



Apport des données Copernicus à la modélisation hydrodynamique côtière

Hafedh HAJJI¹, Florian BREHIN², Vincent THOUVENIN¹, Romain LEGRAS²

1. GLOBOCEAN, 45 avenue de la première armée, 83 300 Draguignan, France.

2. CREOCEAN, 230 avenue de Rome, 83 500 La Seyne-sur-Mer, France.

Résumé :

Les réanalyses et les prévisions de circulation océanique produites par le programme de l'Union européenne Copernicus couvrent l'ensemble des océans avec des résolutions spatiales de plus en plus importantes. Elles peuvent être utilisées comme conditions aux limites du modèle hydrodynamique Telemac3D permettant ainsi une étude appropriée des conditions de circulation à des échelles spatiales très fines.

Des méthodes ont été développées afin de les intégrer dans un modèle hydrodynamique adapté à l'étude des processus côtiers. L'apport de ces données est montré à travers un exemple d'utilisation dans le Golfe de Fos-sur-Mer (13) et les résultats de la modélisation sont confrontés à des observations in-situ.

Mots-clés :

Hydrodynamique, Courant, Température, Salinité, Vent, Réanalyse, Analyse, Prévision, Downscaling.

1. Introduction

Le programme de l'Union européenne Copernicus (anciennement GMES acronyme de Global Monitoring for Environment and Security) collecte et restitue des données de qualité et actualisées de manière continue portant sur l'état de la Terre. Plus particulièrement, le site <https://data.marine.copernicus.eu/products> fournit des données océanographiques issues de la modélisation de la circulation générale et dont la résolution spatiale est de plus en plus importante. Des réanalyses, analyses et prévisions de la circulation océanique couvrent l'ensemble du globe et peuvent être utilisées en tant que telles ou en condition aux limites pour des applications côtières.

L'objectif principal de ce papier est de montrer à travers un exemple concret comment ces données peuvent alimenter en conditions initiales et aux limites le modèle hydrodynamique tridimensionnel (Telemac3D) et améliorer ainsi les sorties de ce modèle pour obtenir une résolution très fine en zone côtière (downscaling).

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

2. Matériels et méthodes

2.1 Site d'étude

Le site d'étude correspond au Golfe de Fos-sur-Mer, dans le département des Bouches-du-Rhône. Situé à l'intérieur du Golfe du Lion, il s'agit d'une région très complexe dans la mesure où plusieurs phénomènes intenses et très variables coexistent : circulation générale avec l'embouchure du Rhône à proximité et le canal de Caronte (jonction avec l'étang de Berre, courants de densité thermo-halins, up et down-welling, courant d'inertie induits par le vent (MILLOT & WALD, 1981 ; MILLOT 1990, ULSES 2002 et ULSES *et al.*, 2005). Le site a également la particularité d'avoir fait l'objet de plusieurs campagnes de mesures in-situ de courant, température et salinité lors de missions de suivi du milieu marin, permettant ainsi de valider les sorties du modèle.

2.2 Mise en œuvre du modèle Hydrodynamique Telemac 3D

Deux modèles couplés de la suite TELEMAC (TOMAWAC pour la modélisation de la propagation des vagues et TELEMAC3D pour la courantologie) ont été mis en œuvre à l'échelle du Golfe de Fos-sur-Mer. Les modèles sont forcés sur le plan atmosphérique par des historiques continus des paramètres de vent et de pression issues du modèle Copernicus sur une période de 6 mois. L'objectif de ces modèles est de décrire les phénomènes physiques afin d'analyser le fonctionnement hydrodynamique du site et ainsi comprendre les mécanismes de courantologie et déplacement de masses d'eau. Des mesures de courant, température et salinité sont exploitées pour la validation du modèle. A titre d'exemple, ce genre de modèle peut par la suite être utilisé dans le cadre de projets de rejets industriels afin d'en étudier l'impact sur l'environnement.

2.2.1 Maillage et bathymétrie

Les limites du modèle sont définies entre le large de la Pointe de Carro et de la plage de Beauduc et s'étendent sur 20 km d'Ouest en Est et sur 20 km du Nord au Sud. Ces limites se justifient notamment pour examiner le régime de vents dominants de secteur ONO/NO à Est. Les tailles de maille varient de 600m au large à 20 m près de la côte. Elles ont été raffinées à 7m au niveau de certains ouvrages côtiers pouvant influencer sensiblement l'écoulement. Les données bathymétriques ont été constituées à partir de la carte publiée par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine - SHOM (Golfe de Fos et Port de Fos Carte N°6684). La Figure 1 illustre l'emprise du modèle implémenté sur le Golfe de Fos et les profondeurs associées à la grille de calcul.

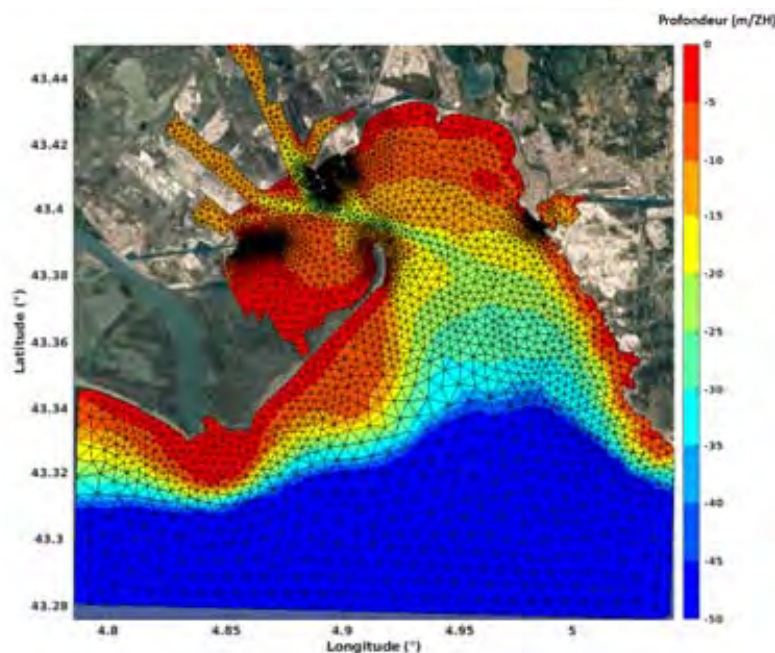


Figure 1. Maillage non-structuré utilisé par le modèle Telemac3D.

2.2.2 Configuration du modèle hydrodynamique

Les principales caractéristiques du modèle Telemac3D sont récapitulées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques physiques du modèle Telemac3D.

Paramètres	Caractéristiques
Résolution Spatiale	de 600m à 7m
Nombre de niveaux verticaux	11
Résolution temporelle	5s
Frottement sur le fond	Loi de Nikuzadse avec un coefficient de 0.01m
Modèle de turbulence horizontale	Constant

2.2.3 Conditions initiales et aux limites de température et de salinité

Les sorties de réanalyses Copernicus du modèle de prévision de la circulation océanique en Mer Méditerranée (Med-Currents), disponibles avec un pas de temps d'une heure pendant la période des mesures, avec une résolution horizontale de $1/24^\circ$ et comprenant 141 niveaux verticaux, ont été utilisées afin de définir aux conditions aux limites du modèle les caractéristiques de la température et de la salinité de la mer dans la colonne d'eau ainsi que la variation du niveau moyen de la surface de la mer.

Les figures suivantes illustrent sur le point de grille du modèle Med-Currents le plus proche de la limite sud de l'emprise du modèle, les profils de températures et de salinité moyennes de la mer sur la colonne d'eau pour les mois de juin, juillet, août, septembre et octobre 2022.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

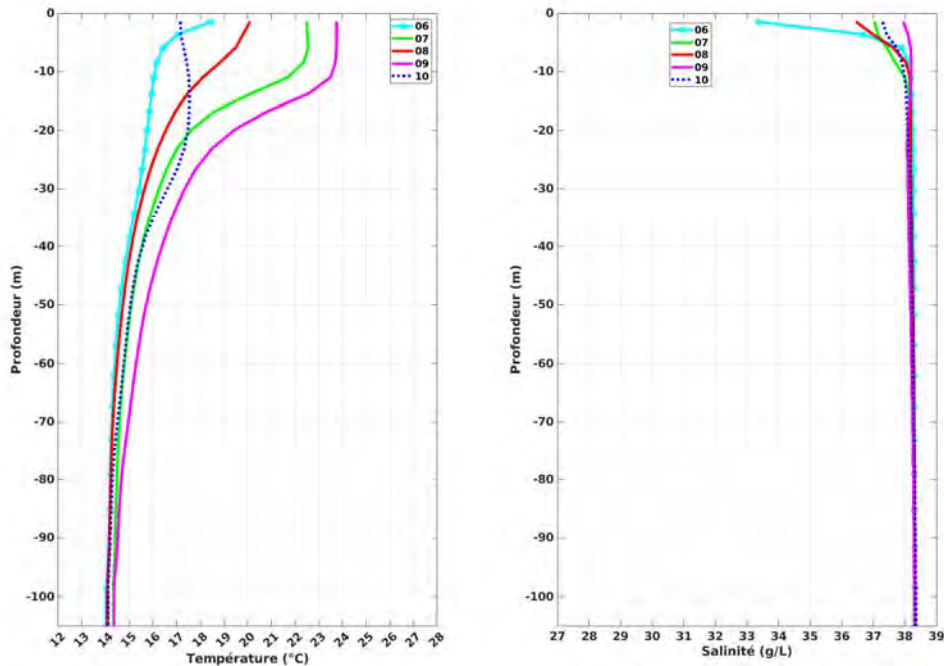


Figure 2. Profils verticaux de la température (à gauche) et de la salinité (à droite) de la mer pour les mois de juin, juillet, août, septembre et octobre 2022 (Lon= 4.9583°E, Lat= 43.3125°N).

Les résultats de l'importation des champs de température et de salinité dans la grille de calcul Telemac3d sont illustrés Figures 3 et 4. Ces champs constituent l'état initial du modèle hydrodynamique au 1^{er} juin 2022.

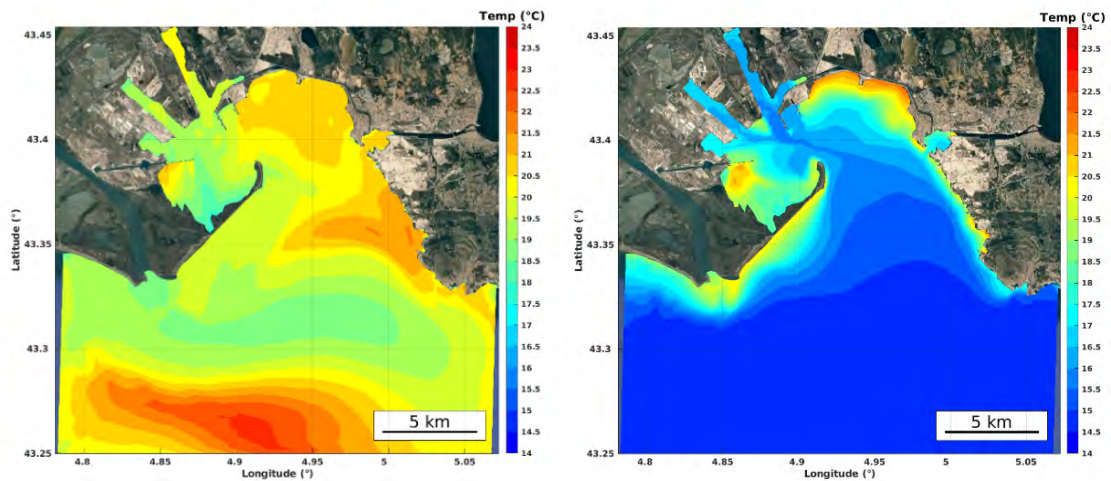


Figure 3. Champs de température en surface (gauche) et au fond (droite) initiés par Copernicus et importés sur l'emprise du modèle Telemac3D.

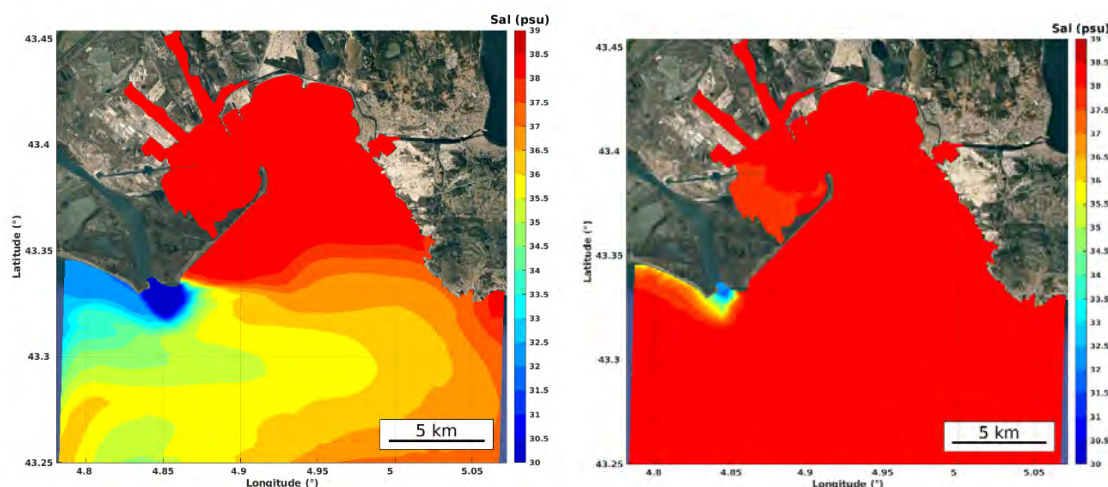


Figure 4. Champs de salinité en surface (gauche) et au fond (droite) initiés par Copernicus et importés sur l'emprise du modèle Telemac3D.

Ainsi, Telemac3D est initié par les champs issus des sorties Copernicus. Lors des simulations sur plusieurs jours ou mois, seuls les points situés en condition aux limites du modèle seront mis à jour toutes les heures par les sorties du modèle Copernicus Med Currents.

2.2.4 Echanges avec l'atmosphère

Les échanges thermiques atmosphère-océan ont été pris en compte à travers les effets du vent, de la température de l'air, de la pression atmosphérique et de l'humidité relative grâce à la suite WAQTEL de Telemac. Ces données ont été extraites des analyses du modèle atmosphérique américain CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) avec une résolution spatiale de 30km environ et temporelle d'une heure. Un seul point de grille a été extrait, il a été appliqué à l'ensemble du domaine en considérant ces paramètres constants spatialement sur ce domaine. Les figures suivantes illustrent les séries historiques de vent (force et direction), de température et d'humidité relative à 2m du niveau de la mer ainsi que de pression atmosphérique, de mai à octobre 2022 inclus.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

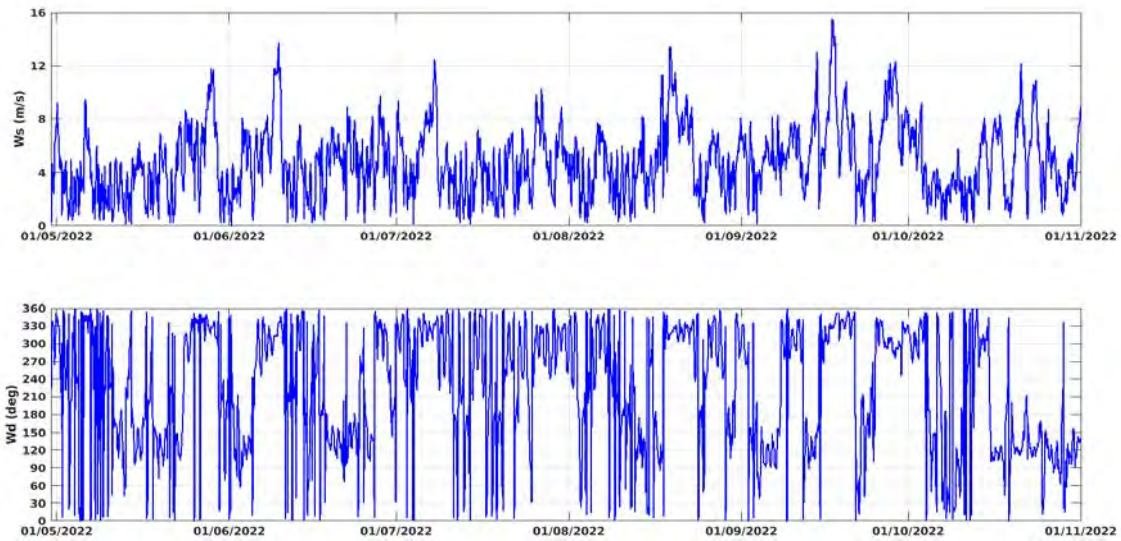


Figure 5. Séries temporelles de vitesse et direction du vent appliquées en forçage atmosphérique.

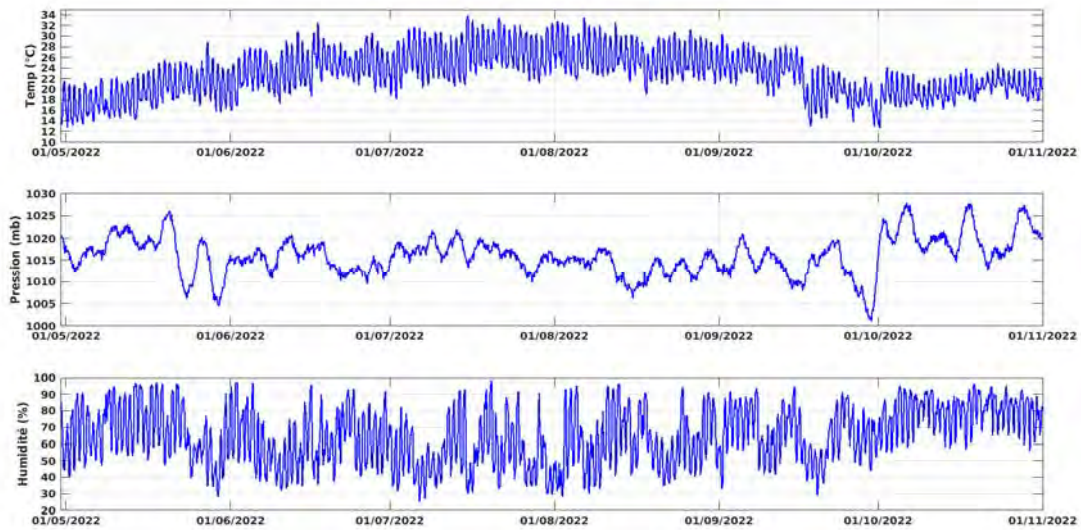


Figure 6. Séries temporelles de température de l'air, pression atmosphérique et humidité relative à 2m d'altitude appliquées en forçage atmosphérique.

2.2.5 Apports d'eau douce

Plusieurs études (ULSES, 2002, ULSES *et al.*, 2005, MARSALÉIX *et al.*, 1998, NERINI *et al.*, 2000 et ESCUDIER *et al.*, 2020) ont montré que les apports d'eau douce dans le Golfe de Fos peuvent provenir essentiellement :

- Du Nord, par un canal qui relie le Rhône au Golfe de Fos via la darse n°1,
- Du Sud, par un courant côtier qui conduit le panache du Rhône le long du They de la Gracieuse,
- De l'Est, à travers le canal de Caronte, effectuant la jonction avec l'Etang de Berre.

De plus, la localisation et l'extension des eaux superficielles dessalées sont fonctions des forçages atmosphériques, du débit du Rhône (NERINI *et al.*, 2000), du débit du canal de Caronte et des marées (ESCUDIER *et al.*, 2020).



Figure 7. Sources d'apport d'eau douce dans le Golfe de Fos.

Dans la présente étude, seul le débit du Rhône a été pris en compte, et ce en utilisant ses effets directs sur la température et la salinité de la mer au niveau de l'embouchure du Rhône via les sorties du modèle de circulation Med-Currents (voir Figures 4 et 5). Les débits du canal du Rhône et du canal de Caronte sont très secondaires par rapport au débit du Rhône et ont en conséquence été négligés dans la modélisation. Les courants de marée ont également été négligés vis-à-vis des autres sources de courants beaucoup plus significatives.

2.3 Mesures in situ

Dans le cadre de projets de suivi du milieu marin réalisées par CREOCEAN, des mesures courantologiques ont été réalisées lors d'une campagne de mesure in situ, à l'aide de deux courantomètres de type ADCP (Acoustic Current Profiler) Workhorse Sentinel de marque Teledyne RD Instruments. Ces ADCP ont été déployés en mode « bottom mount » - posés sur le fond - pendant trois périodes de 2 mois en deux points précis. Deux lignes de sondes STPS (NKE Instrumentations) destinées à mesurer la température et la salinité dans la colonne d'eau ont été posées sur les bouées de surface de chacun des ADCP. Chaque ligne est équipée de 3 capteurs, en surface, à mi-hauteur d'eau et au fond. La salinité est obtenue par calcul à partir de la mesure de la conductivité et de la température de l'eau de mer.

3. Résultats

Le modèle Telemac3D ainsi configuré a été exécuté sur une période de 6 mois. Les figures suivantes (voir Figure 8) illustrent des exemples de sortie des champs de courant, de température et de salinité.

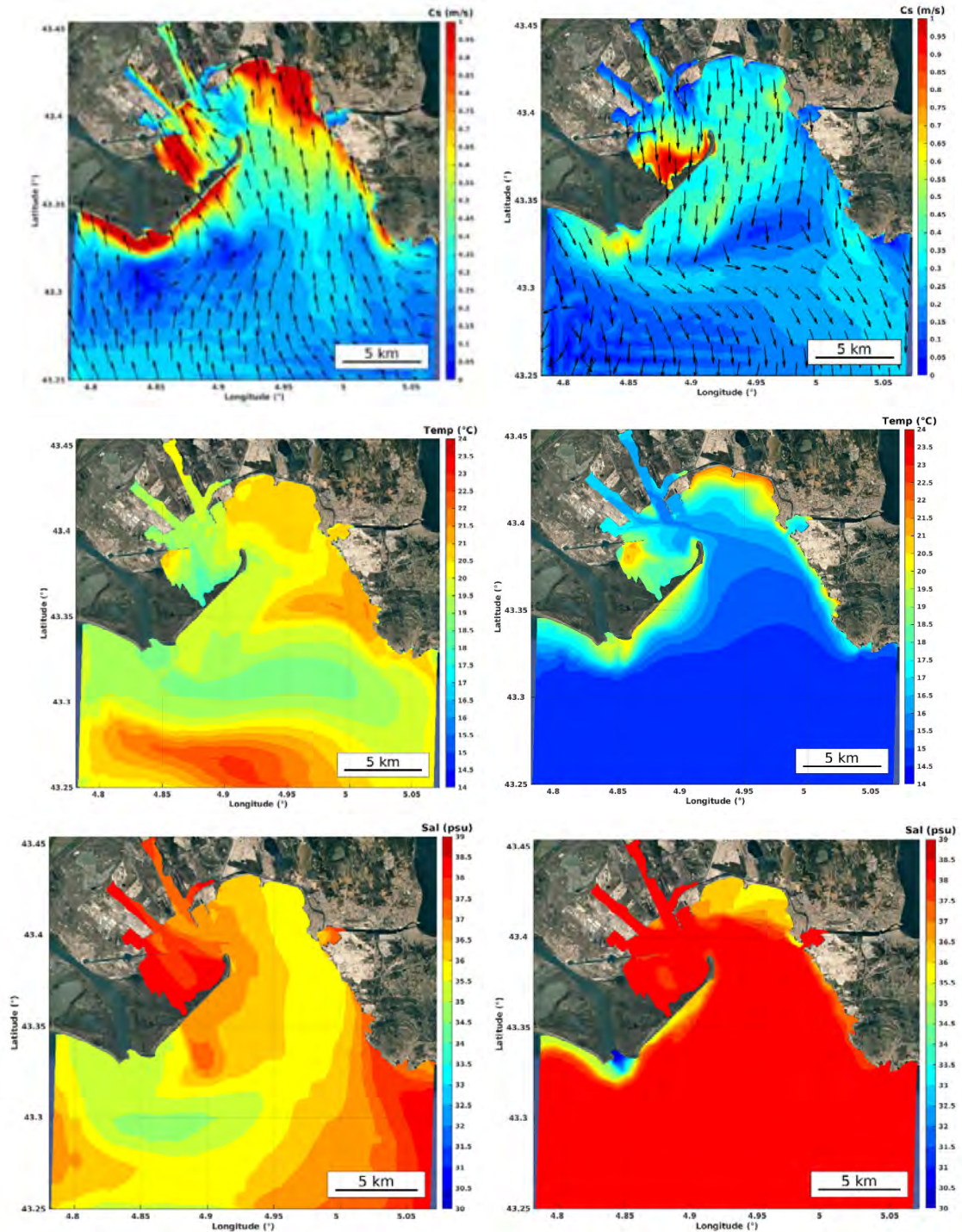


Figure 8. Champs de courant (figures du haut), température (milieu) salinité (bas) en surface (gauche) et au fond (droite) simulés après 3 jours par le modèle Telemac3D.

3.1 Validation du modèle hydrodynamique 3D

Afin de valider le modèle hydrodynamique Telemac3D, les mesures de température et de courant en un point situé à l'intérieur du Golfe de Fos pendant la durée des simulations ont été exploitées. Les figures suivantes (voir Figures 9 et 10) illustrent les comparaisons des séries de température pour les 3 niveaux d'observations (en surface, à mi-profondeur et au fond).

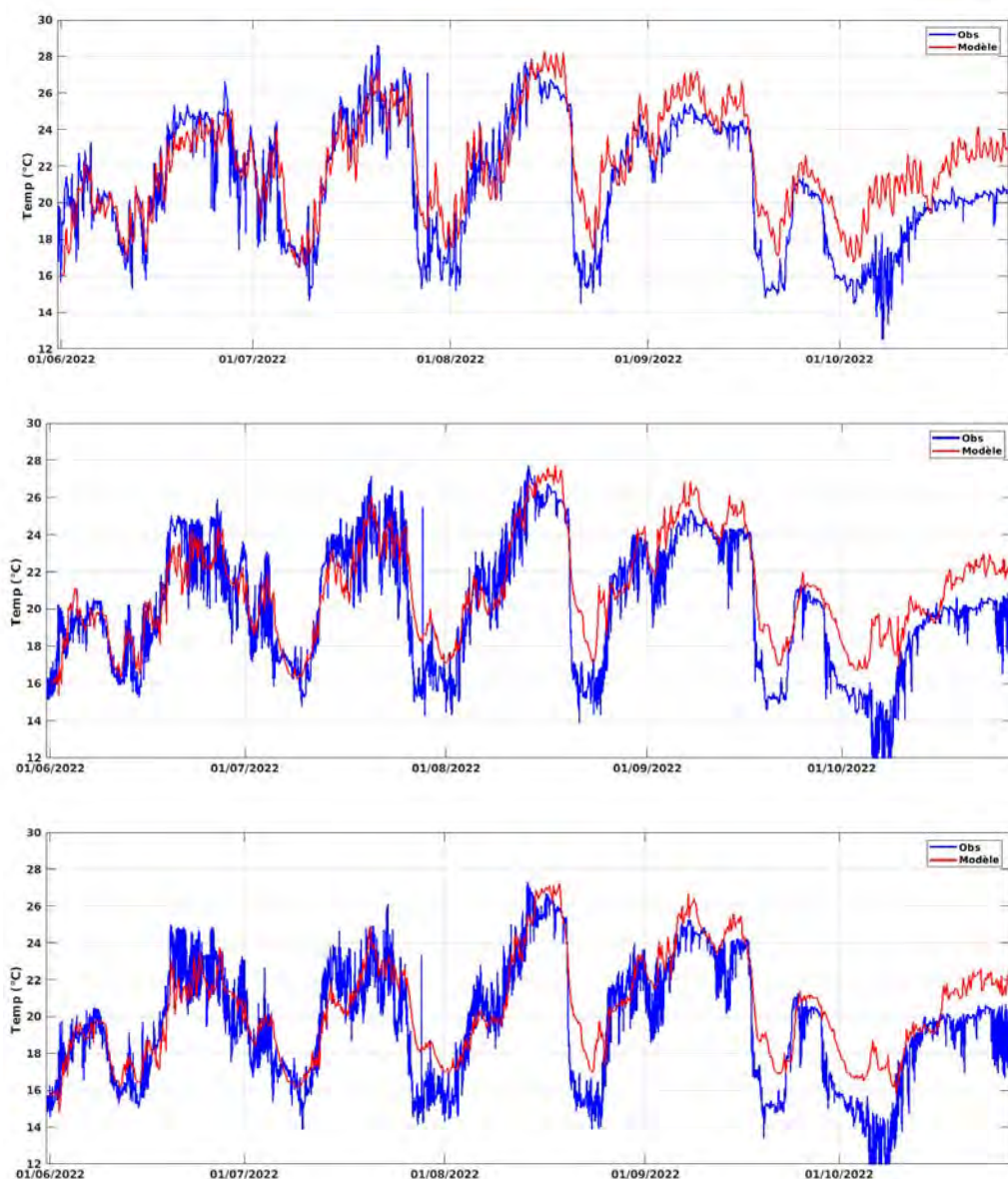


Figure 9. Comparaison des sorties du modèle de la température de l'eau en surface, à mi profondeur et au fond aux observations.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

L'analyse des observations met en évidence une forte corrélation entre les baisses de température de l'eau et l'occurrence de situations de vents forts en provenance de terre (Mistral).

Les corrélations avec le vent sont clairement visibles en juxtaposant les séries de vent utilisées en forçage atmosphérique du modèle.

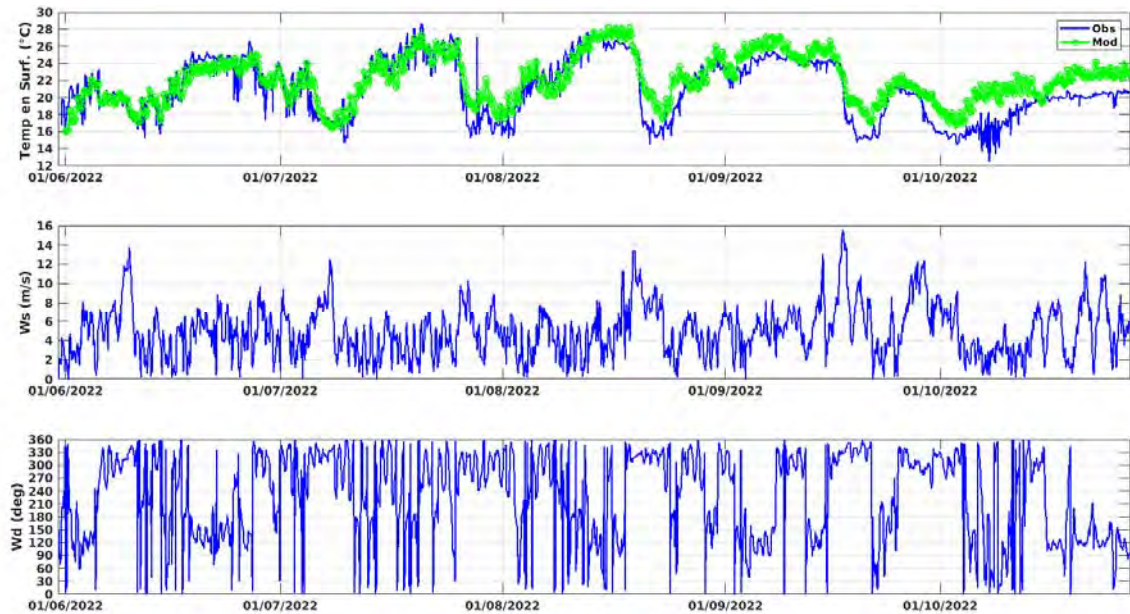


Figure 10. Température en surface (figure du haut) observée et modélisée, vitesses (milieu) et direction du vent (bas) issues des analyses des champs de vent CFSR.

Les figures suivantes (Figure 11) présentent les résultats de comparaison statistiques sur l'ensemble des 6 mois de courant en surface des sorties du modèle hydrodynamique aux observations réalisées en un point situé à l'intérieur du Golfe de Fos.

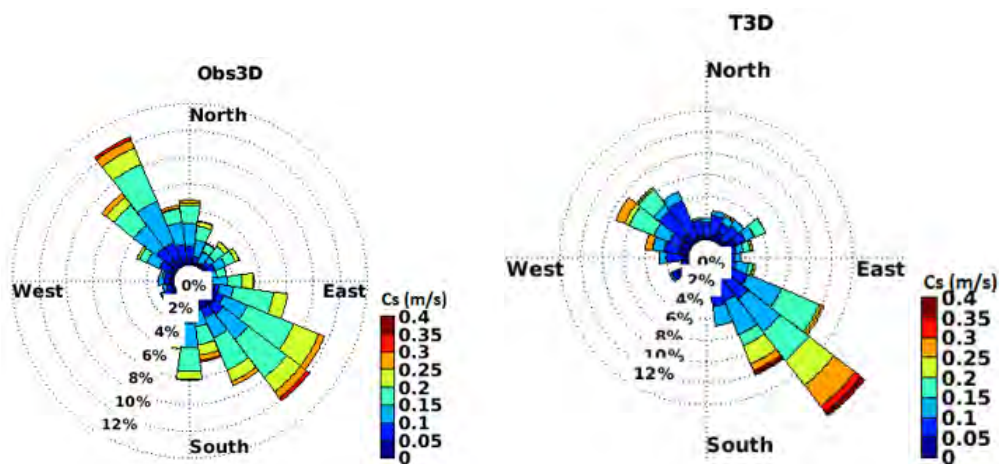


Figure 11. Comparaisons des roses de courant de surface observé et simulé en un point situé à l'intérieur du Golfe de Fos.

4. Conclusions

Un modèle hydrodynamique 3D a été mis en œuvre dans le Golfe de Fos-sur-Mer afin de montrer l'apport des données du modèle de circulation global Copernicus à la modélisation des processus côtiers. Pour ce faire, une procédure permettant d'extraire et d'importer les données de température, de salinité et de niveaux d'eau à partir des sorties du modèle Med-Currents dans une configuration du modèle Telemac3D est mise en place.

Le modèle a ensuite été configuré afin de prendre en considération toutes les forçages atmosphériques et hydrauliques utiles à la simulation du comportement hydrodynamique du Golfe de Fos, relativement complexe : vent, circulation générale, apports fluviaux. Les ouvrages côtiers ont également été introduits dans le modèle qui a été raffiné à leur proximité, ceux-ci pouvant influencer significativement la circulation localement. Les résultats des simulations de Telemac3D ont été ensuite comparés aux observations de température et de courant sur plusieurs niveaux verticaux, sur un point à l'intérieur du Golfe de Fos. Les résultats de ces comparaisons sont jugés très satisfaisants, le modèle local implémenté Telemac3D reproduisant fidèlement les variations de courants et de température au cours des 6 mois analysés.

5. Références bibliographiques

- ESCUDIER R., CLEMENTI E., OMAR A., PISTOIA J., PINARDI N. (2020). *Mediterranean Sea physical reanalysis (CMEMS MED-Currents) (Version 1) set*. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1
- MARSALEIX P., ESTOURNEL C., VEHL R. (1998). *A numerical study of the formation of the Rhône River plume*. Journal of marine systems, 14 (1-2), 99-115. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(97\)00011-0](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(97)00011-0)
- MILLOT C. (1990). *The gulf of Lions' hydrodynamics*. Continental shelf research, 10 (9-11), 885-894. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(90\)90065-T](https://doi.org/10.1016/0278-4343(90)90065-T)
- MILLOT C., WALD L. (1981). *Upwelling in the Gulf of Lions*. Coastal upwelling, 1, 160-166. <https://minesparis-psl.hal.science/hal-00463839>
- NERINI D. (2000). *Analyse statistique de processus physiques et chimiques en océanologie côtière à l'aide d'une méthode de régression et de classification par arbre décisionnel, application à l'étude d'un milieu : l'Etang de Berre*. Ph.D. Thesis, Université de la Méditerranée Aix Marseille II, France, 105 p.
- ULSES C. (2002). *Modélisation de la circulation dans le golfe de Fos*. Rapport de DEA, Université de la Méditerranée, 43 p.
- UISES C., GRENZ C., MARSALEIX P., SCHAAFF E., ESTOURNEL C., MEULE S., PINAZO C. (2005). *Circulation in a semi-enclosed bay under influence of strong freshwater input*. Journal of Marine Systems, 56 (1-2), 113-132. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.02.001>

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière