la hausse, bien qu'amointrie, persiste.

2.2 Albédo

L'albédo est une caractéristique d'une surface qui représente sa capacité à réfléchir un rayonnement solaire (dans le domaine visible). Ainsi, plus l'albédo d'une surface est important, moins celle-ci aura tendance à se réchauffer par rayonnement, comme la banquise par exemple. À l'inverse, une surface de faible albédo se réchauffera davantage sous l'effet du rayonnement, comme une route goudronnée par exemple.

L'objectif de ce test de sensibilité est d'identifier si les paramétrisations calculant l'albédo peuvent jouer sur les amplitudes diurnes et le biais chaud constatés jusqu'ici. Le modèle CMO1D prend en compte deux valeurs différentes d'albédo : un pour les rayonnements solaires directs (provenant directement du soleil) et un pour les rayonnements solaires diffus (avec une provenance homogène dans l'espace du fait de la couverture nuageuse). Nous nous proposons de réaliser un test de sensibilité sur l'albédo du rayonnement direct et sur l'albédo du rayonnement diffus :

- Dans la version REF, la valeur de l'albédo diffus, constante en temps et en espace, est imposée à $\alpha_{diff} = 0.06$, soit 10 % plus faible que la valeur de Mercator ($\alpha_{diff.Merc} = 0.066$). Dans un premier temps, nous proposons donc d'imposer la même valeur d'albédo diffus que celle de Mercator et d'observer la réaction du modèle à ce changement (Fig. 2.2, expérience albMER, courbe rouge tiretée). Cette nouvelle modélisation devrait réfléchir davantage de rayonnement solaire diffus et ainsi moins réchauffer la surface de l'eau.
- Concernant l'albédo direct, c'est la paramétrisation de Taylor (1996) [4] qui est utilisée pour l'expérience REFalb (Fig. 2.2, courbe bleue). Celle-ci prend en compte l'angle zénithal pour faire évoluer l'albédo au fil de la journée. Nous nous proposons ici de tester aussi une autre paramétrisation plus récente : Séférian ([10], 2018). Celle-ci prend en compte, en plus de l'angle zénithal, l'intensité du vent, qui modifie la forme de la surface, pour calculer l'albédo direct des surfaces

océaniques (Fig. 2.2, expérience SEF, courbe verte tiretée).

La figure 2.2 montre que les valeurs de SST sont insensibles aux modifications d'albédo proposées. Les prévisions de SST sont quasi-égales tant en termes d'amplitude qu'en termes d'évolution temporelle sur le domaine Tropiques Pacifique pris comme exemple. Il en va de même pour tous les autres domaines évalués (non montrés).

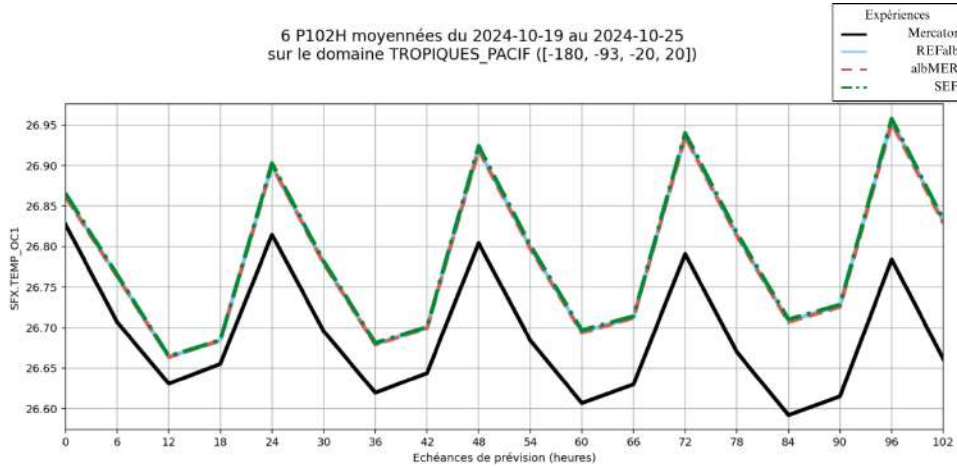


FIGURE 2.2 – Évolutions moyennes de la température au 1er (50 cm) niveau, de 6 prévisions consécutives de 102 h sur le domaine Tropiques Pacifique, prévues par : Mercator (noir), la REFalb (bleu), l'expérience $\alpha_{diff} = \alpha_{Mercator}$ (albMER, tireté rouge) et l'expérience $\alpha_{diff} = \alpha_{Mercator}$ et $\alpha_{dir} : Seferian(2014)$ (SEF, tireté vert).

Rappelons que l'énergie reçue par l'océan depuis l'atmosphère provient des rayonnements directs, diffus et infrarouges. La présence de la dérive de température à la hausse nous incite à conserver la paramétrisation de l'albédo diffus de Mercator ($\alpha_{diff} = 0.066$) qui réfléchit davantage d'énergie, même si son impact reste minime par rapport à la version antérieure ($\alpha_{diff} = 0.060$). Quant à l'albédo direct, la paramétrisation de Séférian [10] n'apportant pas d'amélioration, nous conservons la paramétrisation d'origine, celle de Taylor [4].

2.3 Turbidité

Un autre processus physique qui pourrait impacter directement l'amplitude diurne de température est la pénétration du rayonnement solaire dans l'eau en fonction de la turbidité de l'eau. La turbidité est la mesure de la clarté de l'eau et dépend de la quantité de matières en suspension (chlorophylle, matières inorganiques et organiques de très petites tailles, planctons, algues, sédiments,...). Modifier la valeur de la turbidité permettra de modifier la pénétration de l'énergie solaire vers les couches profondes. En effet, plus l'eau est trouble, moins le rayonnement solaire incident va se propager en profondeur et plus l'énergie va être concentrée en surface. Ainsi, les couches supérieures auront tendance à se réchauffer au détriment des couches plus profondes. Dans le modèle de CMO1D, on considère une turbidité constante dans le temps et l'espace. Pour modéliser la quantité de pénétration de rayonnement solaire par couche océanique, on utilise la formule de Jerlov [5] suivante :

$$I(z) = I_o(Re^{z/D1} + (1 - R)e^{z/D2}) \quad (2.1)$$

avec $I(z)$ la quantité de rayonnement reçue à la profondeur z en $W.m^{-2}$, z étant compté négativement et en mètres. I_o est le rayonnement solaire en surface, R un coefficient de pondération (sans unité) et $D1$ et $D2$ deux longueurs caractéristiques (en m) de pénétration du rayonnement dans l'eau. $D1$ représente la profondeur de pénétration de la partie rouge du spectre chromatique et $D2$ la profondeur de pénétration des longueurs d'ondes bleues-vertes. Plus ces grandeurs caractéristiques sont importantes, plus cela correspond à une eau claire. Ainsi, le rayonnement solaire se répartit de manière plus homogène sur la verticale.

	R	D1	D2
Eau claire (Type I, Jerlov, 1968)	0.58	0.35	23
PARAM1	0.55	2	30
PARAM2	0.55	2.5	32
Eau très claire (Kraus, 1972)	0.4	5	40

TABLE 2.1 – Valeurs des coefficients de paramétrisation de la turbidité

Dans l'expérience DBLE et pour le reste des expériences présentées jusqu'alors, les valeurs de ces paramètres correspondent à une turbidité de type « Eau Claire » (Jerlov, 1968 [5]), celles-ci sont exposées dans le tableau 2.1. Dans le but de diminuer l'amplitude du cycle diurne en surface, et de l'augmenter en profondeur, nous allons donc modifier ces paramètres pour correspondre à une eau plus claire. Deux choix de paramètres ont été testés : PARAM1 et PARAM2. Ces derniers sont des intermédiaires entre « Eau Claire » et « Eau Très Claire » (Jerlov, 1968 [5] ; Kraus, 1994 [6] cités tous deux dans l'article de Paulson et Simpson, 1977 [9]). Ces choix de paramètres sont pragmatiques et sont réalisés dans l'objectif de réduire un biais chaud de surface par rapport aux prévisions Mercator.

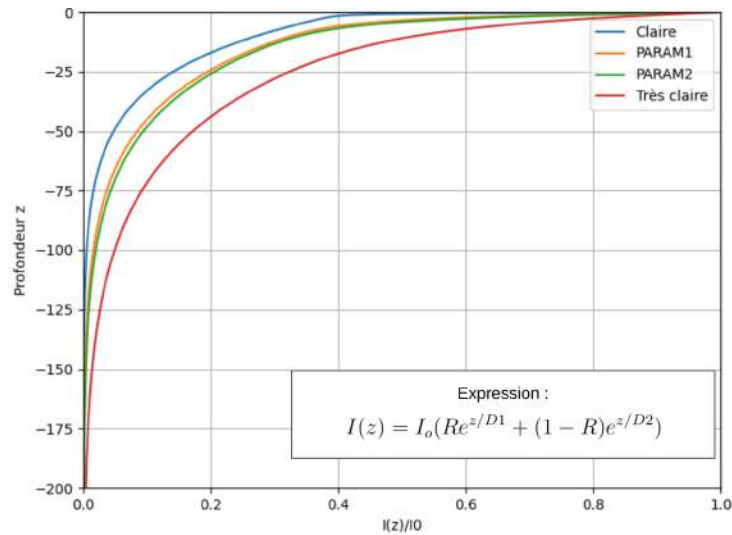


FIGURE 2.3 – Évolution du rayonnement solaire $I(z)/I_0$ présent en fonction de la profondeur z pour les différentes paramétrisations de turbidité évaluées.

Les différentes courbes de fraction de pénétration du rayonnement en profondeur ($I(z)/I_0$) correspondant aux paramétrisations du tableau 2.1 sont représentées sur la figure 2.3. Pour une profondeur z donnée, on constate bien que la quantité de pénétration du rayonnement $I(z)$ augmente avec l'éclaircissement de l'eau. On s'attend donc à observer une répartition plus homogène de l'énergie sur les différents niveaux de profondeur.

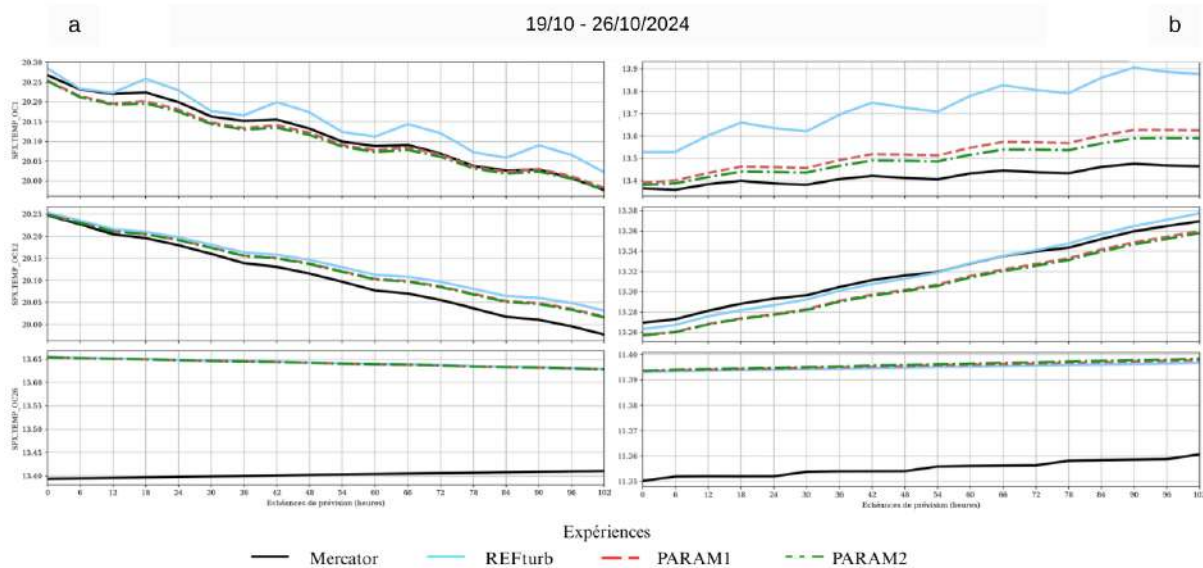


FIGURE 2.4 – Évolutions moyennes de la température aux 1er (50 cm) 12ème (18.5 m) et 26ème (186.1 m) niveaux, de 8 prévisions consécutives de 102 h sur les domaines hémisphère nord ([20,60], a) et hémisphère sud ([−20,−60], b) prévues par : Mercator (noir), REFturb (paramètres "Eau claire", courbe bleue) et l'expérience avec les nouvelles valeurs de turbidité (tiretés rouges et tiretés verts).

La figure 2.4 illustre les différentes prévisions de SST issues des différents paramètres de la turbidité sur le domaine hémisphère nord (a) et hémisphère sud (b). On observe une diminution de l'amplitude du cycle diurne en surface avec les nouveaux paramètres. De manière générale, on constate une cohérence légèrement meilleure de la PARAM2 avec

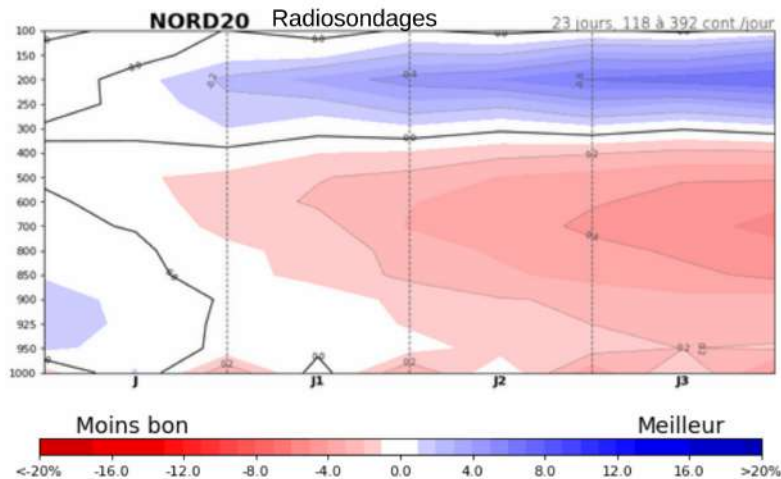


FIGURE 2.5 – Biais de température de la version DBLE calculés par rapport aux radiosondages pour le domaine hémisphère nord ($[20,90]$) sur le mois de juin 2025. En ordonnée les niveaux pression de l'atmosphère, en abscisse les échéances de prévision en jours.

Mercator par rapport à la PARAM1. Par rapport à la paramétrisation "Eau claire", le modèle de CMO1D montre une forte sensibilité à ces paramètres. On constate également sur cette figure que les prévisions d'été présentent un biais chaud en surface par rapport à Mercator. La première hypothèse qui pourrait expliquer cette augmentation de température peut venir d'une modélisation de turbidité encore trop sombre par rapport au réel. Cependant, ce raisonnement est limité par le fait que la PARAM2 retenue représente une turbidité proche d'une limite très claire. Une autre hypothèse est que ce réchauffement pourrait venir d'un forçage de rayonnement solaire trop important de la part d'ARPEGE en été par rapport au réel, ce qui est en effet observé dans les évaluations du modèle. Cela est visible sur la figure 2.5 qui représente le biais de température du modèle ARPEGE dans l'atmosphère par rapport aux observations de radiosondages.

Enfin, notons que l'hypothèse d'une valeur de turbidité constante dans le temps et l'espace est très forte et assez éloignée de la réalité physique. Pour les prévisions saisonnières réalisées à Météo-France, le modèle atmosphérique ARPEGE est couplé à un modèle d'océan tridimensionnel nommé NEMO, qui considère une climatologie de concentration en chlorophylle pour évaluer la turbidité sur toute la surface du globe.

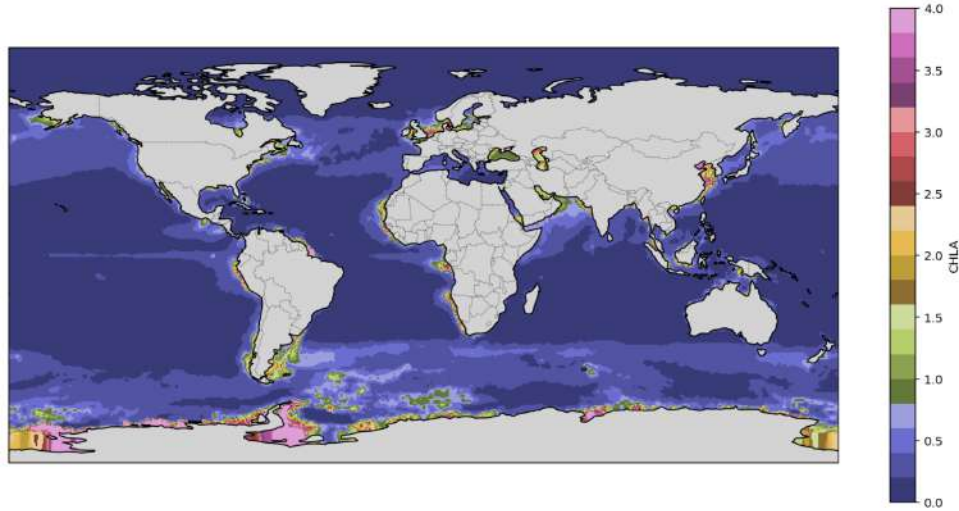


FIGURE 2.6 – Concentration en chlorophylle d’un mois de janvier moyen en mg/m^3 , sur le globe et utilisée dans la prévision saisonnière à Météo France via le modèle ARPEGE-NEMO. *Source : ESA-CCI*

Ces valeurs de concentration varient dans le temps et l’espace et permettent ainsi de paramétrer une turbidité plus réaliste (Fig. 2.6). Une telle modélisation de la turbidité pourrait représenter une amélioration significative pour le modèle de CMO1D du fait de la sensibilité à ce paramètre.

Pour la suite de notre étude, nous décidons de conserver les paramètres PARAM2 (Tab. 2.1) qui donnent, selon les évaluations effectuées, le meilleur comportement par rapport aux sorties Mercator.

2.4 Courants horizontaux

Comme il a été montré dans le stage de L. Ormières [7] que l’impact des composantes u et v des courants horizontaux était négligeable sur les prévisions de SST, leurs valeurs ne sont pas sauvegardées et sont réinitialisées à 0 à chaque nouvelle prévision dans la version DBLE. Cela permet de limiter la taille des fichiers d’entrée et de sortie du modèle sans perdre en qualité de prévision. En effet, ces derniers passent de 1.2 Go à 1.6 Go quand les composantes u et v sont sauvegardées, ce qui représente une augmentation du volume de stockage de 33%. L’enjeu de ce test est de déterminer si l’effet de ces composantes sur les variations de SST est en effet négligeable ou bien si un stockage des valeurs du réseau précédent pour initialiser le réseau actuel améliorerait les prévisions.

Dans la version DBLE, l’initialisation à 0 des composantes de courants u et v rend le terme $\overline{\mathbf{u}'w'}$ nul à tous les niveaux sauf en surface à l’instant initial (condition limite de vent de surface : 1.8) ce qui réduit la production d’énergie cinétique turbulente pilotée par l’équation 1.4 qui se simplifie alors en :

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{e'w'} + \frac{\overline{p'w'}}{\rho_0} \right) + g\overline{\rho'w'} - \epsilon \quad (2.2)$$

L’énergie cinétique turbulente e est une mesure de l’intensité des fluctuations turbulentes

dans le fluide. Il s'agit de la quantité d'énergie disponible dans ces fluctuations (petits tourbillons, remous, instabilités dans le fluide). Elle est responsable du mélange et donc de l'homogénéisation de température et de salinité dans la CMO.

Finalement, on retrouve un impact de ces courants sur la température par l'équation 1.1 et au terme K_h (Eqn. 1.6) qui dépend de l'énergie cinétique turbulente.

Par la suite, les courants horizontaux qui se forment dans le modèle de CMO1D correspondent aux courants dits d'Ekman (Eqn. 1.3). La spirale d'Ekman est un phénomène de rotation progressive de la direction des courants marins avec la profondeur sous l'effet combiné du vent et de la force de Coriolis. Lorsque le vent souffle en surface, il transmet une quantité de mouvement à l'eau, entraînant un courant de surface dévié de 45° par rapport à la direction du vent, en raison de la force de Coriolis. En profondeur, chaque niveau d'eau est entraîné par le niveau supérieur avec une perte d'intensité et une déviation supplémentaire. Cette succession de déviations forme une spirale dont la rotation s'effectue dans le sens horaire dans l'hémisphère nord et antihoraire dans l'hémisphère sud (Fig. 2.7).

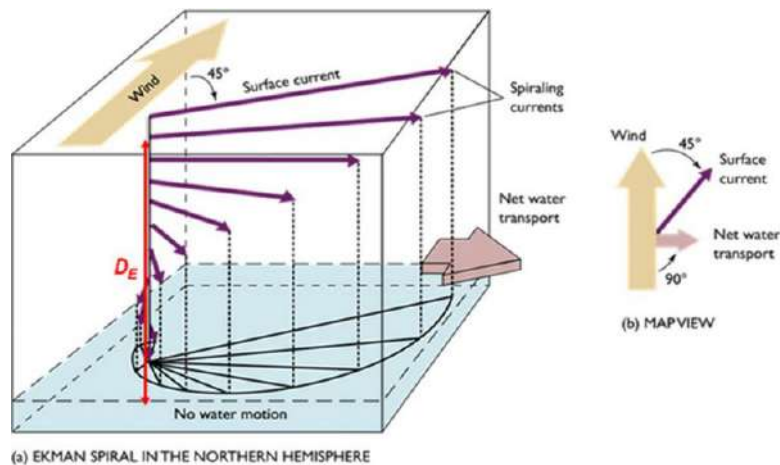


FIGURE 2.7 – Spirale d'Ekman (Source : www.offshoreengineering.com)

La figure 2.8 montre les prévisions successives des composantes de SST et de courants u et v de surface sur un point géographique (latitude : 0.6, longitude : -27.7). L'expérience qui cycle les valeurs de courants d'une prévision sur l'autre (expérience CYCL, courbe tiretée rouge) permet à un courant de se mettre en place en quelques jours (Fig. 2.8, b et c). L'expérience REFcour (courbe bleue), qui initialise les valeurs des composantes de courant à 0, effectue des prévisions qui évoluent temporellement de la même manière mais sans pouvoir atteindre d'équilibre du fait de l'initialisation à 0 de u et v à chaque nouvelle prévision. Malgré ces différences dans la modélisation des courants, le point évalué ici ne présente pas de différence de SST (Fig. 2.8, a).

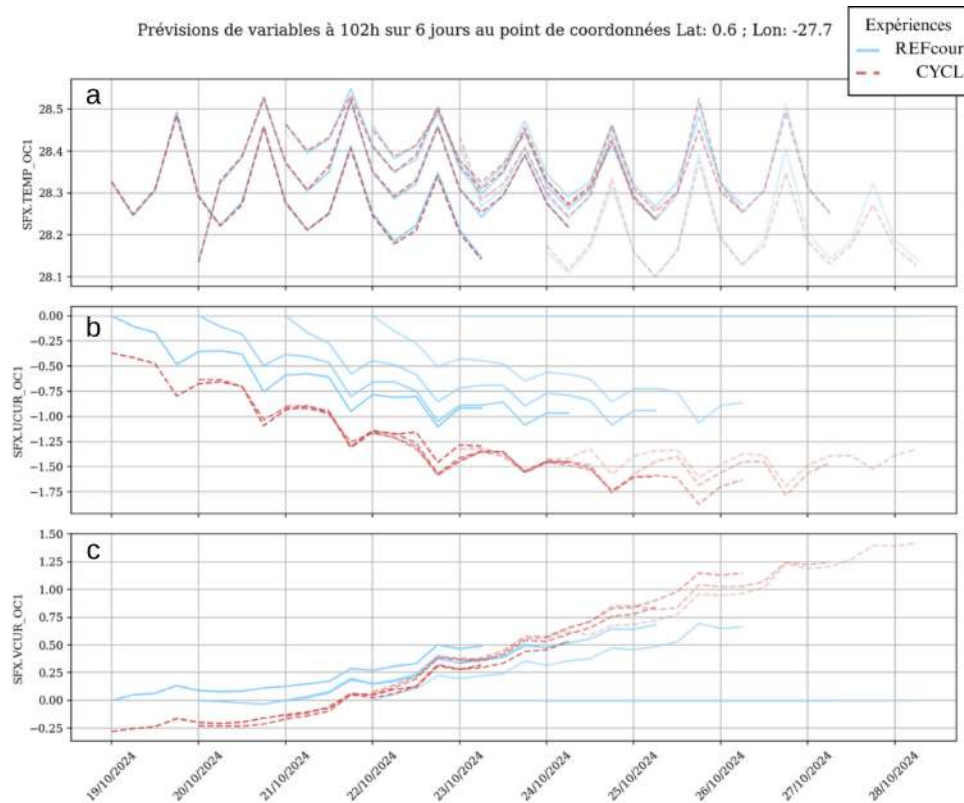


FIGURE 2.8 – Évolutions de 6 prévisions de SST (a) et des composantes u (b) et v (c) des courants à 102 h au 1er niveau (50 cm), en un point (latitude :0.6 ; longitude : -27.7), prévues par : Mercator (noir), la REFcour (courbe bleue) et l'expérience avec le cyclage des courants à chaque nouvelle prévision CYCL (tiretés rouges).

Cependant, l'ajout du cyclage des courants a bien un effet local sur les prévisions de SST, de l'ordre de quelques dixièmes de degrés, comme on peut le constater sur la Figure 2.9. La figure 2.10 montre l'effet moyen de ces différences sur le domaine pacifique ouest, qui justement présente des différences de SST sur la figure 2.9. On constate finalement que ces différences sont négligeables en moyenne. L'ensemble des autres domaines évalués, non montrés ici, présente des résultats similaires. Ces différences locales observées en figure 2.9 ne se retrouvent donc pas à plus grande échelle.

Afin d'évaluer si le cyclage des courants a un impact sur les prévisions atmosphériques, nous avons réalisé des comparaisons de ces deux versions du modèle aux analyses du modèle IFS (CPMMT) et aux mesures de radiosondages. Ces évaluations, sous forme de REQM présentées en annexe C, montrent des résultats neutres en moyenne, voire légèrement dégradés avec la version cyclée par rapport à la version non cyclée.

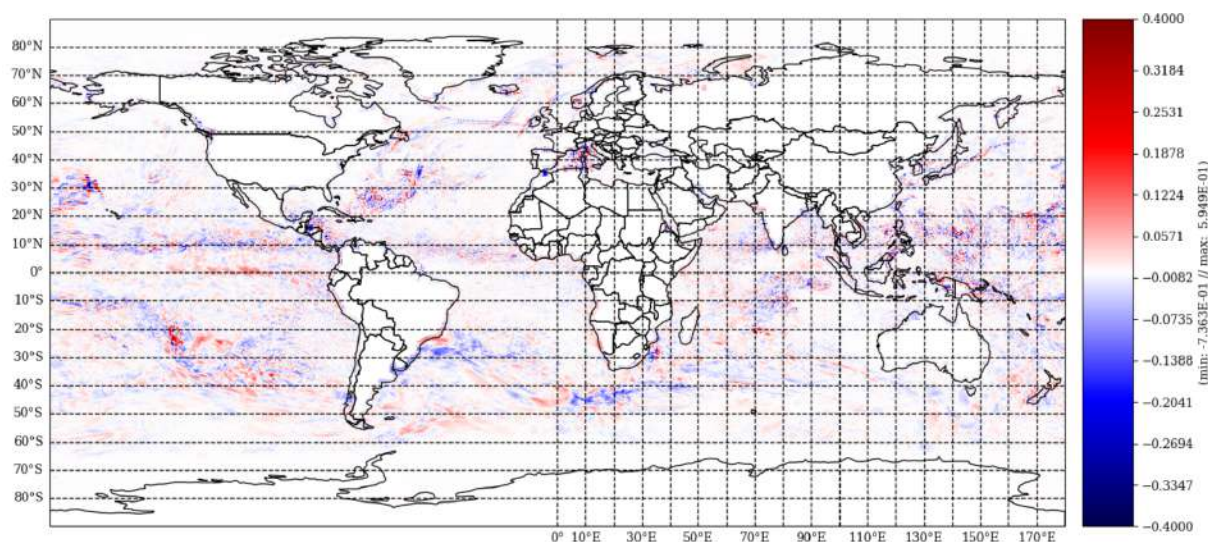


FIGURE 2.9 – Différence moyenne sur 6 jours de la SST entre les expériences CYCL et REFcour à l'échéance 96 h. 19 - 24/10/2024

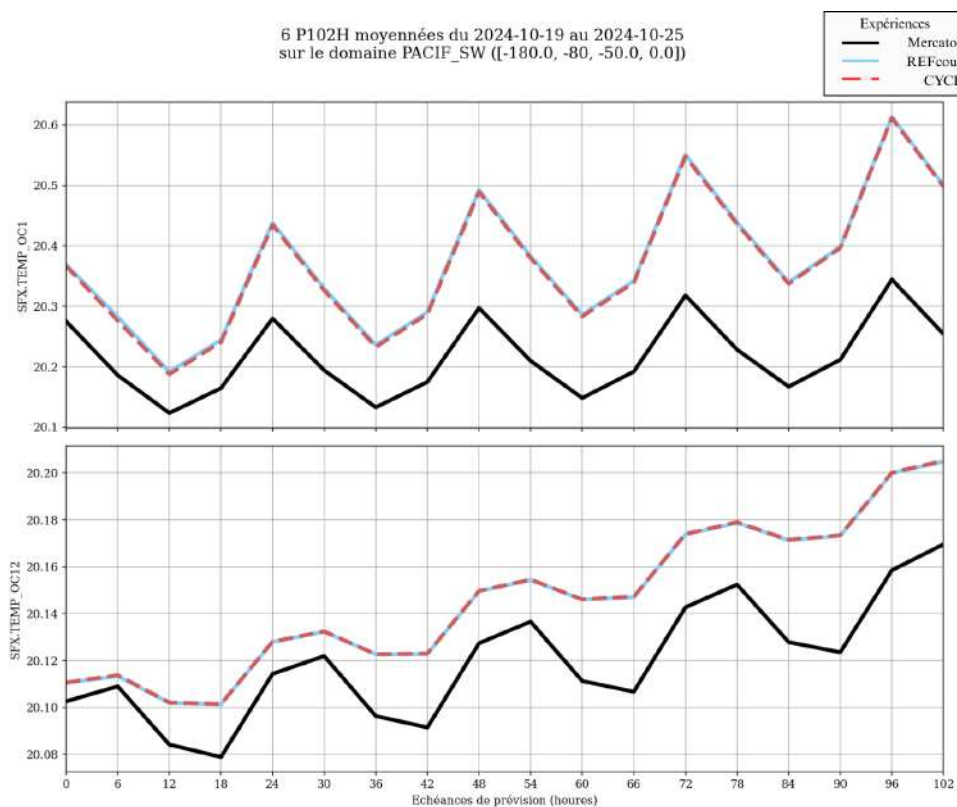


FIGURE 2.10 – Évolutions moyennes de la température aux 1er (50 cm) et 12ème (18.5 m) niveaux, de 6 prévisions consécutives de 102 h sur le domaine pacifique sud-ouest prévues par : Mercator (noir), la référence REFcour (bleu) et l'expérience avec les courants cyclés CYCL (en rouge).

3 Focus sur deux aspects de la mise en œuvre de la CMO1D

3.1 Interactions océan-banquise

Dans la configuration actuelle, la quantité de flux de surface entrants fournie à la CMO1D (précipitations, rayonnements solaire et infrarouge, Eqns 1.10 et 1.11) n'est pas impactée par la présence éventuelle de glace de mer. Par exemple, 100% du rayonnement solaire reçu par une maille du domaine qui serait tout ou partie couverte par de la glace de mer est transmis au modèle de CMO1D. Ce n'est pas le cas dans la réalité et on se propose d'y remédier et d'analyser les impacts d'une telle modification dans cette section. Cette anomalie résulte du fait que le modèle de CMO1D a été initialement développé dans le cadre de travaux sur la France hexagonale, puis adapté et utilisé en opérationnel sur les domaines de la France outre-mer, en dehors de toute zone couverte par de la banquise. Afin de considérer la couverture de glace dans le couplage océan-atmosphère, ce sont les sorties du modèle de banquise d'ARPEGE qui sont utilisées. La prise en compte consiste à modifier les conditions aux limites entrantes dans la CMO1D comme suit, pour le rayonnement solaire par exemple :

$$F_{sol} = (1 - SIC) * F_{sol} \quad (3.1)$$

SIC , compris entre 0 et 1, représente la fraction de banquise. On fait de même pour les termes définis dans les équations : 1.10, 1.11 et 1.12

La figure 3.1 compare les prévisions fournies par l'expérience REFice (qui ne considère pas la banquise dans le couplage, courbe bleue), l'expérience prenant en compte la banquise : ICE (tiretés rouges) et les sorties Mercator (courbe noire), sur le domaine sud-polaire.

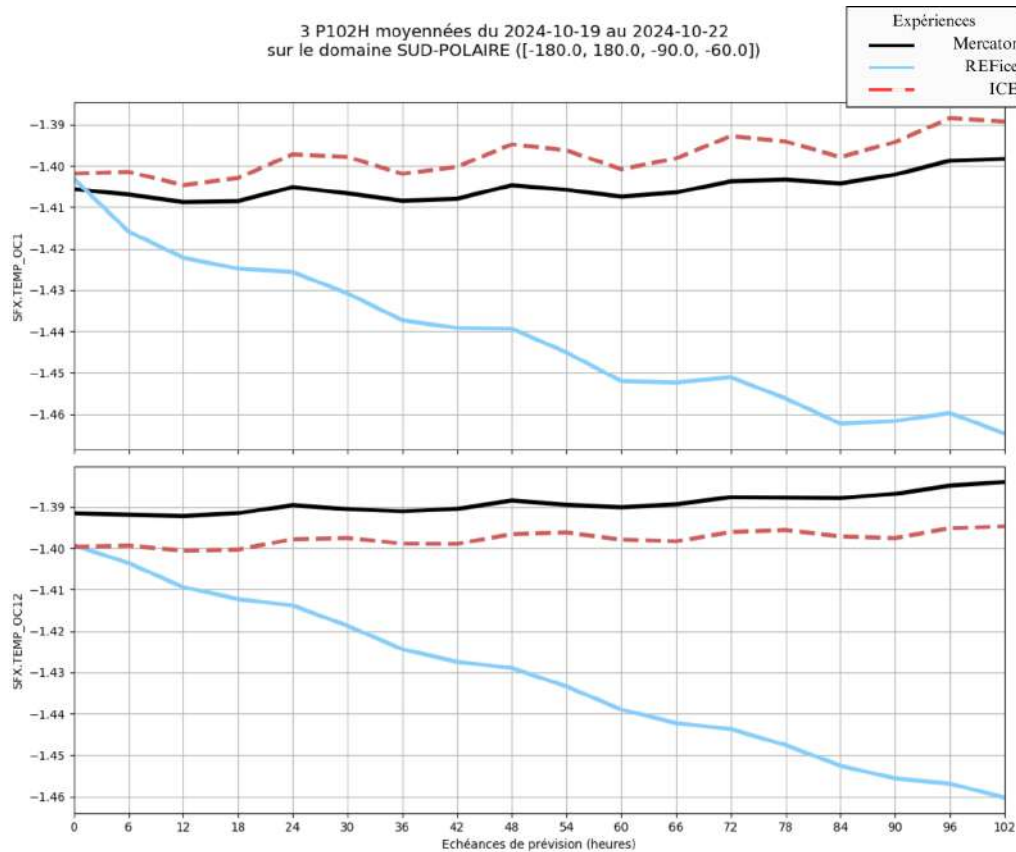


FIGURE 3.1 – Évolutions moyennes de la température aux 1er (50 cm) et 12ème (18.5 m) niveaux, de 3 prévisions consécutives de 102 h sur le domaine sud-polaire, prévues par : Mercator (noir), la REFice (courbe bleue) et l'expérience ICE modélisant l'effet de la présence de banquise (tiretés rouges), entre le 19 et le 22/10/2024.

Avec l'ajout d'une couverture de banquise sur la surface de l'eau, on pourrait penser que le rayonnement solaire entrant dans la CMO serait plus faible et donc que l'eau se réchaufferait moins. Cependant, les figures 3.1 et 3.2 montrent que la SST augmente par rapport à la DBLE, qui ne considère pas la banquise dans le couplage océan-atmosphère. En effet, cette dernière agit comme un couvercle sur la surface de l'eau et si l'océan absorbe moins de rayonnement solaire, il émet également moins de rayonnement thermique vers l'atmosphère. De plus, le vent de surface n'est plus capable de refroidir l'eau. On constate par ailleurs sur la figure 3.1, une évolution de la température plus cohérente avec celle proposée par le modèle Mercator, en surface comme en profondeur.

Les prévisions atmosphériques ne seront certainement que peu sensibles à ce nouveau développement du fait des faibles différences de SST mises en jeu, mais la prise en compte de la banquise dans le couplage fait évoluer le modèle de CMO1D vers davantage de cohérence physique. C'est pourquoi ce développement sera conservé dans la version finale du modèle.

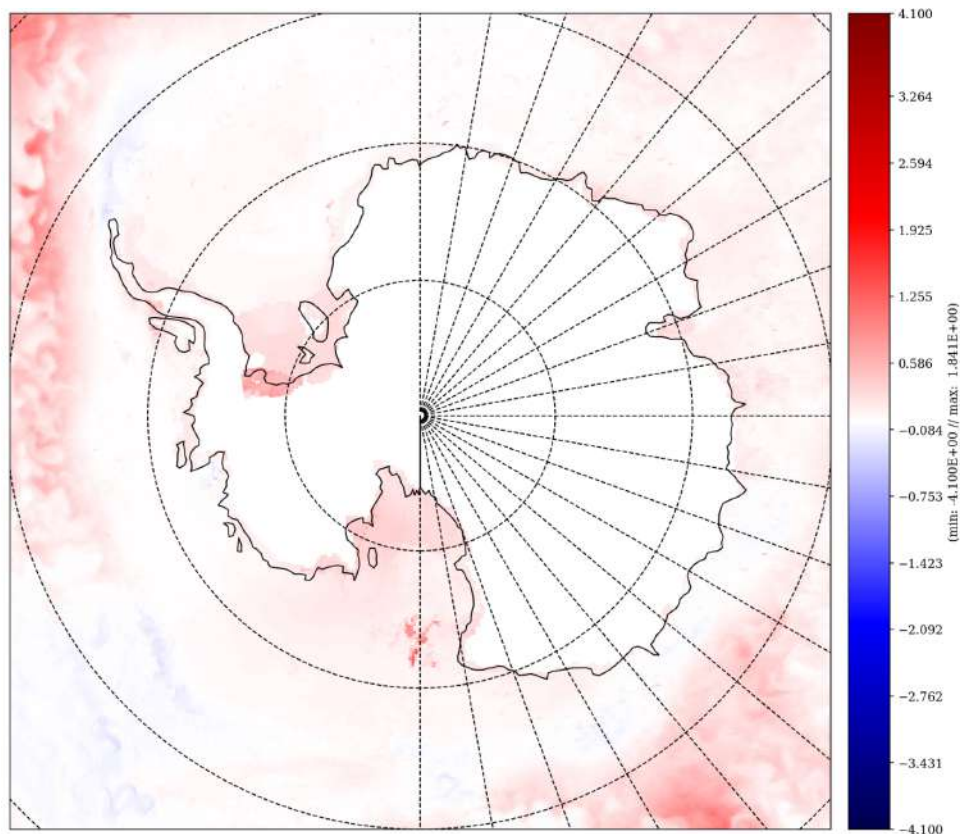


FIGURE 3.2 – Différence de SST entre l'expérience modélisant l'effet de la banquise dans le couplage océan-atmosphère (ICE) et la référence REFice qui n'en tient pas compte, sur le pôle sud pour le cycle de prévision du 19/10/2024 à l'échéance 12 h.

3.2 Points libres

Du fait de la différence de masques terre-mer utilisés entre les systèmes Mercator (résolution $1/12^\circ$, soit ~ 10 km) et ARPEGE (grille étirée de 5 à 25 km), on ne dispose pas de données de température océanique Mercator sur tous les points d'ARPEGE, et ceux-ci ne peuvent pas être rappelés vers les sorties du système Mercator lors de l'analyse de surface. On les appellera "points libres" car ils évoluent librement avec la CMO1D sans jamais bénéficier des changements de température et de salinité dus aux échanges horizontaux (cf fig. 3.3).

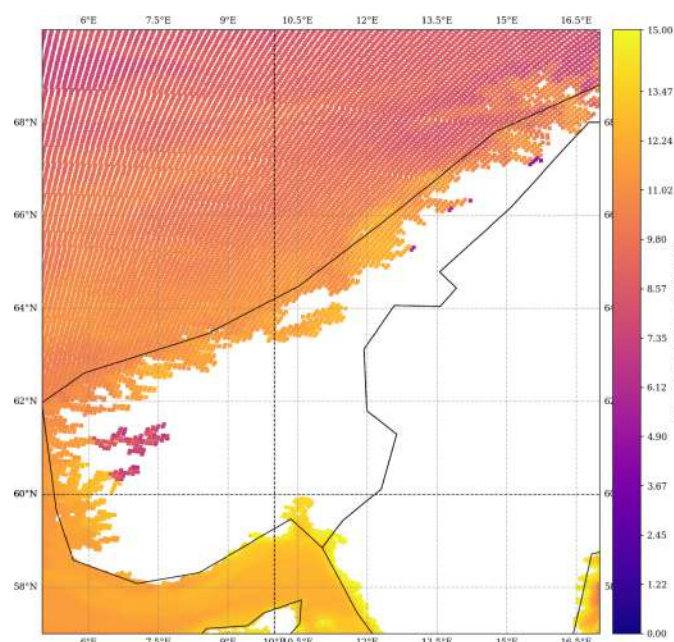


FIGURE 3.3 – Exemple de présence de points libres dans les fjords norvégiens présentant des valeurs de SST plus faibles que celles des points non-libres environnants. Prévion du 10/06/2025, réseau 0 h à l'échéance 0 h

En effet, la grille ARPEGE contient 4.3 millions de points de maille, terre et mer confondus. Parmi eux, 2.5 millions sont situés en mer et 4939 d'entre eux sont des points libres, soit environ 0.2 %. Cette fraction est certes faible, mais si la SST d'un seul point diverge, elle impactera alors l'atmosphère au-dessus, qui elle-même, par rétroaction, impactera tous les points autour.

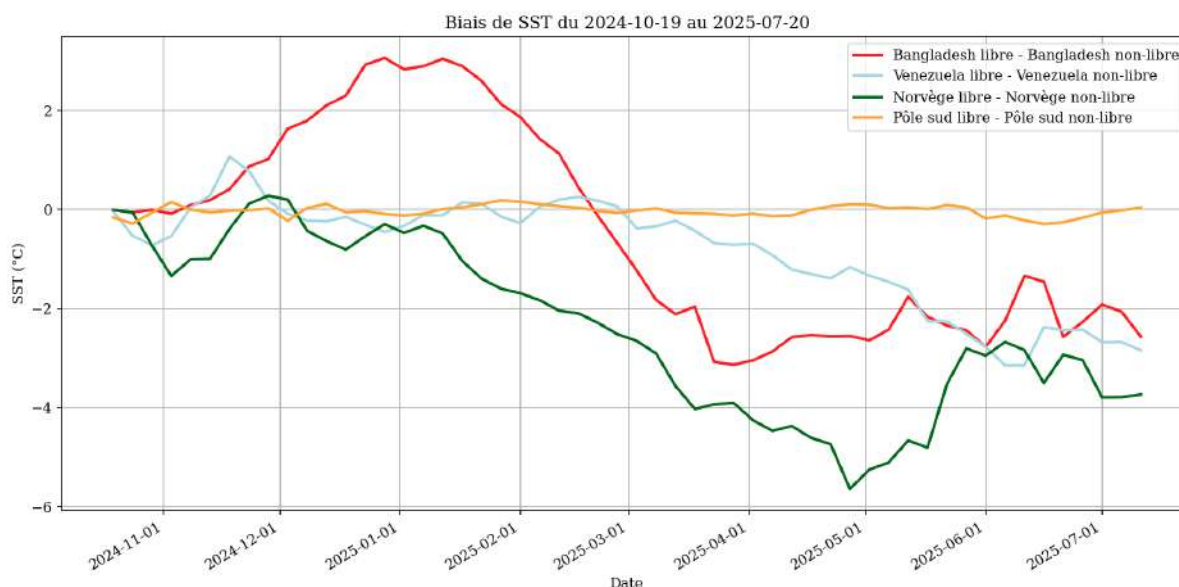


FIGURE 3.4 – Biais entre les valeurs de SST d'un point libre et d'un point non-libre à proximité pour quatre localisations : Bangladesh, Venezuela, Norvège, Pôle Sud.

La figure 3.4 présente, pour quatre localisations distinctes, les différences d'évolution

de SST entre un point libre et un point non-libre juxtaposés. Ces prévisions sont celles de la version DBLE car il s'agit de l'expérience ayant produit des résultats sur la période la plus longue (environ 8 mois à ce jour). On constate que pour toutes les localisations à l'exception du pôle sud, les différences de SST entre le point non-libre et son homologue libre ont des ordres de grandeur équivalents, de l'ordre de quelques degrés.

L'enjeu est de pouvoir identifier si ces écarts de température semblent croître au fil du temps ou bien s'ils se stabilisent. Les points évalués au Venezuela par exemple, semblent présenter un biais croissant avec le temps. Si cette tendance persiste et que les prévisions du modèle de CMO1D libre s'éloignent trop de celles rappelées vers Mercator, l'erreur pourrait se propager via l'atmosphère et remettre en question la fiabilité des prévisions de la zone, voire la stabilité du système. Le couple de points choisi au pôle sud se trouve sous la banquise et présente particulièrement peu de différences de température du fait du faible rayonnement incident, ce qui a pour conséquence de stabiliser la SST pour le point libre et le point non-libre autour de -1.8°C . Ces légères différences de SST sont présentes à cause de l'absence de la modélisation de la banquise dans les interactions océan/atmosphère, décrite en partie 3.1 dont l'expérience DBLE ne bénéficie pas.

À ce stade, nous ne pouvons pas encore conclure sur une éventuelle divergence entre points libres et non libres. Ces tests seront ré-effectués dans quelques mois, lorsque l'expérience DBLE aura une profondeur temporelle plus importante.

4 Évaluation de la configuration retenue

De nombreux tests de sensibilité ont été réalisés et ont permis de conclure sur une nouvelle configuration du schéma océanique CMO1D. Nous allons maintenant évaluer les résultats de cette configuration qui tient compte de l'ensemble des choix établis durant cette étude, à savoir :

- appel du modèle de CMO1D à chaque pas de temps du modèle ARPEGE, soit toutes les 240 secondes (1.2) ;
- 26 niveaux verticaux, de 0.5m à 186m de profondeur (2.1) ;
- le coefficient de tuning originel de 10% appliqué aux albédos et à l'émissivité est supprimé et c'est la valeur d'albédo diffus du modèle Mercator qui est retenue $\alpha_{CMO1D.diffus} = \alpha_{Mercator.diffus} = 0.066$ (2.2) ;
- l'initialisation des courants u et v à 0 à prévision est pour l'instant conservée ;
- les paramètres de turbidité sont modifiés à $R = 0.55$, $D1 = 2.5$, $D2 = 32$ correspondant à une eau plus claire (2.3) ;
- prise en compte de la banquise dans le couplage océan-atmosphère (3.1).

Cette expérience sera appelée "NEW". Nous la lancerons sur deux périodes (octobre-novembre 2024 et juin 2025) pour parcourir le plus de situations possible, puis nous évaluerons la qualité de la SST de cette expérience en la comparant aux sorties Mercator et aux observations fournies par des bouées en mer. Dans un deuxième temps, nous évaluerons l'impact sur les prévisions atmosphériques en comparant nos résultats aux sorties du modèle IFS (modèle atmosphérique du CEPMMT) et aux données de radiosondages.

4.1 Comparaison à Mercator

Dans un premier temps, on se propose d'évaluer les éventuelles différences entre la configuration retenue du modèle de CMO1D et Mercator sur les deux périodes de prévision. Les figures 4.1 (a et f) montrent que l'on retrouve la dérive à la hausse de la SST de quelques dixièmes de degré en été, déjà observée en partie 2.3. En hiver (Fig. 4.1 b et e), on observe plutôt une tendance inverse avec un très léger biais froid de NEW par rapport à Mercator, de l'ordre de quelques centièmes de degré, ce qui constitue une amélioration par rapport à l'expérience DBLE. Le domaine Tropiques-Pacifique (Fig. 4.1 c et d) a été choisi comme exemple du fait de sa forte exposition au rayonnement solaire tout au long de l'année. On constate sur ce domaine une amplitude diurne de la SST plus faible par rapport aux prévisions Mercator, comme pour la DBLE. Si on regarde plus en profondeur, on note que la température au 12ème niveau montre plus de cohérence avec Mercator par rapport à l'expérience DBLE, quels que soient les domaines et saisons considérés, bien que l'on retrouve pour le domaine Tropiques-Pacifique une dérive de température à la hausse évoquée en partie 1.1.2. Finalement, ces trois domaines montrent de manière générale des améliorations de la NEW par rapport à la DBLE avec Mercator comme référence. Sur le domaine Europe, présenté en annexe Fig.D, on perçoit également une amélioration nette en été comme en hiver, en surface comme en profondeur.

La configuration retenue NEW constitue une amélioration par rapport à la version DBLE lorsque l'on compare leurs prévisions aux sorties du modèle Mercator. Ce résultat était plutôt attendu compte tenu du fait que nous avons modifié l'expérience propre REF en essayant de tendre vers Mercator comme modèle de référence. Cet objectif est globalement atteint, mais il ne représente pas une fin en elle-même et il est maintenant nécessaire d'effectuer la comparaison NEW vs DBLE avec des références indépendantes du système de prévision.

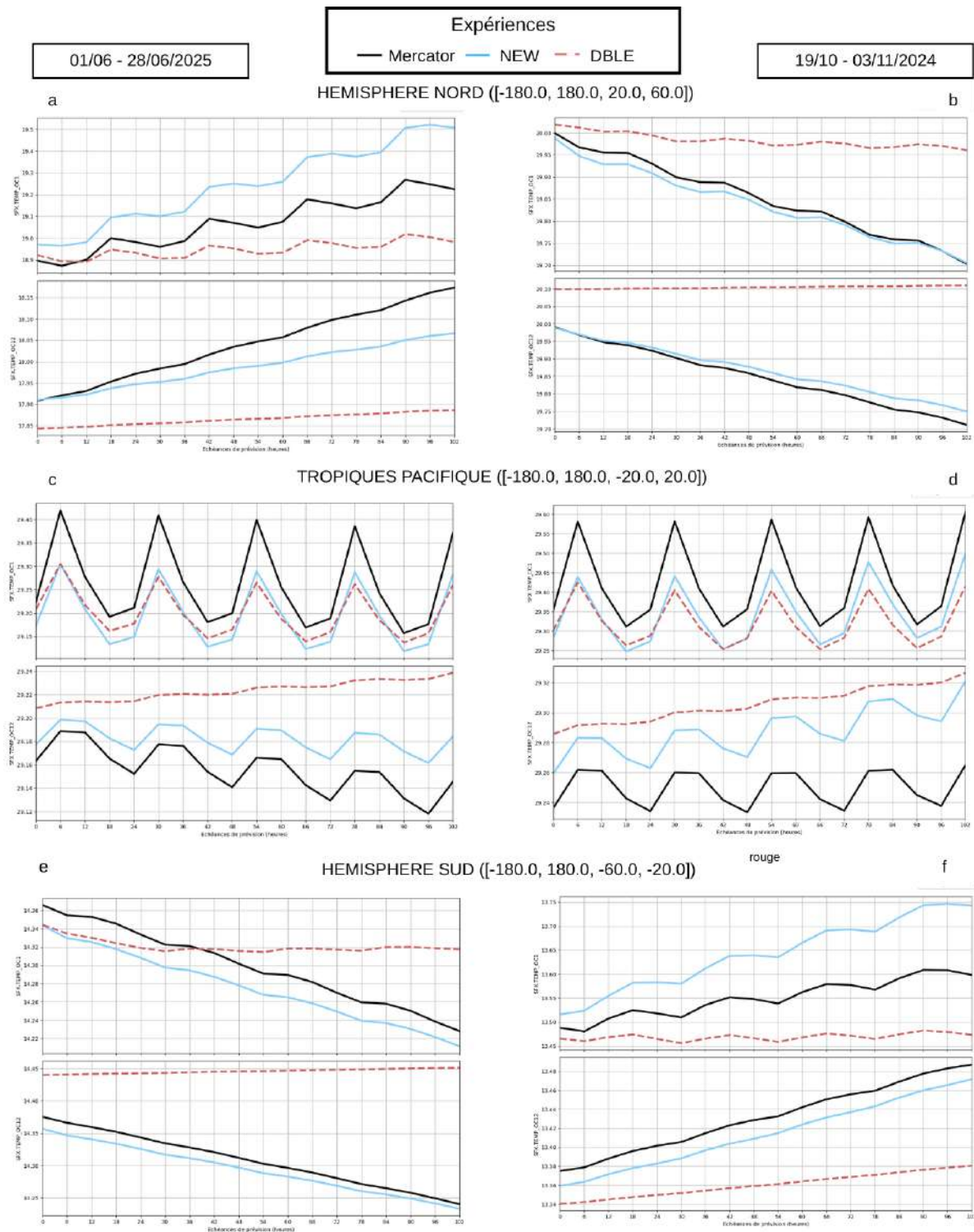


FIGURE 4.1 – Évolutions moyennes de la température aux 1er (50 cm) et 12ème (18.5 m) niveaux, de prévisions de 102 h entre le 1er et le 28/06/2025 (à gauche) et entre le 19/10 et le 03/11/2024 (à droite) sur les domaines Hémisphère Nord, Tropiques-Pacifique et Hémisphère Sud : Mercator (noir), la DBLE (tiretés rouges) et l'expérience avec la configuration retenue, NEW (courbe bleue).

4.2 Comparaison aux bouées

Cette nouvelle évaluation consiste à comparer les résultats obtenus par nos expériences (NEW et DBLE) aux valeurs mesurées par les bouées présentes en mer. Pour les trois domaines présentés sur la figure 4.2, on constate que les écarts-types des deux expériences ne présentent pas de différences significatives, chaque courbe se trouvant dans l'intervalle de confiance de l'autre. Concernant les biais à 102 h, celui de la NEW ($\sim 0.16^\circ\text{C}$) est plus faible que celui de la DBLE ($\sim -0.27^\circ\text{C}$) sur le domaine NORD20. Le domaine SUD20 montre des résultats similaires avec un biais légèrement moins important de la NEW et des écarts-types similaires. À l'inverse, sur le domaine TROPICQUES, on observe un biais légèrement plus important de la NEW ($\sim 1.05^\circ\text{C}$) par rapport à la DBLE ($\sim 0.9^\circ\text{C}$), bien que cette différence ne soit pas significative.

De manière globale, les résultats des comparaisons aux mesures des bouées sur les autres domaines sont semblables à ceux obtenus sur NORD20 et SUD20, c'est-à-dire un biais plus faible que celui de la DBLE et des différences non significatives d'écarts-types.

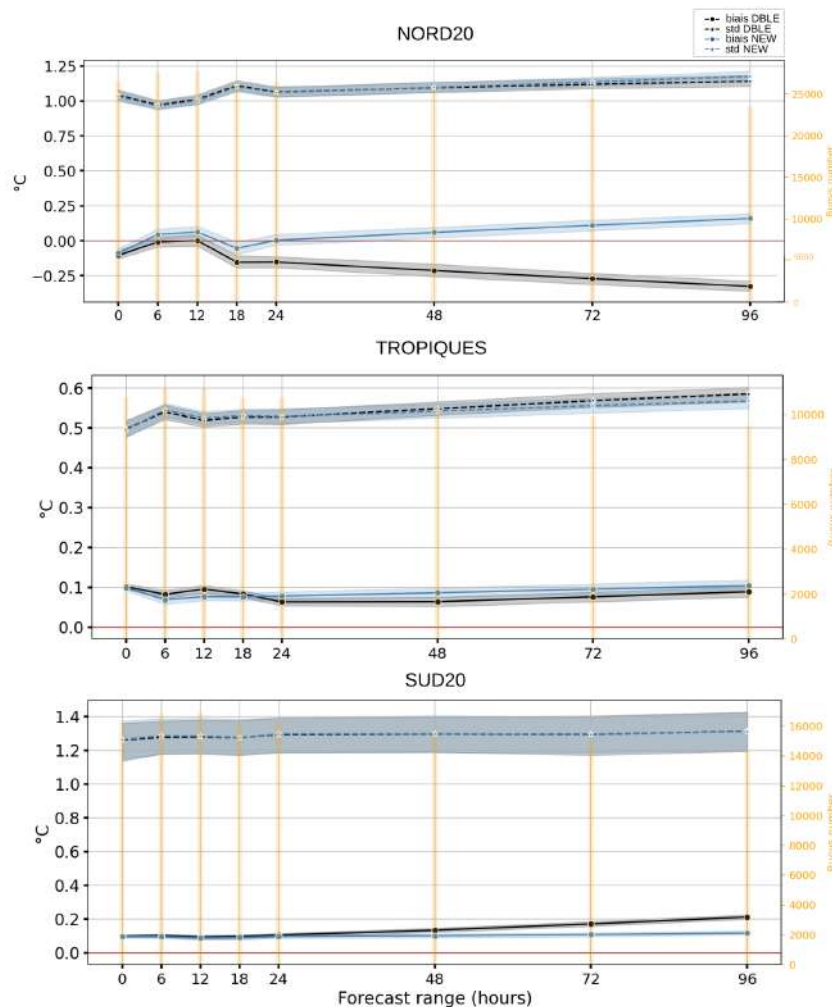


FIGURE 4.2 – Biais en traits pleins et écarts-types en traits pointillés entre les expériences (DBLE en noir et NEW en bleu) et les mesures des bouées sur la période 01 - 27/06/2025 pour les domaines NORD20 (en haut), TROPICQUES (au milieu) et SUD20 (en bas). L'axe vertical de droite indique la quantité de bouées retenues pour évaluer la CMO1D, représentée par les barres verticales jaunes, à chaque réseau.

4.3 Comparaison aux données atmosphériques : IFS et radiosondages

Compte tenu du fait que cette étude s'inscrit dans le cadre de l'amélioration du modèle ARPEGE qui est un modèle de prévision atmosphérique, il est indispensable d'évaluer l'impact de nos modifications sur les phénomènes météorologiques et pas seulement sur la température de l'océan. C'est pourquoi nous évaluons maintenant l'impact des modifications du modèle de CMO1D sur l'atmosphère.

Les références de comparaison prises dans cette partie seront les mesures de radiosondages et les analyses IFS du modèle du centre européen. Ces deux sources de données sont indépendantes du modèle ARPEGE et sont considérées comme étant les meilleures estimations disponibles des variables atmosphériques qu'elles fournissent. La figure 4.3 présente les différences relatives de la racine carrée des erreurs quadratiques moyennes de température entre la DBLE et la NEW par rapport à ces deux sources de données.

Les domaines présentés montrent des améliorations (en bleu) de la NEW par rapport à la DBLE. On note globalement des améliorations en surface alors qu'en altitude, on observe une dégradation par rapport à la DBLE, notamment sur le domaine TROPIQUES (c,d). Le domaine NORD20 (a,b) présente des résultats similaires avec de meilleurs résultats de la part de la NEW et le domaine SUD20 (e,f) présente des résultats plus contrastés avec une tendance globale neutre. On observe une tendance semblable mais moins prononcée sur la seconde période de prévision octobre-novembre 2024, les scores sont effectués sur 25 jours (cf. annexe E). Ces améliorations en surface représentent un résultat très satisfaisant étant donné que la CMO1D vise à améliorer la modélisation de l'interface océan/atmosphère.

Les dégradations observées en altitude au-delà de 8000 m, notamment sur le domaine Tropiques (Fig.4.3,d), sont certainement issues du changement de température de surface via le rayonnement thermique. À ce stade, l'intérêt est d'améliorer la surface et la basse atmosphère et cette dégradation sera à reconfirmer lors de la construction de la prochaine version opérationnelle.

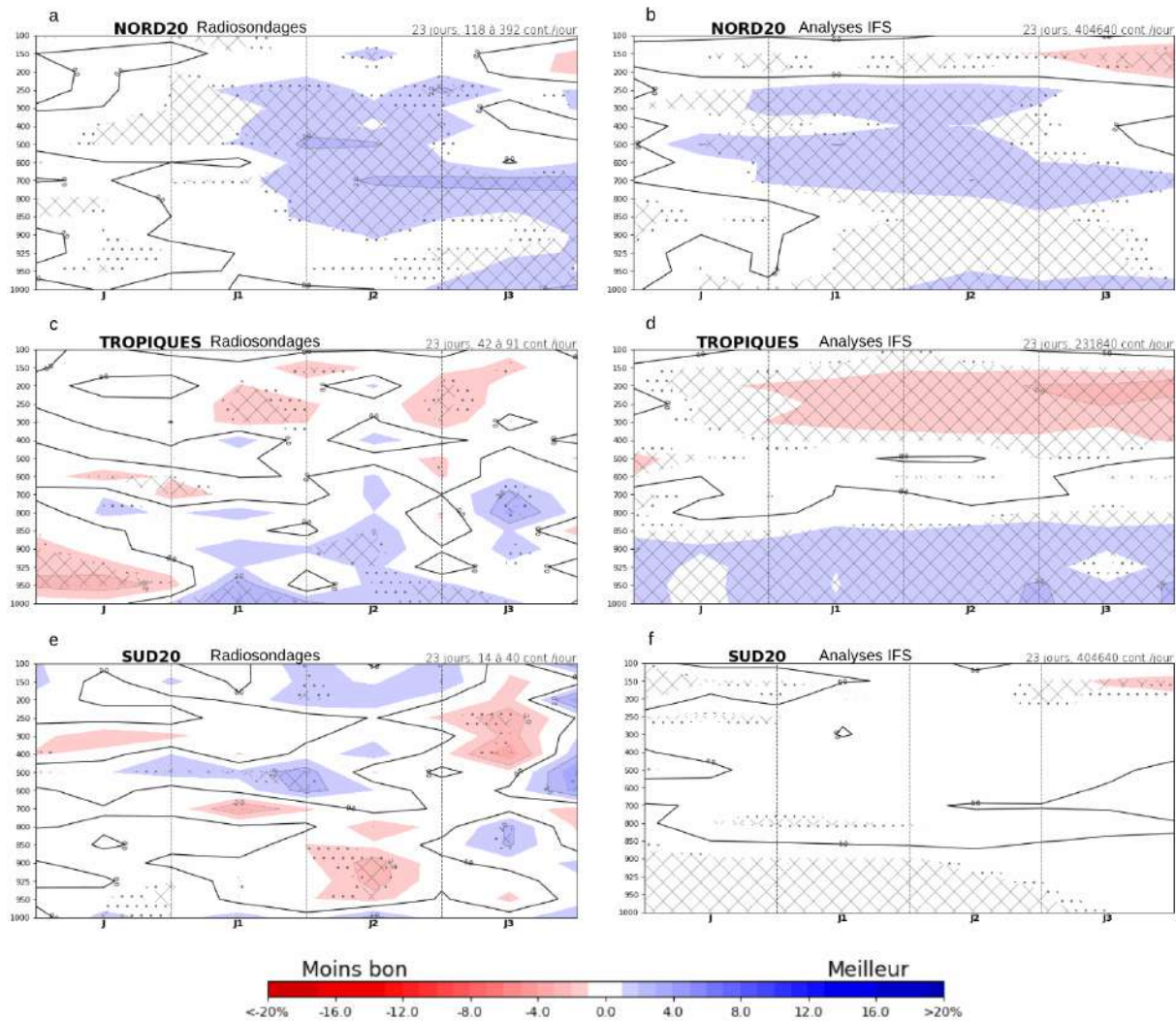


FIGURE 4.3 – Différence relative de REQM (racine de l'erreur quadratique moyenne) entre la nouvelle configuration NEW et l'expérience DBLE ; calculée par rapport aux radiosondages (à gauche - a,c,e) et aux analyses IFS (à droite - b,d,f) pour le domaine Nord20 (a,b), le domaine Tropiques (c,d) et le domaine Sud20 (e,f) sur le mois de juin 2025. En ordonnée les niveaux de pression atmosphérique, en abscisse les échéances de prévision en jours.

5 Étude de cas - le cyclone Chido

Afin de mettre en évidence les différences de prévisions de la température de l'eau entre la nouvelle version (NEW) du modèle de CMO1D et la DBLE, nous proposons d'étudier le cas du cyclone Chido. De catégorie 4 sur l'échelle de Saphir-Simpson, il a frappé Mayotte le 14/12/2024, occasionnant des dégâts matériels et humains considérables [8]. Un cyclone puise son énergie en grande partie dans l'océan et refroidit ce dernier via les 4 processus physiques suivants :

- **L'évaporation.** À cause des forts vents en surface, les eaux chaudes s'évaporent plus facilement et l'air chaud, chargé d'humidité, entame un mouvement convectif vers les couches supérieures de l'atmosphère. Ce transfert de chaleur latente de l'océan vers l'atmosphère refroidit la SST.
- **Le brassage vertical due à l'énergie cinétique turbulente.** L'équation 1.4 met en évidence l'impact des courants $\mathbf{u}$, forcés par le vent en surface (Eqn. 1.12, sur l'énergie cinétique turbulente, responsable du brassage de la CMO. De forts vents donneront lieu à un brassage important.
- **Le phénomène d'upwelling.** Ce dernier désigne une remontée des eaux de profondeurs sous l'effet d'un déplacement horizontal des masses d'eau de surface, par le vent. Cependant, la CMO1D étant un modèle unidimensionnel, les phénomènes d'advections et donc d'upwelling n'y sont pas représentés. La modélisation de ces phénomènes est actuellement en cours de développement et représente un challenge d'un point de vue technique puisqu'il s'agit de représenter des phénomènes bidimensionnels au sein d'un modèle monodimensionnel.
- **La température de l'eau de pluie.** Celle-ci est susceptible de faire baisser la température de l'océan même si son effet sur la SST est bien plus faible que celui des phénomènes précédents. Cependant, la température de la pluie n'est pas diagnostiquée dans le modèle ARPEGE. Cet effet ne peut donc pas être modélisé dans l'état actuel des choses.

Le couplage ARPEGE/CMO modélise 2 de ces 4 phénomènes physiques responsables du refroidissement de surface. Grâce aux modifications de la NEW, nous sommes capables de mieux représenter les effets de l'évaporation et du brassage lié à l'énergie cinétique turbulente, notamment grâce à la correction de la fréquence d'appel de la CMO1D dans ARPEGE. La figure 5.1 représente les différences de SST entre l'expérience NEW et l'expérience DBLE le 12/12/2024. Notons que la tâche de refroidissement observée entre les îles Farquhar et Madagascar ne correspond pas exactement à la position du cyclone prévue par ARPEGE à ce moment-là. En effet, ce dernier a déjà poursuivi sa course vers l'ouest, comme le montrent les cartes de vents présentées en annexe F. Après le passage du cyclone, on constate que l'océan est plus froid avec la version NEW, comme le montre la figure 5.1. On observe une différence de température allant jusqu'à plus de 1° C.

Prévision du 12/12/2024 à 96h

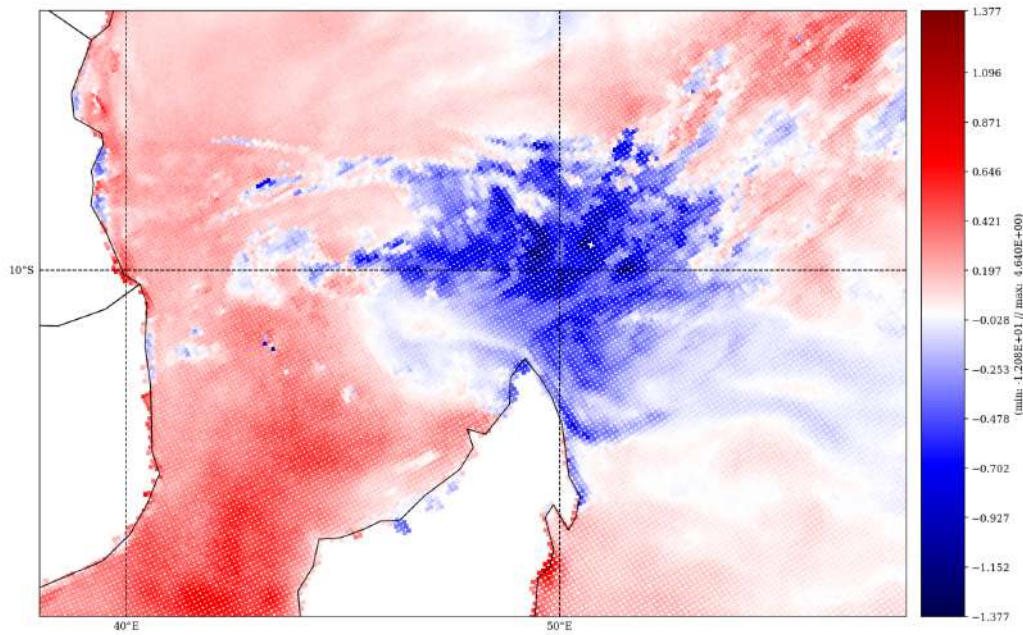


FIGURE 5.1 – Différences de SST entre les prévisions de la NEW et celles de la DBLE à l'échéance 96 h pour la prévision du 12/12/2024.

La figure 5.2 montre l'évolution des températures au 12ème niveau de profondeur en un point choisi sur la trajectoire du cyclone sur plusieurs réseaux successifs. On constate que l'expérience NEW (courbe tiretée rouge) représente mieux le phénomène de refroidissement de l'eau attendu au passage du cyclone, que l'expérience DBLE (courbe bleue). On observe une différence de 0.3°C sur ce point entre le 12 et le 13 décembre. Mercator affiche aussi ce refroidissement, tandis que la DBLE présente une température en légère hausse au fil des prévisions, sans épisode de baisse.

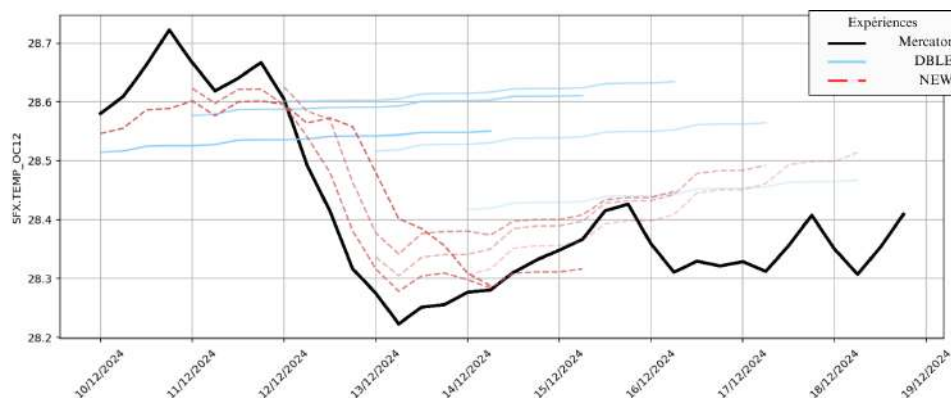


FIGURE 5.2 – Évolution de la température au 12ème (18.5 m) niveau, de 5 jours (du 10 au 14/12/2024) de prévisions consécutives de 102 h sur le point de coordonnées (Lat : -10 ; Lon : 53) : Mercator (noir), la DBLE (bleu) et la NEW (rouge)

Cette nouvelle version semble avoir le potentiel pour permettre une meilleure représentation des effets couplés associés aux cyclones. Ceci est à confirmer dans la continuité de ce stage à l'aide d'autres diagnostics et de plusieurs autres cas d'étude.

Conclusion et retour sur expérience

5.1 Conclusion sur l'étude

Afin de mieux modéliser les interactions océan-atmosphère dans le modèle de prévision météorologique ARPEGE, un modèle de couche de mélange océanique a été activé lors de la dernière montée de version opérationnelle (version DBLE). Celui-ci permet de prendre en compte les rétroactions négligées jusqu'ici. C'est-à-dire que les températures de surface de la mer étaient constantes au fil d'une prévision. Suite à cela, un bug a été découvert provoquant le sous-appel de ce modèle. Il a été montré que l'utilisation du modèle CMO1D restait positive pour ARPEGE, même si son potentiel était sous-exploité. L'objectif de cette étude est alors, après correction de ce bug, de reparcourir les choix de configuration faits lors de la première activation du modèle afin de les confirmer ou bien d'en faire de meilleurs.

Pour ce faire, la première étape est de construire une version propre et cohérente du modèle de CMO1D d'un point de vue physique et d'un point de vue du couplage avec ARPEGE. Sur la base de la version DBLE, nous construisons une expérience de référence nommée REF en 1) supprimant le coefficient de tuning de 10% appliqué à l'albédo et à l'émissivité et 2) en ajustant le pas de temps d'appel de la CMO1D par ARPEGE.

Ensuite, en utilisant comme référence les prévisions de température de l'eau de surface fournies par le modèle 3D de Mercator-Océan, nous remarquons que, d'une part, les amplitudes du cycle diurne produites par l'expérience REF sont trop importantes, et d'autre part qu'au cours de la prévision, la tendance est au développement d'un biais chaud sur la totalité des domaines étudiés.

Nous avons alors effectué des tests de sensibilité sur les paramètres et variables du modèle suivant afin de tenter de corriger ces anomalies :

- nombre de niveaux ;
- albédo ;
- turbidité ;
- état initial des courants.

Concernant le nombre de niveaux, la version DBLE en considère 12, soit une profondeur d'environ 18 m. L'étude ayant donné lieu à la version DBLE, menée avec un pas de temps d'appel erroné, avait conclu que le bénéfice apporté par davantage de niveaux n'était pas suffisant par rapport à la quantité de données stockées supplémentaires. Après différents tests, nous concluons que la modélisation de 26 niveaux est plus pertinente et apporte une réelle amélioration de la prévision de température grâce à la prise en compte des eaux plus froides venant des profondeurs. Ces niveaux supplémentaires participent à atténuer le biais chaud de température.

À l'inverse, le modèle de CMO1D ne montre que très peu de sensibilité aux différentes paramétrisations de l'albédo testées. Il y a finalement peu d'incertitude sur ce

paramètre et, puisque les tests sont faits dans des gammes de valeurs réalistes, les sorties du modèle ne présentent que de faibles différences. Nous faisons donc le choix de conserver la paramétrisation de Taylor pour l'albédo direct et de nous aligner sur la valeur d'albédo diffus utilisée par Mercator $\alpha_{Merc} = 0.066$, 10% supérieure à celle utilisée dans la DBLE.

Le paramètre auquel le modèle s'est révélé être le plus sensible est la turbidité. Dans le modèle de CMO1D, la turbidité est constante en temps et en espace et est définie par une paramétrisation basée sur une fonction en exponentielle décroissante et 3 paramètres. Les tests effectués sur ces derniers nous ont menés à faire un nouveau choix de paramètres correspondant à une turbidité plus claire que celle utilisée dans la DBLE, située entre 'Eau Claire' et 'Eau Très Claire' selon : Jerlov, 1968 [5] et Kraus, 1994 [6], ce qui permet une diffusion de l'énergie solaire plus en profondeur. Afin de poursuivre l'amélioration du modèle, il serait judicieux d'opter pour une paramétrisation de turbidité variable dans le temps et l'espace, plus cohérente avec les disparités réellement observables dans l'océan. L'impact d'une telle modification pourrait s'avérer significatif, compte tenu de la sensibilité de la CMO1D à ce paramètre.

Le dernier test de sensibilité porte sur la mise en place du cyclage des courants. En effet, dans la DBLE, les valeurs des composantes de courants horizontaux u et v ne sont pas sauvegardées entre deux prévisions et sont réinitialisées à 0 à chaque début de prévision car leur impact sur la SST a été jugé trop faible par rapport à l'espace de stockage additionnel nécessaire (+30%). Cette conclusion avait été tirée sur la base d'une version du modèle avec un pas de temps d'appel erroné et nous avons donc réévalué cet impact. En utilisant la dernière valeur des composantes u et v d'un réseau de prévision pour initialiser le suivant, on constate un impact local sur les différences de SST prévues, mais nul en moyenne sur les grands domaines et très faible sur les variables atmosphériques. Pour cette raison, nous choisissons pour l'instant de ne pas conserver cette paramétrisation dans l'expérience finale.

La configuration NEW finalement retenue prend en compte toutes ces modifications ainsi que la modélisation de l'effet de la glace de mer dans le couplage océan-atmosphère qui n'avait pas été considérée jusqu'alors et qui limite le rayonnement thermique émis par l'océan grâce à un effet "couvercle".

Finalement, les différences avec la version DBLE sont résumées dans le tableau suivant :

Expérience	Appel du modèle CMO1D	Nbr de niveaux	Albédo Direct	Albédo Diffus	Turbidité	Courants	Glace de mer
DBLE	1200 s (erroné)	12	Taylor, 1996 [4] Coeff. tuning : +10%	0.06 Coeff. tuning : +10%	Eau claire (cf. tab 2.1)	non cyclés	Non prise en compte
NEW	240 s (corrigé)	26	Taylor, 1996 [4]	0.066	PARAM2 (cf. tab 2.1)	non cyclés	Prise en compte

Afin d'évaluer si la version NEW du modèle de CMO1D représente une amélioration par rapport à la DBLE, nous avons comparé les prévisions de ces deux versions à plusieurs

références différentes. Tout d'abord, la NEW prévoit des SST plus en cohérence avec le modèle Mercator que la DBLE, ce qui était espéré. Concernant les prévisions atmosphériques du modèle ARPEGE, nous avons comparé les prévisions réalisées avec la NEW et la DBLE aux données de radiosondages et aux analyses du modèle du centre européen IFS. Dans les deux cas, les prévisions effectuées grâce au couplage ARPEGE/NEW montrent des améliorations assez nettes par rapport au couplage ARPEGE/DBLE, en particulier sur la température des premiers 3000 m de l'atmosphère.

Bien que les améliorations obtenues soient franches, ce modèle de CMO1D pourrait encore être amélioré, notamment via une paramétrisation variable de la turbidité en temps et en espace. Par ailleurs, l'effet du cyclage des courants lors d'événements atmosphériques impliquant des vents intenses reste à évaluer plus en profondeur.

5.2 Retour sur expérience

Chercher la configuration de tous les leviers d'un modèle qui offrirait un fonctionnement optimal était une démarche nouvelle et très intéressante à découvrir pour moi. Je suis satisfait que ce modèle de couche de mélange offre des résultats de prévisions meilleurs que la version antérieure (DBLE), même s'il peut encore être amélioré. La paramétrisation de la turbidité reste notamment un filon intéressant à exploiter et pourrait sensiblement améliorer les prévisions.

D'un point de vue technique, je salue l'utilité et la performance des chatbots d'IA génératives lorsqu'il s'agit de créer du code. J'ai compris que pour s'en servir efficacement, il est crucial d'avoir une idée limpide de ce que l'on veut réaliser, de la construction des fichiers de données en entrée des algorithmes, de la forme des objets de sortie, etc. De surcroît, il est indispensable de pouvoir l'expliquer à l'écrit clairement dans le prompt envoyé au chatbot. J'encourage vivement le DAE et Polytech en général à intégrer ces outils au sein de la formation et à apprendre aux étudiants à s'en servir avec discernement, en n'oubliant pas de mentionner toutes les dérives, questions éthiques et enjeux de consommation de ressources que ces systèmes soulèvent. Dans ce processus, j'incite également les enseignants à se placer dans une position d'échange et d'apprentissage mutuel avec les élèves. Comme pour toute nouvelle technologie, la jeune génération se l'approprie souvent plus rapidement que les autres.

Ce stage aura été une expérience très enrichissante à bien des égards. En premier lieu, j'avais à cœur de découvrir davantage l'univers de l'ingénierie de recherche et de retourner vers les sciences de la Terre, déjà explorées au cours de ma licence. Ces 6 mois ne m'auront pas déçu de ce point de vue. J'ai dû remobiliser des connaissances mathématiques et physiques théoriques et monter en compétences dans le développement d'algorithmes.

Par ailleurs, j'ai également compris ce qui comptait pour moi en tant que scientifique durant ce stage. En effet, la météorologie présente quelques différences avec l'aménagement et l'environnement, mais celle qui m'a le plus marqué, et manqué, est la prise en compte du facteur social dans les processus de conception, qui représente un des fondements du DAE. J'ai besoin que mon travail scientifique soit mis au service des enjeux humains

en intégrant toujours les sciences naturelles pour lesquelles je garde encore un très fort intérêt. Ajoutons à ça une bonne louche d'éco-anxiété et on obtient le domaine dans lequel j'aimerais orienter ma carrière professionnelle : la résilience climatique des milieux urbains.

Ces lignes sont les dernières de mon cycle ingénieur et peut-être de mes études (si je ne fais pas de thèse... rien n'est moins sûr). J'en profite pour remercier Carole et Adrien de m'avoir accompagné pendant ce stage et pour leur patience et leur pédagogie. Je remercie aussi Cindy pour son aide précieuse sur son modèle de CMO1D et sur les interprétations physiques des résultats des expériences.

Un grand merci à vous, Séraphine, pour votre soutien et votre bienveillance depuis la 4A à travers mon projet de recherche et mes stages. C'était très agréable d'apprendre à vos côtés¹ ! Je remercie aussi Kamal, Francis et Julie au DAE pour leur accompagnement et leur écoute.

Ainsi s'achève ce rapport, j'espère que vous aurez aimé le parcourir !

1. Félicitations pour votre arrivée à Toulouse!!! À bientôt j'espère :)

Bibliographie

- [1] Bougeault, P., & Lacarrere, P. (1989). Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. *Monthly weather review*, 117(8), 1872-1890.
- [2] Lebeaupin Brossier, C., Ducrocq, V., & Giordani, H., *Two-way one-dimensional high-resolution air-sea coupled modelling applied to Mediterranean heavy rain events.*, Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society, 2008.
- [3] Gaspar , P., Grégoris, Y., and Lefevre, J.-M. *A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing : Tests at station Papa and long-term upper ocean study site*, Journal of Geophysical Research : Oceans, 1990.
- [4] Hignett, P., & Taylor, J. P. *The radiative properties of inhomogeneous boundary layer cloud : Observations and modelling*. Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society, 1966.
- [5] Jerlov, N.G, *Volume 5 : Optical Oceanography*, 1968
- [6] Kraus, E. B., & Businger, J. A. (1994). *Atmosphere-ocean interaction* (Vol. 27). Oxford University Press.
- [7] Ormières, L., *Evaluation of the activation of a 1D Oceanic Mixed Layer model in the chain of ARPEGE global weather prediction*, Rapport de stage de Master, 2023.
- [8] Qu'est ce qu'un cyclone ? | Météo-France. (s. d.). <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/comprendre-la-meteo/quest-ce-quun-cyclone>
- [9] Paulson, C. A., & Simpson, J. J., *Irradiance Measurements in the Upper Ocean*, AMETSOC, 1977.
- [10] Séférian, R., Baek, S., Boucher, O., Dufresne, J.-L., Decharme, B., Saint-Martin, D., and Roehrig, R. : An interactive ocean surface albedo scheme (OSAv1.0) : formulation and evaluation in ARPEGE-Climat (V6.1) and LMDZ (V5A), *Geosci. Model Dev.*, 2018

Annexe A Tableau de discrétisation de la colonne d'eau en niveaux

Niveau	Profondeur (en m)
1	0.494025
2	1.541375
3	2.645669
4	3.819495
5	5.078224
6	6.440614
7	7.92956
8	9.572997
9	11.405
10	13.46714
11	15.81007
12	18.49556
13	21.59882
14	25.21141
15	29.44473
16	34.43415
17	40.34405
18	47.37369
19	55.76429
20	65.80727
21	77.85385
22	92.32607
23	109.7293
24	130.666
25	155.8507
26	186.43415

Annexe B Tableau de correspondance des domaines et leurs coordonnées

Domaine	Lon. min	Lon. max	Lat. min	Lat. max
GLOBAL	-180.0	180.0	-90.0	90.0
EUROPE	-10.0	28.0	25.0	70.0
FRANXL	-6.0	10.5	41.0	51.5
AFRIQUE	-19.0	52.0	-35.0	37.0
AUS-NZ	112.0	154.0	-44.0	-10.0
AMNORD	-168.0	-55.0	10.0	70.0
AMSUD	-82.0	-35.0	-56.0	12.0
TROPIQUES_PACIF_EST	100.0	180.0	-20.0	20.0
TROPIQUES_INDIEN	45.0	100.0	-20.0	20.0
TROPIQUES_ATL	-48.0	6.0	-20.0	20.0
TROPIQUES	-180.0	180.0	-20.0	20.0
HN_20_40	-180.0	180.0	20.0	40.0
HN_40_60	-180.0	180.0	40.0	60.0
HN_20_60	-180.0	180.0	20.0	60.0
NORD20	-180.0	180.0	20.0	90.0
NORD-POLAIRE	-180.0	180.0	60.0	90.0
SUD-POLAIRE	-180.0	180.0	-90.0	-60.0
HS_-20_-60	-180.0	180.0	-60.0	-20.0
MEDITER	-5.5	41.5	30.0	46.5
ATLNORD	-55.0	-11.5	0.0	58.5
AROM_INDIEN	29.0	68.0	-25.0	-2.0
PACIF_E	140.0	180.0	10.0	35.0
PACIF_NW	-180.0	-120.0	0.0	50.0
PACIF_SW	-180.0	-80.0	-50.0	0.0

Annexe C Scores aux analyses IFS et radiosondages : CYCL VS REF-cour

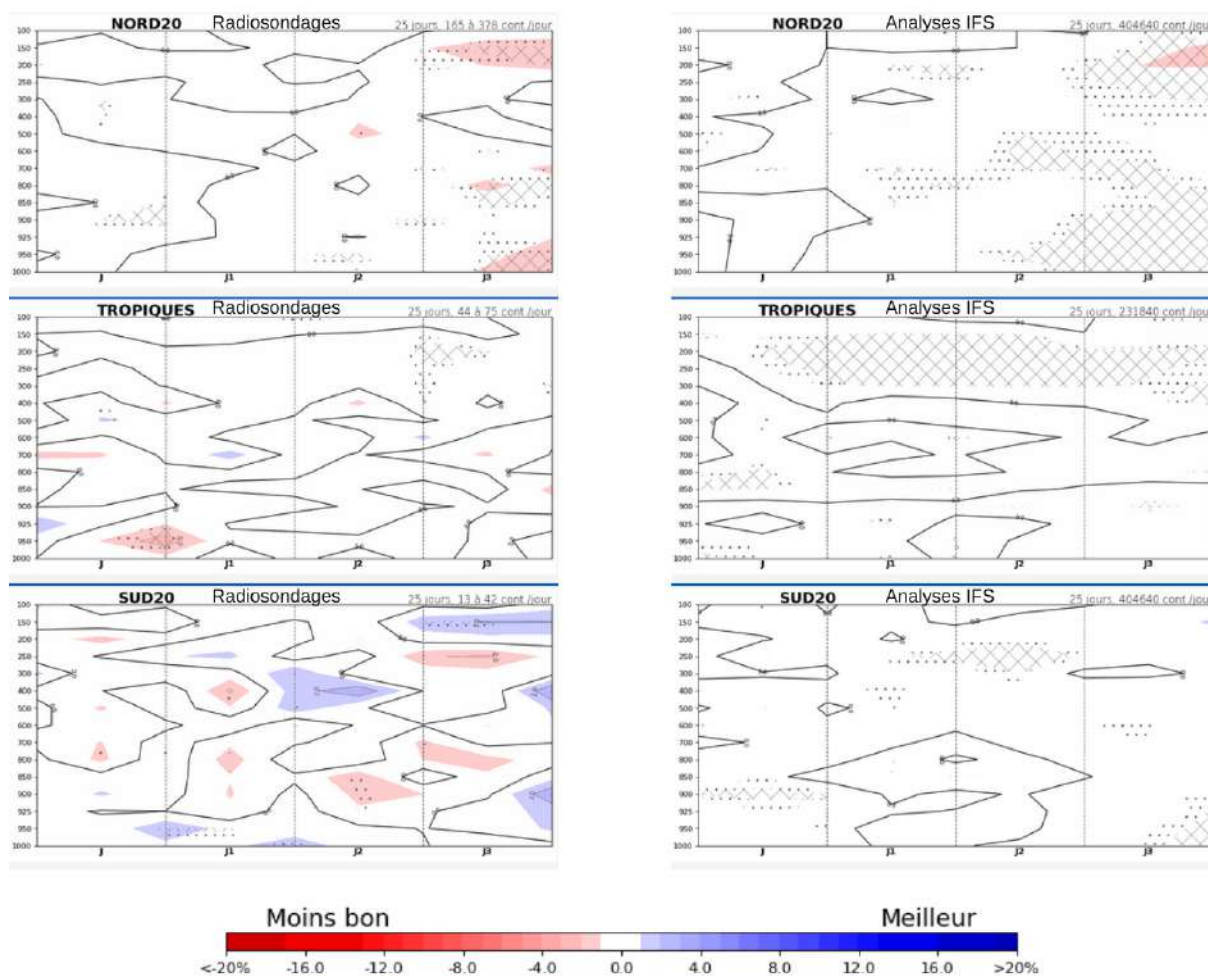


FIGURE C.1 – Différence relative de REQM (racine de l'erreur quadratique moyenne) entre l'expérience avec les courants cyclés CYCL et de l'expérience avec les courants non cyclés REFcour ; calculée par rapport aux radiosondages (à gauche) et aux analyses IFS (à droite) pour le domaine Nord20 (haut), le domaine Tropiques (milieu) et le domaine Sud20 (bas) sur le mois de juin 2025. En ordonnée les niveaux de pression atmosphérique, en abscisse les échéances de prévision en jours.

Annexe D Différentes prévisions de SST sur le domaine EUROPE

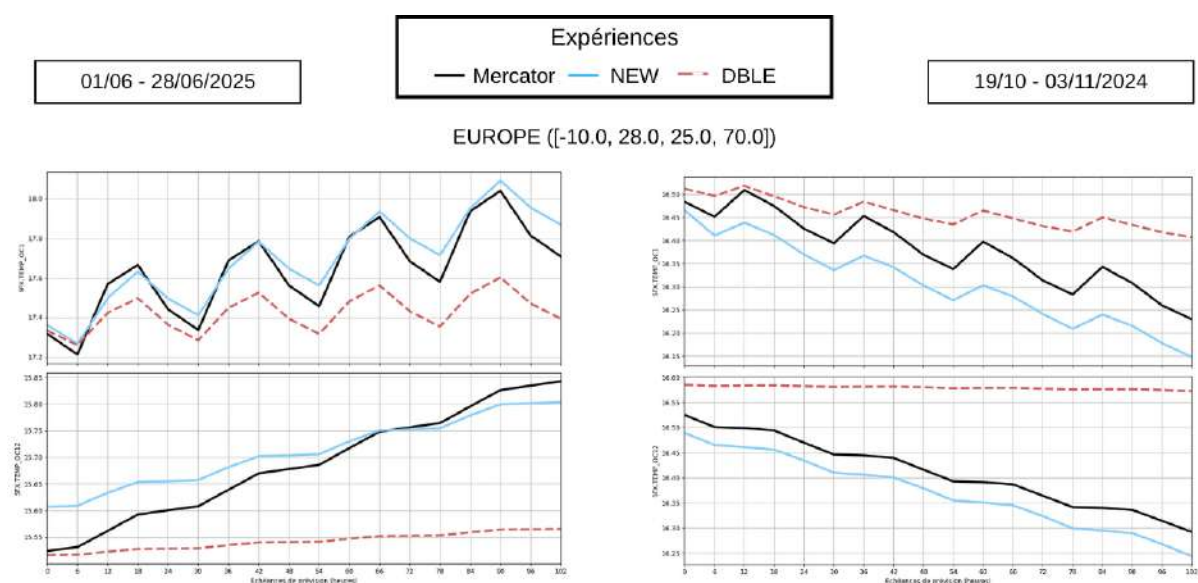


FIGURE D.1 – Évolutions moyennes de la température aux 1er (50cm) et 12ème (18.5m) niveaux, de prévisions de 102h entre le 1er et le 28/06/2025 (à gauche) et entre le 19/10 et le 03/11/2024 (à droite) : Mercator (noir), la DBLE (rouge) et l'expérience avec la configuration retenue, NEW (bleu) sur le domaine EUROPE

Annexe E Scores aux analyses IFS et radiosondages : NEW vs DBLE

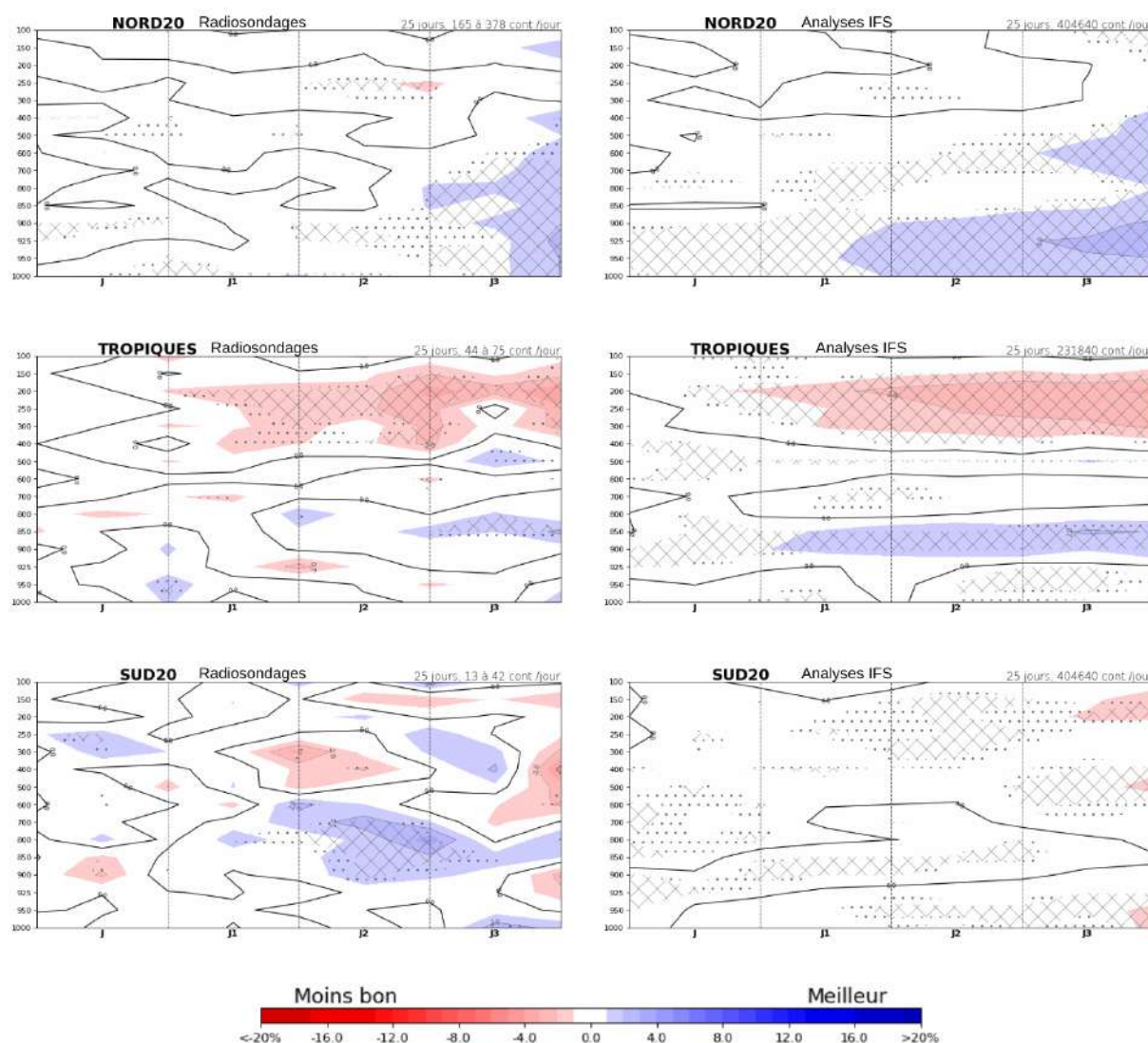


FIGURE E.1 – Différence relative de REQM (racine de l'erreur quadratique moyenne) entre l'expérience NEW et la DBLE; calculée par rapport aux radiosondages (à gauche) et aux analyses IFS (à droite) pour le domaine Nord20 (haut), le domaine Tropiques (milieu) et le domaine Sud20 (bas) sur les mois d'octobre et novembre 2024 (25 jours). En ordonnée les niveaux de pression atmosphérique, en abscisse les échéances de prévision en jours.

Annexe F Position du cyclone Chido, localisé par ses vents de surface le 16/12/2024

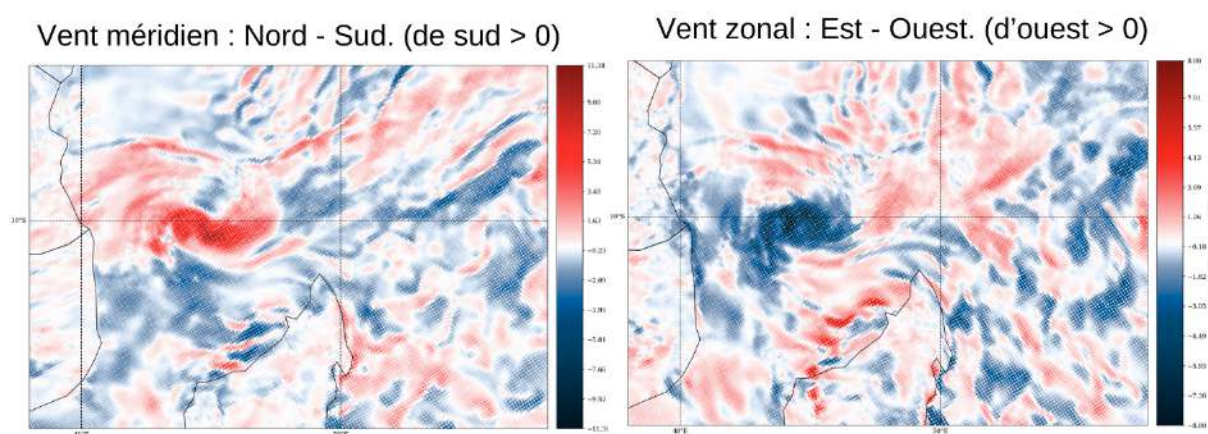


FIGURE F.1 – Vent méridien (à gauche) et vent zonal (à droite) de surface au passage du cyclone Chido, dans la prévision ARPEGE du réseau 0h du 12/12/2024, au term 96h.