

MASTER SCIENCES DE LA MER

Parcours : Océanographie Physique et Biogéochimique

Nathan KIENZT

*Étude du Couplage Physique-Biologie aux Fines Échelles par
Échantillonnage Lagrangien*

Rapport de stage réalisé au sein du laboratoire : *Institut Méditerranéen
d'Océanologie (M.I.O.)*

Sous la direction de : *Andrea Doglioli, Gérald Grégori et Monique Messié (MBARI)*

Année Universitaire : 2021–2022

Remerciements

Ce stage a été financé par le programme TOSCA du CNES dans le cadre du projet SWOT-AdAC (www.swot-adac.org).

Je tiens à remercier chaleureusement mes encadrants Andrea Doglioli, Gérard Grégori et Monique Messié pour leur gentillesse, leur disponibilité et leur confiance. Ce stage aura été très épanouissant et captivant de bout en bout !

Je tenais également à remercier Melika Baklouti et Francesco D'Ovidio pour leurs précieux conseils.

Merci également Melitotus Thyssen et Gérard Grégori pour leurs formations à la cytométrie en flux et à l'analyse des données cytométriques.

Je remercie enfin le MIO pour m'avoir permis de réaliser ce stage et l'équipe OPLC pour son accueil, ainsi que mes collègues stagiaires et doctorants qui, par leur bonne humeur et leurs traits d'humour, ont aussi contribué au bon déroulement de ce stage.

"Le commencement de toutes les sciences, c'est l'étonnement de ce que les choses sont ce qu'elles sont.", *Métaphysique*, Aristote

Table des matières

1	Introduction	2
2	Matériel et Méthode	4
2.1	Zone d'étude	4
2.2	Communauté phytoplanctonique	5
2.3	Ariane et Ariane 2D	7
2.4	Données disponibles	7
2.5	Traitements statistiques préliminaires des données	8
2.6	Carte d'initialisation du modèle	9
2.7	Estimation du flux de phosphate à la base de la couche de mélange (MLD)	10
2.8	Tests "physiques" du modèle	11
2.8.1	Advection des particules	11
2.8.2	Advection de la SST	11
2.8.3	Advection des abondances initiales	11
2.9	Tests "biologiques" du modèle	12
2.9.1	Modèle biologique	12
2.9.2	Couplage de l'advection et du modèle de plancton	14
3	Résultats	14
3.1	Relations entre abondance et variables	14
3.2	Estimation de la biomasse correspondante à l'abondance	15
3.3	Cartes des biomasses initiales	15
3.4	Tests physiques du modèle à particules Lagrangiennes	16
3.4.1	Advection simple des particules	16
3.4.2	Advection de la SST	17
3.4.3	Advection des biomasses et comparaison avec les biomasses mesurées <i>in situ</i>	18
3.5	Résultats du modèle à particules Lagrangiennes couplé au modèle de plancton	19
3.5.1	Paramétrisation du modèle en configuration 1D	19
3.5.2	Advection des particules avec le modèle bio	19
3.5.3	Advection des particules avec modèle bio température dépendant	19
4	Discussion	21
4.1	Apports des résultats physiques et biologiques	21
4.2	Limitation de l'étude et améliorations possibles	22
5	Conclusion	24
	Références	25

1 Introduction

La circulation océanique à fine échelle est caractérisée par des structures dont la taille est de l'ordre de quelques kilomètres et la durée de vie est de quelques jours à quelques semaines. Cette circulation est agéostrophique et sa dynamique s'applique dans les trois dimensions de l'espace. Cependant, de part son caractère éphémère, l'observation *in situ* de cette circulation est un défi qui a longtemps retardé l'étude de telles structures, de leur fréquence et de leur distribution (McWilliams, 2016). En effet, ces structures sont de tailles trop réduites et évoluent trop rapidement pour les stratégies conventionnellement utilisées pendant les campagnes en mer et la télédétection satellite. Ces structures de fine échelle sont également souvent difficiles à distinguer des ondes inertielles dans les séries chronologiques Eulériennes. De surcroît, de part leur nature non linéaire, les difficultés engendrées ont fortement limité leur étude théorique. A partir des années 2000, la résolution de modèles numériques de circulation océanique est devenue suffisante pour représenter ces fines échelles. Dans un même temps, la résolution des satellites a également augmenté. Ainsi les modèles numériques couplés à l'imagerie satellite à très haute résolution sont devenus les fondements de l'étude de ces structures, avec une croissance rapide ces quinze dernières années. L'étude de ces structures est importante car elles peuvent représenter le "maillon manquant" dans la cascade directe d'énergie entre la mésoéchelle et la dissipation (Ferrari & Wunsch, 2009) et avoir de ce fait un impact important sur le transfert vertical de chaleur et de sel.

La dynamique à fine échelle joue également un rôle clé dans les processus biologiques de l'océan. Elle peut contrôler la remontée dans la zone photique de nutriments régénérés en profondeur (Mahadevan, 2016) et, par conséquent, influencer la distribution planctonique (Lévy *et al.*, 2018). En outre, elle pourrait générer des barrières physiques dont le postulat serait qu'elles joueraient un rôle important dans le développement et la répartition des niches écologiques dans l'océan et dans la connexion des écosystèmes côtiers (d'Ovidio *et al.*, 2010). Cela peut aller jusqu'à former une frontière physique infranchissable pour les organismes (phyto)planctoniques (d'Ovidio *et al.*, 2010). Il a même été montré que l'advection pouvait influencer de façon plus importante la composition des communautés de micro-organismes que la sélection environnementale (Hanson *et al.*, 2012). L'association de ces structures et du mélange vertical peut également impacter, via la turbulence à micro-échelle, la distribution des nutriments et des organismes par la turbulence à micro-échelle. Toutefois, une meilleure compréhension de ces structures reste un point important pour mieux caractériser le couplage entre physique et biologie. En effet, plusieurs études ont montré l'importance de la dynamique de fine-échelle dans la génération de vitesses verticales (Tzortzis *et al.*, 2021, et ses références).

La mission satellite *SWOT* (*Surface Water and Ocean Topography*, <https://swot.cnes.fr/fr/>)

qui sera lancée fin 2022 sur une période de 3 ans permettra d'observer la circulation océanique de la méso-échelle (10^5 m) à la sous-méso-échelle (10^3 m) avec une résolution inégalée grâce à un nouveau satellite (*SWOT*). Les filaments et les tourbillons de cet ordre de grandeur seront décelables et il sera possible d'en caractériser le transport vertical.

Le transport vertical induit par ces structures de fines échelles va jouer un rôle très important pour les communautés phytoplanctoniques. Les mouvements verticaux ascendants (*upwelling*) et les mouvements descendants (*downwelling*) vont, respectivement, permettre la remontée de nutriments nécessaires à la production phytoplanctonique dans la couche photique ou au contraire créer un export de carbone depuis la couche de surface vers l'océan profond, en entraînant les organismes phytoplanctoniques et la matière organique associée (Ruiz *et al.*, 2019).

C'est dans le contexte de ce projet que la mission préparatoire *PROTEVSMED-SWOT* (Prévisions océaniques, turbidité, écoulements, vagues et sédimentologie en Méditerranée - *Surface water and Ocean topography*, PI : F. Dumas (SHOM), https://doi.org/10.17183/protevsmed_swot_2018_leg2) s'est tenue en 2018. Cette mission s'est déroulée dans la partie Ouest de la Méditerranée, au Sud de l'archipel des Baléares, dans une zone extrapolable à la majorité de l'océan mondial. En effet, la Méditerranée est un écosystème oligotrophe et présentant une circulation d'énergie modérée (Tzortzis *et al.*, 2021), c'est également le cas de l'océan ouvert global loin des grands systèmes circulatoires d'énergie importante (*e.g.* courant circumpolaire antarctique, Gulf Stream) et des processus se mettant en place avec la circulation le long des côtes et fournissant des apports importants et plus ou moins continus de nutriments comme par exemple : l'*upwelling* côtier de Californie.

Cette campagne a permis d'allier l'imagerie satellite et les observations *in situ* avec une stratégie d'échantillonnage Lagrangienne et adaptative faisant appel à une instrumentation pluridisciplinaire (Sea-soar (appareil tracté réalisant des profils verticaux en ondulant), sADCP (profileur acoustique à effet Doppler de coque), cytomètre automatisé). Le travail réalisé à partir de cette mission par Tzortzis *et al.* (2021) a permis de mettre en lumière que, dans cette région, les fronts induits par la circulation de fine échelle, bien que de façon moindre par rapport aux zones plus énergétiques et aux systèmes de courants limites riches en nutriments, maintiennent néanmoins un fort effet structurant sur les communautés phytoplanctoniques à la surface.

Le phytoplancton se trouve être à la base du réseau trophique aquatique et a une importance à l'échelle globale pour le fonctionnement des écosystèmes (Winder & Sommer, 2012). Une représentation commune

des écosystèmes marins repose sur une modélisation relativement simple des bas niveaux trophiques (*i.e.* modèle nutriments-phytoplancton-zooplancton, NPZ) (Megrey *et al.*, 2007; Fennel & Neumann, 2015). Dans les eaux oligotrophes, et plus particulièrement dans l’océan tropical oligotrophe, des efflorescences phytoplanctoniques peuvent se produire et intensifier significativement la production locale (Messié *et al.*, 2020). Ces blooms sont rendus possibles par l’apport inhabituel de nutriments résultant d’un transport vertical épisodique (Johnson *et al.*, 2010; Morrow *et al.*, 2019) induit par une circulation océanique de (sub)mésoéchelle (Ryan *et al.*, 2002; Mahadevan & Tandon, 2006), le vent (McGillicuddy *et al.*, 2007) ou la combinaison des deux (Menkes *et al.*, 2016).

Le modèle Ariane dans sa version 2D (Ariane2D, (Maes *et al.*, 2018; Dobler *et al.*, 2019; Messié *et al.*, 2020)) permet d’étudier d’un point de vue Lagrangien le déplacement de particules, assimilables à des organismes planctoniques. Les travaux de Messié & Chavez (2017) et Messié *et al.* (2020) ont montré une application de l’outil Ariane2D faisant intervenir la croissance des organismes, en couplant dans le modèle advection et croissance (*i.e.* *growth-advection method* développée par Messié & Chavez (2017)).

L’objectif principal de ce stage est d’apporter des éléments de réponse à la question : qui de la physique ou de la biologie permet d’expliquer la distribution horizontale des abondances phytoplanctoniques mesurées pendant la campagne *PROTEVSMED-SWOT* 2018 ? Pour cela, une approche par modélisation de la dynamique physique a été utilisée avec un modèle à particules Lagrangiennes couplée à un modèle de croissance du plancton de type NPZ (Nutriments-Phytoplancton-Zooplancton). La modélisation est basée sur les données mesurées *in situ* disponibles de la campagne et des données satellites ou issues d’autres modèles puisées dans la littérature.

2 Matériel et Méthode

2.1 Zone d’étude

La zone d’étude correspond à la zone étendue comprenant la route de la campagne *PROTEVSMED-SWOT* de 2018 décrite par Tzortzis *et al.* (2021) entre $0^{\circ}E$ et $7^{\circ}E$ longitudinalement et entre $36^{\circ}N$ et $40^{\circ}N$ latitudinalement. Durant cette campagne une stratégie adaptative d’échantillonnage Lagrangienne avait été mise en place pour échantillonner la zone du front et les deux masses d’eau adjacentes. Pour caractériser le cycle du phytoplancton, une route en hippodrome avec sa longueur axée Nord-Sud a été réalisée sur la dernière partie de la campagne entre le 11 et le 13 mai 2018. Cette route en forme d’hippodrome a permis un échantillonnage à haute fréquence temporelle de la zone du front et cela de façon équitable entre les

deux masses d'eau qui composent le front afin de restituer le cycle nyctéméral. De cette manière les deux masses d'eau auront été échantillonnées autant de jour que de nuit sur la période, dans les deux masses d'eau. Cette proximité spatiale des mesures et la couverture temporelle importante en font une zone clé pour la définition des relations entre paramètres du milieu et abondances phytoplanctoniques, ainsi qu'une zone permettant une comparaison solide avec les données du modèle.

Le front a été caractérisé par Tzortzis *et al.* (2021) par son gradient de concentration en chlorophylle (Figure 1). Les transects répétés en forme d'hippodrome Nord-Sud, selon une stratégie d'échantillonnage Lagrangienne adaptative, ont permis des mesures cytométriques en équivalent temporel continu pour les deux masses d'eau le composant. Les eaux les plus pauvres en chlorophylle (concentration $< 0,22 \mu\text{g.L}^{-1}$) sont situées au sud du front et les plus concentrées en chlorophylle ($> 0,22 \mu\text{g.L}^{-1}$) au Nord. Ces masses d'eau ont été caractérisées par Tzortzis *et al.* (2021) comme étant au Sud "l'eau Atlantique jeune" et au Nord comme étant "l'eau Atlantique ancienne".

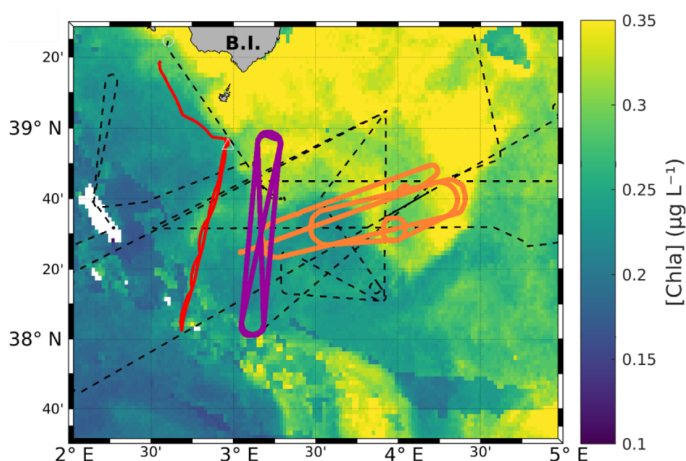


FIGURE 1 – Représentation du front par rapport à la concentration en chlorophylle. La route suivie est représentée par des tirets, l'hippodrome N-S en violet, l'hippodrome E-O en orange. En rouge est représenté le trajet d'un glider Sea-explorer. Tirée de Tzortzis *et al.* (2021).

2.2 Communauté phytoplanctonique

La communauté phytoplanctonique a été caractérisée par Tzortzis *et al.* (2021) grâce à des mesures optiques réalisées par cytométrie en flux. Les propriétés de diffusion et de fluorescence naturelle induites par les pigments permettent de caractériser chaque cellule et de les classer. Les cellules aux propriétés optiques similaires forment des groupes cytométriques. Les groupes identifiés pendant la campagne sont : *Synechococcus* (Syne), Picoeucaryotes (Pico1, Pico2, Pico3, PicoHFLR), Nanoeucaryotes (RNano, SNano), Microphytoplancton (Micro), Cryptophycées (Crypto). Les mesures cytométriques reposent sur plusieurs hypothèses. Tout d'abord toutes les cellules qui définissent un groupe cytométrique sont supposées évoluer de façon similaire et ensuite que les caractéristiques des masses d'eau n'évoluent pas au cours de la campagne. Ce qui implique que même si les espèces sont différentes dans un groupe il y aura tendance à une évolution similaire. Cela revient à mettre l'accent sur la notion de groupe fonctionnel de réponse (Thyssen *et al.*, 2008, 2009). C'est pour cela que dans cette étude, où l'approche est probabiliste, il est fait une modélisation des

groupes cytométriques. L'utilisation de la cytométrie peut amener à l'utilisation de groupes cytométriques (*i.e.* groupes définis par la taille ou le contenu pigmentaire). Ces groupes cytométriques peuvent bien sûr être polyphylétiques, ou à minima d'un seul genre (*e.g.* "*Synechococcus* like" ou "Cryptophyceae like").

Les informations concernant la communauté phytoplanctonique sont regroupées dans le tableau I. Afin de pouvoir initialiser le modèle, une recherche de relation a été faite entre les abondances des différents groupes cytométriques et les variables du milieu ou les paramètres issus de produits satellites. Ces relations permettent d'extrapoler des abondances à l'ensemble de la

TABLEAU I – Récapitulatif des informations cytométriques moyennes de la campagne PROTEVSMED-SWOT, d'après Tzortzis *et al.* (2021).

	Ordre de grandeur des abondances (cells/cm ³)	Taille (µm)	Pourcentage d'abondance
Syne	10000	1	80,57
Pico1	1000	0,9	8,06
Pico2	1000	0,9	8,06
Pico3	100	0,9	0,81
PicoHFLR	100	0,9	0,81
Rnano	100	9	0,81
Snano	100	9	0,81
Micro	10	90	0,08
Crypto	1	20	0,01

zone et ainsi préparer la carte d'initialisation du modèle. Par la suite, à l'aide d'Ariane, différentes simulations ont été faites, d'abord tenant uniquement compte de l'advection, puis couplant l'advection des particules à un modèle de croissance phytoplanctonique.

Les abondances mesurées *in situ* et exprimées en cell.cm⁻³ doivent être converties en biomasse de carbone exprimée en mmol C.m⁻³ pour être utilisée dans le modèle. Pour cela, le calcul du biovolume et du quotient interne de carbone (Q_C) sont nécessaires. Le biovolume est calculé selon l'équation 1 tirée de Marrec *et al.* (2018).

$$biovolume = \exp \beta_0 \times v^{\beta_1} \text{ où } \beta_0 = -5,8702, \beta_1 = 0,9228 \quad (1)$$

v correspond à l'ordre de taille de la cellule, il vaut en moyenne respectivement 0,9 µm et 90 µm pour Pico2 et Micro d'après les mesures de Tzortzis *et al.* (2021).

Le quotient interne de carbone provient également des travaux de Marrec *et al.* (2018).

Il est décrit par l'équation 2.

$$Q_C = a \times biovolume^b \text{ où } a = 0,26 \text{ et } b = 0,86 \quad (2)$$

2.3 Ariane et Ariane 2D

Ariane est un outil de calcul basé sur une architecture en Fortran 90/95. Son but est le calcul des lignes de flux tridimensionnelles dans le champ de vitesse sortant d'un modèle de circulation générale océanique (*e.g.* OPA-NEMO, ROMS) ou de tout modèle océanique dont les équations sont basées sur la conservation du volume, à travers une grille d'Arakawa C (grille dont les vitesses sont évaluées au milieu des 4 faces respectives et les flux au centre de la grille).

Les transports de masse d'eau ou de courants (*i.e.* le déplacement horizontal) sont calculés à partir d'un modèle à particules Lagrangiennes (*i.e.* à partir du déplacement de particules d'eau numériques). L'algorithme est basé sur des calculs analytiques, ce qui lui confère rapidité et précision. Chaque portion de trajectoire respecte localement l'équation de continuité (3), où $\frac{d\rho}{dt}$ représente la dérivée totale de la masse volumique (*i.e.* la vitesse de changement de la densité en suivant la particule) (<http://stockage.univ-brest.fr/~grima/Ariane/>, (Blanke & Raynaud, 1997)).

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \text{ avec } \frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (3)$$

Pour ce stage, l'intérêt sera uniquement porté sur la dynamique horizontale des masses d'eau et la distribution de surface des communautés puisque les travaux de Tzortzis *et al.* (2021) avaient montré une distribution horizontale particulière au niveau du front. C'est pourquoi, une version simplifiée en deux dimensions d'Ariane (Ariane 2D) est utilisée. Comme cette version a pour particularité de ne pas tenir compte des déplacements verticaux, il ne peut donc pas y avoir de plongée ou de remontée des particules. C'est donc uniquement l'advection horizontale de surface qui induit la distribution des particules du modèle Lagrangien.

Une maille de grille de $0,01^\circ$ a été utilisée pour initialiser les particules. Puis un traitement est fait pour n'adecter que les particules présentes "en mer", pour éviter toute advection de particules à "NaN" (*i.e.* dont les caractéristiques (abondance, température, etc) ne pourraient pas être représentées). Cela représente 232 069 particules. Ces particules sont advectées à un pas de temps de 0,1 jour. En pratique, Ariane calcule les trajectoires des particules comme des lignes de courant et les interpole au pas de temps demandé. Cela permet d'être plus précis que de calculer de façon itérative la position de la particule à chaque pas de temps.

2.4 Données disponibles

Les données mesurées *in situ* disponibles sont les données récoltées lors de la campagne *PROTEVSMED-SWOT* de 2018. Elles comportent les mesures de température et de salinité du thermosalinographe (respec-

tivement T_{tsg} et S) qui ont été corrigées en température et salinité absolues, les données de rayonnement actif photosynthétique (PAR) mesurées par le pyranomètre, ainsi que les données cytométriques traitées par Tzortzis *et al.* (2021). Pour les flux de nutriments, les données de la campagne *PEACETIME* de 2017 (*Process studies at the air-sea interface after dust deposition in the Mediterranean sea*, PI : C. Guieu (UMEV) & K. Desboeufs (UPEC), <https://doi.org/10.17600/17000300>) fournissent les informations de flux de phosphate (Pulido-Villena *et al.*, 2021).

Les bases de données utilisées pour les différentes analyses de ce stage sont regroupés dans le Tableau II. Une attention particulière a été portée au produit servant à l'extrapolation des abondances à l'ensemble de la zone d'étude. En effet, le produit satellite fournissant la température de surface (SST) est le produit présentant la meilleure corrélation avec les données de température *in situ* du thermosalinographe (T_{tsg}) par rapport à tous les produits testés.

TABLEAU II – Récapitulatif des produits utilisés

Nom du produit et créateur	Donnée	Type	Résolution spatiale (°)	Résolution temporelle (jour)	Lien
Multi-scale Ultra-high Resolution (MUR) SST Analysis fv04.1 (JPL/NASA)	SST	L4, satellite	0,01	1	https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/MUR-JPL-L4-GLOB-v4.1
SEALEVEL EUR PHY L4 MY 008 068 (SL-CLS-TOULOUSE-FR)	Courant	Anomalies de niveau de la mer (SLA) maillées par le satellite altimétrique	0,125	1	https://doi.org/10.48670/moi-00141
OCEANCOLOUR MED CHL L4 REP OBSERVATIONS 009 078 (OC-CNR-ROMA-IT)	CHL	L4, multi-satellite avec interpolation journalière	0,01	1	https://doi.org/10.48670/moi-00114
MEDSEA MULTIYEAR BGC 006 008 (MED-OGS-TRIESTE-IT)	Phosphates	Réanalyse de sorties de modèles biogéochimiques	0,042	1	https://doi.org/10.25423/cmcc/medsea_multiyear_bgc_006_008_medbfm3
MEDSEA MULTIYEAR PHY 006 004 (MED-CMCC-LECCE-IT)	MLD	Réanalyse de sorties de modèles physique	0,042	1	https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1
MEDSEA MULTIYEAR PHY 006 004 (MED-CMCC-LECCE-IT)	Salinité	Réanalyse de sorties de modèles physique	0,042	1	https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1
MEDSEA MULTIYEAR PHY 006 004 (MED-CMCC-LECCE-IT)	Température	Réanalyse de sorties de modèles physique	0,042	1	https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1

2.5 Traitements statistiques préliminaires des données

Pour pouvoir initialiser le modèle à partir d'une carte présentant des données en tout point il est préalablement nécessaire de définir une relation entre au moins une des variables du milieu et les abondances mesurées lors de la campagne. Tzortzis *et al.* (2021) avaient caractérisé le front par rapport à la concentration en chlorophylle (Chl). Donc dans un premier temps, cette recherche de relation a été faite en reliant la valeur seuil de Chl et les abondances moyennes de part et d'autre du front. Cela donne une relation entre abondance et Chl sous la forme d'une relation en marche d'escalier de part et d'autre du front.

Afin d'obtenir une distribution spatiale des abondances plus progressive, une recherche systématique pour tous les groupes cytométriques a été effectuée en calculant pour chaque groupe la corrélation linéaire entre abondance et variables. Ces variables sont soit mesurées *in situ* (T_tsg et S), soit proviennent d'un produit satellite pour la Chl. Cette recherche de relation linéaire a été faite pour les mesures de l'hippodrome seules et pour l'entièreté de la zone couverte par la campagne, cela dans le but de vérifier la robustesse de la relation trouvée au niveau du front. La recherche de relation avec les mesures de PAR a été également réalisée mais ne permet aucune corrélation entre PAR et abondance.

Pour les produits satellites, différents produits ont été testés pour la SST et pour la Chl de manière à utiliser le meilleur pour la zone et correspondant le mieux aux données *in situ*, notamment à T_tsg pour SST. Dans un second temps, Pico2 et Micro ont eu leurs relations avec T_tsg affinées par des relations non-linéaires afin de pouvoir représenter les changements d'intensité de variation (*i.e.* changement de pente) s'opérant sur la plage des températures mesurées.

Or Pico2 et Micro ne représentent qu'environ 10% de la biomasse phytoplanctonique totale étudiée laquelle est dominée par les petits phytoplanctons et particulièrement Syne qui représente à lui seul plus de 73% de la biomasse totale. Afin d'avoir une représentation cohérente des populations phytoplanctoniques présentes, à savoir une majorité de petit phytoplancton (plus de 95% de la biomasse constituée par Syne et les Pico) et une minorité de gros phytoplancton, la biomasse initiale de Pico2 sera multipliée par 5, ce qui rapproche le ratio petit phytoplancton - gros phytoplancton du ratio observé *in situ*.

2.6 Carte d'initialisation du modèle

Le modèle est initialisé le 30 avril 2018, à la date de la première mesure de la campagne. La carte d'initialisation du modèle est obtenue en extrapolant la première mesure cytométrique de la campagne à partir de la relation reliant l'abondance à T_tsg et de la relation reliant T_tsg à la carte de SST instantanée correspondante. Cette extrapolation s'exprime par l'équation 4. Dans cette équation, les termes x_i et y_i représentent les indices de longitude et de latitude. $A_g(x_i, y_i)$ représente l'abondance à la coordonnée (x_i, y_i) du groupe cytométrique "g", en $cell.cm^{-3}$. $SST(x_i, y_i)$ représente la donnée de SST au point de coordonnées (x_i, y_i) , en $^{\circ}C$. Enfin $r(T_tsg, A)_g$ représente la relation entre l'abondance et la température du thermosalinographe pour le groupe "g", en $cell.cm^{-3}.^{\circ}C^{-1}$ et $r(T_tsg, SST)$ représente la relation entre la SST et T_tsg.

$$A_g(x_i, y_i) = r(T_tsg, A)_g \times r(T_tsg, SST(x_i, y_i)) \quad (4)$$

Finalement, pour pouvoir être utilisées dans le modèle, les abondances mesurées *in situ* et exprimées en $cell.cm^{-3}$ ont été converties en biomasse de carbone exprimée en $mmolC.m^{-3}$ en utilisant les équations 1

et 2 (section 2.2). L'hippodrome se trouvant entre le 11^{ème} jour et le 13^{ème} jour de la campagne, le temps d'intégration du modèle, dans sa configuration tenant compte de la biologie, est donc de 13 jours.

2.7 Estimation du flux de phosphate à la base de la couche de mélange (MLD)

La partie occidentale de la Méditerranée et plus particulièrement la zone autour des Baléares sont des zones limitées en phosphate (partie Nord des Baléares jusqu'à la côte sud de Mallorca) ou co-limitées en phosphate et azote (partie Sud des Baléares) selon des analyses climatiques réalisées entre les étés 1986 et 2005 (Pagès *et al.*, 2020). C'est pour cette raison que nous avons décidé d'utiliser le phosphate comme nutriment du modèle biologique. Comme la campagne *PROTEVSMED-SWOT* n'a pas eu de mesures de nutriments, pour compenser, nous nous sommes basés sur les estimations du flux de phosphate à la base de la couche de mélange de la campagne *PEACETIME* de 2017 qui couvraient la Méditerranée occidentale (Pulido-Villena *et al.*, 2021), basées sur les travaux de Taillandier *et al.* (2020). Dans cette méthode les flux verticaux (F_P) sont paramétrés comme des flux diffusifs diapycnaux écrits comme le produit de la diffusion verticale tourbillonnaire et du gradient vertical des concentrations de phosphate (C) :

$$F_P = -0,2 \cdot \varepsilon \cdot \frac{\rho_0}{g} \cdot \frac{\partial C}{\partial \rho} \quad (5)$$

La diffusion verticale tourbillonnaire est calculée de la relation décrite par Osborn (1980) avec une efficacité de mélange constante et fixée à 0,2, où ε est le coefficient de dissipation de l'énergie cinétique turbulente, g représente la constante gravitationnelle et ρ_0 la masse volumique de référence de l'eau de mer. Pendant la campagne *PEACETIME*, n'ayant pas eu de mesures du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (ε), les données de Cuypers *et al.* (2012) provenant de la même partie de la Méditerranée ont été utilisées. Ces valeurs sont comprises entre $6 \cdot 10^{-9}$ et $10 \cdot 10^{-9} \text{ W.kg}^{-1}$ pour la couche entre 20 m et 100 m.

Cette méthode, décrite et réalisée par Pulido-Villena *et al.* (2021) avec les valeurs de la campagne *PEACETIME*, donne une valeur moyenne du flux de phosphate à la base de la couche de mélange de l'ordre de $4 \cdot 10^{-3} \text{ mmolC.m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$. En faisant l'hypothèse d'une concentration constante dans la couche de mélange, une fois convertie en carbone et en divisant par la profondeur de la MLD, qui était également déterminée *in situ*, nous obtenons l'estimation du flux en $\text{mmolC.m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$.

La même méthode a été utilisée pour pouvoir estimer le flux de phosphate, à partir de données issues de modèles physique et biogéochimique (Tableau II, section 2.4) de phosphate, de masse volumique (salinité, température, pression) et de profondeur de la MLD modélisées pour toute la zone, sur toute la colonne d'eau et pendant toute la période. Afin d'obtenir une estimation de la pression, la relation décrite par Leroy & Parthiot (1998) pour la Méditerranée a été utilisée (Equation 6), où z désigne la profondeur en mètre et P

la pression en MPa.

$$z = -7.10^{-2}P + 2.10^{-3}P^2 \quad (6)$$

La densité de l'eau de mer a été estimée en tout point d'après les algorithmes de l'UNESCO (Fofonoff & Millard Jr, 1983). Les valeurs estimées de F_P obtenues sont du même ordre de grandeur que les valeurs *in situ* de Pulido-Villena *et al.* (2021).

2.8 Tests "physiques" du modèle

2.8.1 Advection des particules

Afin de valider le produit de courant utilisé dans le modèle, l'étude de l'advection des particules seules a été réalisée. Tzortis *et al.* (2021) avaient observé deux masses d'eau différentes présentant des trajectoires particulières avec un sens de circulation et une orientation de courbure différente. Pour cela les particules ont été advectées puis se sont vues attribuer une valeur équivalente à la différence entre la longitude de la particule à la fin de l'advection et sa longitude initiale de la particule dans un cas ou à la différence entre la latitude de la particule à la fin de l'advection et la latitude initiale de la particule dans l'autre cas permet de mettre en avant les déplacements des masses d'eau. De plus, une modélisation à revers du temps (*backward*) a été faite pour les particules présentes au niveau du front afin d'identifier les zones d'où proviennent les eaux formant le front pendant la période de l'hippodrome.

2.8.2 Advection de la SST

Comme les relations utilisées dans le modèle relient l'abondance à la température, il est intéressant de savoir si la distribution spatiale de la SST est régie par l'advection ou bien par le réchauffement saisonnier et si certaines parties de la zone voient la SST advectée diverger plus rapidement que d'autres de la SST instantanée (*i.e.* mesures satellites correspondant au jour exact). Pour cela la carte de SST du premier jour de la campagne a été advectée pendant 13 jours et des comparaisons journalières des cartes de SST advectée et des cartes de SST instantanées ont été faites pour une zone recouvrant l'hippodrome ($38^\circ N$ - $39^\circ N$; $2,75^\circ E$ - $3,5^\circ E$). Contrairement à la SST advectée, la SST instantanée est soumise à un réchauffement saisonnier. Pour comparer les deux, la SST instantanée a donc été corrigée en enlevant une tendance linéaire, selon l'équation 7.

$$SST_{instantanée}^{corrigée} = SST_{instantanée} - tendance_{instantanée} \quad (7)$$

2.8.3 Advection des abondances initiales

Dans le but de savoir à quel point la physique seule permet d'expliquer la distribution des abondances et notamment les abondances observées lors de la campagne au niveau du front, la carte initiale d'abondance

a été advectée entre le premier jour de la campagne et le moment de l'hippodrome. La comparaison des distributions d'abondances *in situ* et de celles advectées correspondantes permet de savoir si l'advection seule (*i.e.* le courant seul) permet d'expliquer une partie de la distribution mesurée lors de la campagne.

2.9 Tests "biologiques" du modèle

A partir de toutes les données disponibles (données *in situ* de la campagne et produits cités dans le tableau II, section 2.4) et des paramètres fournis dans la littérature, un modèle de croissance phytoplanctonique, communauté centré, a été créé. Ce modèle est de type N2P2Z, c'est à dire qu'il prend en considération les nutriments, deux groupes phytoplanctoniques (P_{small} et P_{big}) et deux groupes zooplanctoniques (Z_{small} et Z_{big}). Les deux groupes phytoplanctoniques sont tirés des groupes cytométriques décrits par Tzortzis *et al.* (2021) et sont respectivement Pico2 et Micro. Ces deux groupes ont été choisis car ils présentent la meilleure corrélation entre abondance et température.

2.9.1 Modèle biologique

Le modèle biologique est tiré du modèle de Messié *et al.* (2017) adapté au nord-ouest de la Méditerranée. Dans nos simulations adaptées au Nord-Ouest de la Méditerranée, les seuls nutriments sont les phosphates car ils représentent les nutriments limitants ou co-limitants dans la zone (Pagès *et al.*, 2020). P_{big} utilise les nutriments issus directement des flux entrant dans la zone (N_{new}) et P_{small} utilise les nutriments régénérés (N_{reg}). Z_{small} prédate P_{small} . Z_{big} prédate P_{big} et Z_{small} . Les deux zooplanctons rejettent du phosphate (pelotes fécales) qui sera disponible pour P_{small} sous forme de nutriments régénérés ; le cycle bactérien de (re)minéralisation n'est pas considéré. Z_{big} présente un terme de fermeture quadratique représentant la prédation par les niveaux trophiques supérieurs. Les significations des différents termes des équations sont regroupés dans le tableau III. Les équations décrivant le modèle sont présentes ci-dessous :

$$\frac{\partial P_{small}}{\partial t} = \underbrace{\frac{N_{reg}}{k_{N_{reg}} N_{reg}} \mu_{max}^{small} P_{small}}_{\text{croissance}} - \underbrace{\frac{P_{small}}{k_G^{small} + P_{small}} g_{max}^{small} Z_{small}}_{\text{broutage par } Z_{small}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial Z_{small}}{\partial t} = \underbrace{\frac{P_{small}}{k_G^{small} + P_{small}} g_{max}^{small} Z_{small}}_{\text{croissance}} - \underbrace{Z_{small} e Z}_{\text{rejets}} - \underbrace{\frac{Z_{small}}{k_G^{big} + Z_{small} + P_{big}} g_{max}^{big} Z_{big}}_{\text{prédation par } Z_{big}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_{big}}{\partial t} = \underbrace{\frac{N_{new}}{k_{N_{new}} + N_{new}} \mu_{max}^{big} P_{big}}_{\text{croissance}} - \underbrace{\frac{P_{big}}{k_G^{big} + Z_{small} + P_{big}} g_{max}^{big} Z_{big}}_{\text{prédation par } Z_{big}} - \underbrace{P_{big} m P}_{\text{mortalité}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial Z_{big}}{\partial t} = \underbrace{\frac{Z_{small} + P_{big}}{k_G^{big} + Z_{small} + P_{big}} g_{max}^{big} Z_{big}}_{\text{croissance}} - \underbrace{Z_{big} e Z}_{\text{rejets}} - \underbrace{m Z Z_{big}^2}_{\text{mortalité}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial N_{reg}}{\partial t} = \underbrace{Z_{small}eZ}_{\text{rejets de } Z_{small}} + \underbrace{\varepsilon Z_{big}eZ}_{\text{rejets de } Z_{big} \text{ exploitables}} - \underbrace{\frac{N_{reg}}{k_{N_{reg}} + N_{reg}} \mu_{max}^{small} P_{small}}_{\text{consommation par } P_{small}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial N_{new}}{\partial t} = \underbrace{N_{supply}}_{\text{Flux entrant}} - \underbrace{\frac{N_{new}}{k_{N_{new}} + N_{new}} \mu_{max}^{big} P_{big}}_{\text{consommation par } P_{big}} \quad (13)$$

TABLEAU III – Paramètres du modèle de plancton (dont paramètres pour l'équilibre en 1D)

Paramètre	Signification	Valeur	Unité	Source
μ_{max}^{small} (variable quand pondéré par SST)	taux de croissance maximal pour P_{small}	1,9872	d ⁻¹	(Baklouti <i>et al.</i> , 2021)
μ_{max}^{big}	taux de croissance maximal pour P_{big}	2,7648	d ⁻¹	(Baklouti <i>et al.</i> , 2021)
g_{max}^{small}	taux de broutage maximal pour Z_{small}	1,4256	d ⁻¹	(Baklouti <i>et al.</i> , 2021)
g_{max}^{big}	taux de broutage maximal pour Z_{big}	1,4256	d ⁻¹	
C/Chl_{small}	C :Chl pour P_{small}	200	mg C.mg Chl ⁻¹	(Messié <i>et al.</i> , 2022)
C/Chl_{big}	C :Chl pour P_{big}	50	mg C.mg Chl ⁻¹	(Lazzari <i>et al.</i> , 2012)
k_N^{reg}	Cste 1/2 saturation de P_{small} sur PO4	13,3	mmol C.m ⁻³	(Pulido-Villena <i>et al.</i> , 2021)
k_N^{new}	Cste 1/2 saturation de P_{big} sur PO4	13,3	mmol C.m ⁻³	(Pulido-Villena <i>et al.</i> , 2021)
k_G^{small}	Cste 1/2 saturation de Z_{small} sur P_{small}	5	mmol C.m ⁻³	(Auger <i>et al.</i> , 2011)
k_G^{big}	Cste 1/2 saturation de Z_{big} sur P_{big}	5	mmol C.m ⁻³	
mP	taux de mortalité de P_{big}	0.05	d ⁻¹	(Auger <i>et al.</i> , 2011)
mZ	taux de mortalité quadratique de Z_{big}	0,005	mmol C.m ⁻³ .d ⁻¹	
eZ	fraction excrétée de Z_{big} et Z_{small}	0,1		(Baklouti <i>et al.</i> , 2021)
ε	fraction de l'excrétion de Z_{big} disponible comme nutriments régénérés	0,75		
N_{reg}^{ini} (1D)	concentration initiale de phosphate régénéré	0,3	mmol C.m ⁻³	<i>in situ</i> (Pulido-Villena <i>et al.</i> , 2021)
N_{new}^{ini} (1D)	concentration initiale de phosphate	0,3	mmol C.m ⁻³	<i>in situ</i> (Pulido-Villena <i>et al.</i> , 2021)
P_{small}^{ini} (1D)	biomasse initiale de P_{small} (Pico2)	0,6	mmol C.m ⁻³	<i>in situ</i> (Tzortzis <i>et al.</i> , 2021)
P_{big}^{ini} (1D)	biomasse initiale de P_{big} (Micro)	0,1	mmol C.m ⁻³	<i>in situ</i> (Tzortzis <i>et al.</i> , 2021)
Z_{small}^{ini} (1D)	biomasse initiale de Z_{small}	0,3	mmol C.m ⁻³	
Z_{big}^{ini} (1D)	biomasse initiale de Z_{big}	0,2	mmol C.m ⁻³	

Le modèle a été paramétrisé en configuration 1D (*i.e.* uniquement l'évolution temporelle avec des apports constants de nutriments) en essayant d'obtenir un état d'équilibre pour les conditions moyennes observées dans la région. Pour ces tests 1D, la biomasse initiale de P_{small} a été fixé à 0,6 mmol C.m⁻³ afin de représenter de façon plus réaliste le ratio petits/grands phytoplanctons observé et d'obtenir un équilibre plus adapté à la configuration réelle du milieu. La configuration 1D a été forcée en utilisant les valeurs de la profondeur de la couche de mélange, de concentration de phosphate et de flux de phosphate moyennées sur

les 10 stations mesurées lors de la campagne *PEACETIME* de 2017 (Pulido-Villena *et al.*, 2021) (section 2.7). En plus de l'évolution temporelle des biomasses des différents groupes (P_{big} , P_{small} , Z_{big} , Z_{small}), la comparaison des biomasses initiales et des biomasses obtenues après x pas de temps permet de donner des informations sur la stabilité du modèle.

2.9.2 Couplage de l'advection et du modèle de plancton

Le modèle de plancton est couplé à l'advection des particules pour représenter l'évolution des biomasses phytoplanctoniques le long des trajectoires des particules. Différentes configurations du modèle ont été testées. La première configuration est une configuration contrôlée uniquement par les phosphates. Par la suite des configurations incluant une dépendance à la température pour P_{small} ont été testées. Une configuration où le taux de croissance maximal de P_{small} est pondéré à la fois par les phosphates et par la température via la relation d'Eppley (1972) est utilisée. Ainsi qu'une autre configuration similaire mais où c'est le 99^{ème} quantile de la relation d'Eppley (1972) qui est utilisé (Bissinger *et al.*, 2008). Les configurations finalement retenues sont celle où le contrôle du taux de croissance est exclusivement réalisé par les nutriments et celle utilisant à la fois les nutriments et la température avec la relation de Bissinger *et al.* (2008) représentée dans l'équation 14 où μ_{max}^{small} représente le taux de croissance maximal de P_{small} et T la température en °C.

$$\mu_{max}^{small} = 0,81e^{0,0631T} \text{ (Bissinger et al., 2008)} \quad (14)$$

L'hypothèse serait que l'ajout du modèle de plancton à l'advection puis du modèle de plancton température dépendant améliorent de façon croissante la corrélation entre biomasses *in situ* et biomasses modélisées.

3 Résultats

3.1 Relations entre abondance et variables

Les résultats des différentes corrélations linéaires (représentés sous la forme du R^2) sont disponibles dans le tableau IV pour la zone du front et pour l'ensemble du trajet de la campagne. Les cellules mises en évidence avec les couleurs correspondant aux relations avec corrélation significative (i.e. $R^2 > 0,1$) avec en bleu et en vert les corrélations respectivement positives et négatives.

Syne, pour "*Synechococcus* like", est le groupe le plus abondant. Il représente plus de 73% de la biomasse totale et plus de 80% de l'abondance totale (Tableau I, section 2.2). Bien qu'un fort signal pour le groupe Syne ait été observé au niveau du front avec la chlorophylle (Tzortzis *et al.*, 2021), où Syne et Chl sont corrélés avec un R^2 de l'ordre de 0,31, cette relation n'est pas extrapolable sur une période spatio-temporelle plus grande. En effet, si l'on s'intéresse à l'ensemble de la zone, le R^2 décroît à environ 0,061

TABLEAU IV – R^2 des relations entre abondances et paramètres du milieu

	Paramètre	Syne	Pico1	Pico2	Pico3	PicoHFLR	Rnano	Snano	Micro	Crypto
Hippodrome	T_tsg	0,02400	0,02280	0,22340	0,02190	0,00690	0,21770	0,20664	0,13428	0,01170
	S	0,62395	0,58380	0,71526	0,03630	0,00966	0,38490	0,00172	0,51130	0,04485
	Chl	0,31890	0,22200	0,34660	0,00970	0,00890	0,10540	0,05610	0,33910	0,00001
Zone totale	T_tsg	0,05240	0,06560	0,40590	0,00059	0,00024	0,15170	0,00039	0,31675	0,06550
	S	0,16100	0,17994	0,30125	0,00035	0,00010	0,01990	0,12830	0,10600	0,00430
	Chl	0,06100	0,08480	0,00160	0,00160	0,00660	0,12537	0,09880	0,12450	0,05690

et la tendance bien que faiblement applicable au nuage de points, en raison du R^2 très faible, serait plutôt inverse par rapport à celle de l'hippodrome. Le seul autre paramètre avec lequel Syne présente une corrélation linéaire est la salinité. Au niveau de l'hippodrome le R^2 vaut 0,62. Mais pour l'ensemble de la zone le coefficient de corrélation chute à 0,16. C'est pourquoi les groupes Micro et Pico2 ont été choisis pour leur relation avec la température. En effet, en plus d'avoir des bonnes corrélations pour l'ensemble de la zone, utiliser la corrélation avec T_tsg permet d'établir cette corrélation avec deux paramètres mesurés *in situ*, limitant de ce fait les incertitudes de la relation. Les relations entre l'abondance des groupes cytométriques Pico2 et Micro sont représentées sur la figure 2.

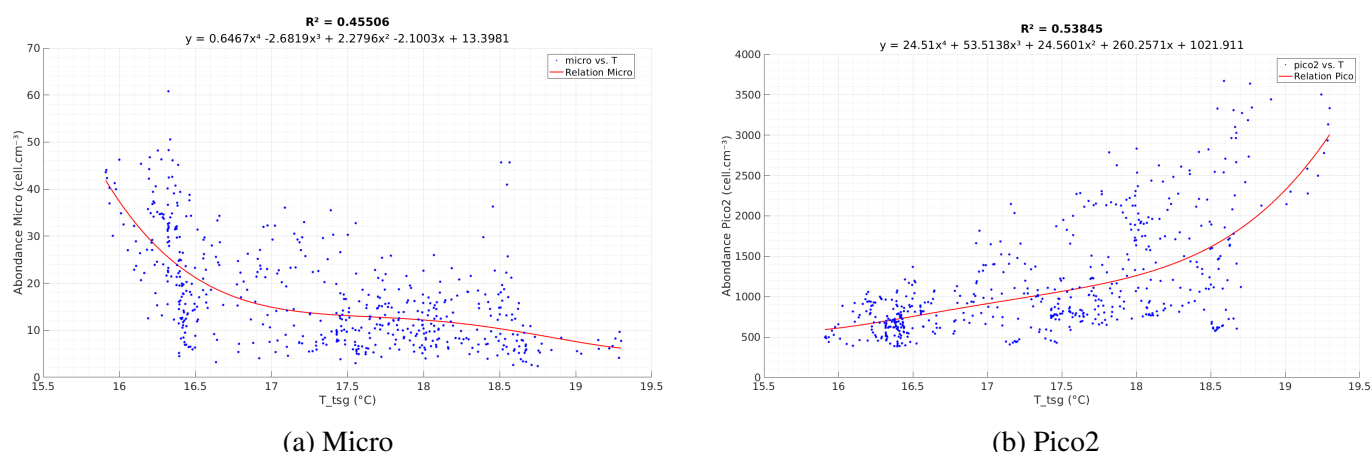


FIGURE 2 – Relations entre abondances et T_tsg pour les groupes cytométriques Micro et Pico2

3.2 Estimation de la biomasse correspondante à l'abondance

Les valeurs, calculées à partir des équations 1 et 2 (section 2.7), du biovolume, de Q_C et de la biomasse qui est le produit de Q_C par l'abondance (ici au point initial (Tableau I, section 2.2), sont résumées dans le tableau V.

3.3 Cartes des biomasses initiales

Les cartes de biomasse initiales sont les cartes servant à initialiser le modèle (Figure 3). Les biomasses initiales de Micro sont plus élevées dans la moitié Ouest de la zone. Inversement les biomasses initiales de

TABLEAU V – Récapitulatif des informations de biovolume, Q_C et biomasse

	Biovolume (μm^3)	QC (fg C/cell)	Biomasse (mmolC/m ³)	Pourcentage de biomasse
Syne	13,86	2494,17	2,060	73,89
Pico1	12,58	2294,10	0,190	6,80
Pico2	12,58	2294,10	0,190	6,80
Pico3	12,58	2294,10	0,019	0,68
PicoHFLR	12,58	2294,10	0,019	0,68
Rnano	105,29	14263,29	0,118	4,23
Snano	105,29	14263,29	0,118	4,23
Micro	881,41	88680,42	0,073	2,63
Crypto	219,99	26880,23	0,002	0,08

Pico sont plus élevées dans la partie Est de la zone. Cela est dû aux relations opposées entre Pico et Micro par rapport à la température.

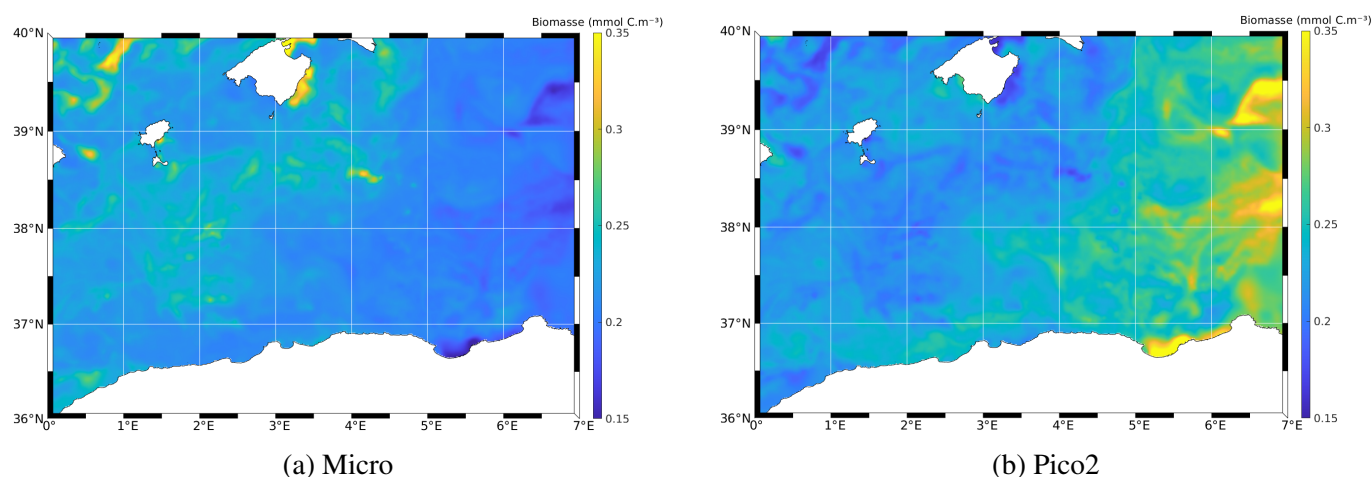


FIGURE 3 – Cartes de biomasse extrapolées le 30/04/2018 servant à l’initialisation du modèle

3.4 Tests physiques du modèle à particules Lagrangiennes

Dans un premier temps, afin de s’assurer que la zone du front est correctement représentée par le modèle, des comparaisons de reconstitution des conditions *in situ* par le modèle ont été faites pour les courants et la température de surface.

3.4.1 Advection simple des particules

Les cartes des advections des particules avec leurs différences respectives entre la longitude ou la latitude aux positions initiales et aux positions finales sur 13 jours d’advection à partir du premier jour de la campagne sont représentées sur la figure 4. Un delta (Δ) positif correspond à une augmentation de la latitude ou de la longitude entre la position initiale et la position finale de la particule. Les particules sont représentées dans leurs positions finales. Les vecteurs de courants représentés correspondent aux vecteurs moyens sur les 13 jours.

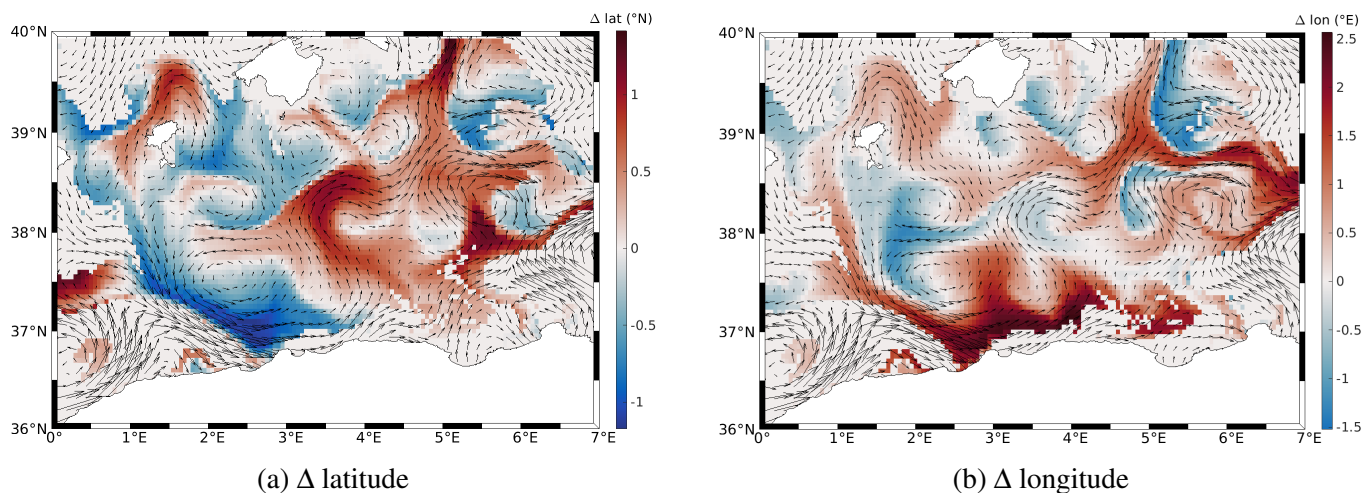


FIGURE 4 – Cartes de l’advection particules avec les différences de longitude ou de latitude entre les positions initiales et celles à la fin de l’advection

Les origines des masses d’eau présentes de part et d’autre du front dans l’hippodrome au moment de l’hippodrome sont représentées sur la figure 5. Les positions des particules à l’origine des positions de celles de l’hippodrome sont 13 jours avant l’hippodrome, donc au premier jour de la campagne.

Les masses d’eau constituant la partie Nord ont subi une advection majoritairement cyclonique (sens anti-horaire) et viennent donc d’une zone quasiment identique à la zone constituant la partie Nord du front. Alors que les masses d’eau constituant la partie Sud du front ont tendance à provenir d’une zone plus au Sud.

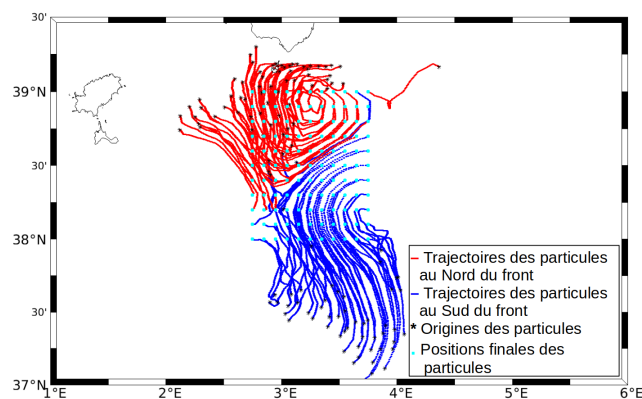


FIGURE 5 – Origine des masses d’eau composant la zone du front et de l’hippodrome

3.4.2 Advection de la SST

La SST instantanée moyennée dans la zone couvrant le front et les mesures de l’hippodrome montre des variations d’amplitudes relativement élevées et une tendance générale au réchauffement entre le premier jour de la campagne et la période des mesures de l’hippodrome. Or l’évolution de la température moyenne sur la même zone de la SST advectée montre une absence de variation (Figure 6). L’advection de la SST ne correspond pas à l’évolution journalière de la SST instantanée.

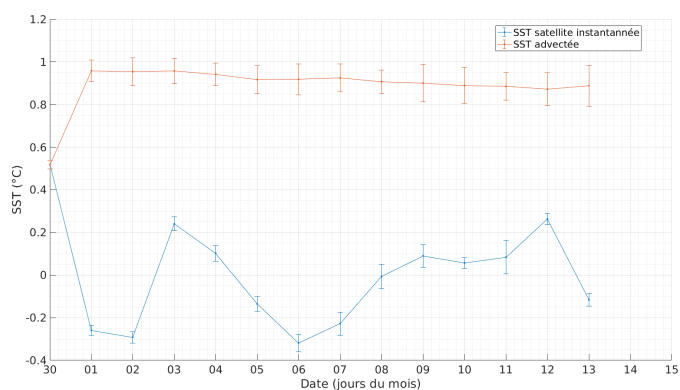
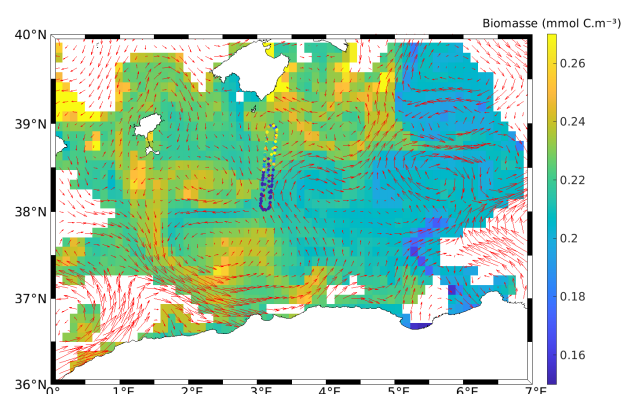


FIGURE 6 – Evolution temporelle des températures moyennes instantanées ou advectées pour la zone de l'hippodrome centrées sur la température initiale.

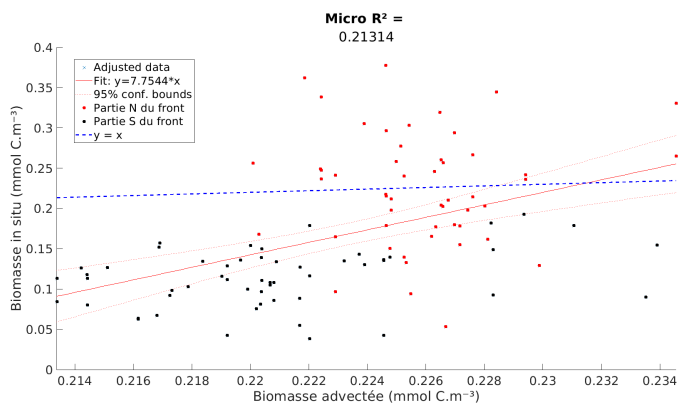
Cette différence entre SST instantannée et SST advectée est déterminante puisqu'elle justifie l'utilisation d'un modèle biologique température dépendant. En effet, si SST instantannée et SST advectée avaient été équivalentes le long des trajectoires des particules, cela serait revenu à avoir des particules adiabatiques (*i.e.* sans échange de chaleur), donc à température constante le long de la trajectoire. Dans ce cas l'ajout d'un terme reliant le taux de croissance à la température n'apporterait pas de variation

3.4.3 Advection des biomasses et comparaison avec les biomasses mesurées *in situ*

L'advection des biomasses entre le premier jour de la campagne et la période de l'hippodrome à partir des cartes initiales de biomasses extrapolées (Figure 3) sont représentées sur les figures 7a et 8a. Les vecteurs de courant représentent le courant moyen sur les 3 jours de l'hippodrome. Pour une comparaison plus quantitative, les figures 7b et 8b présentent les régressions linéaires entre les mesures de biomasse *in situ* et les biomasses advectées correspondantes. Pour Micro, seule l'advection des biomasses initiales permet d'expliquer au maximum 21% de la distribution des biomasses observées pendant la campagne. Comme la figure 7 le montre, la partie Nord de l'hippodrome est la zone modélisée qui correspond le mieux aux mesures *in situ*. Concernant Pico, l'advection seule semble pouvoir expliquer au maximum 29% de la distribution des biomasses observées. La partie correspondant le plus aux mesures *in situ* est la partie Nord (Figure 8).

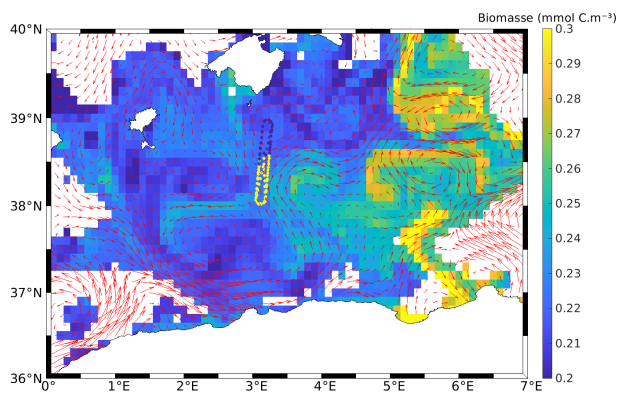


(a) Carte des biomasses advectées et *in situ*

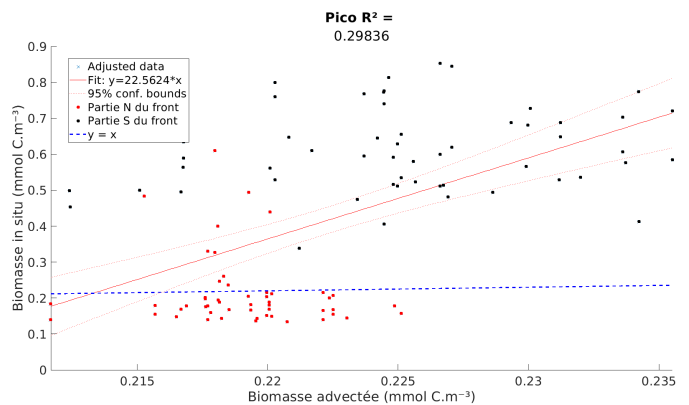


(b) Régression linéaire entre biomasses advectées et *in situ*

FIGURE 7 – Comparaison des biomasses advectées de Micro avec celles mesurées *in situ*



(a) Carte des biomasses advectées et *in situ*



(b) Régression linéaire entre biomasses advectées et *in situ*

FIGURE 8 – Comparaison des biomasses advectées de Pico avec celles mesurées *in situ*

3.5 Résultats du modèle à particules Lagrangiennes couplé au modèle de plancton

3.5.1 Paramétrisation du modèle en configuration 1D

Les valeurs des paramètres du modèle adaptés à la zone d'étude sont regroupés dans le tableau III (section 2.9.1). La figure 9 montre l'évolution temporelle du modèle sur 600 jours. L'état d'équilibre obtenu pour les 4 groupes différents (P_{small} , P_{big} , Z_{small} et Z_{big}) est proche des valeurs initiales avec lesquels le modèle a été initialisé. Ces états d'équilibres sont retrouvés pour des configurations légèrement différentes (biomasses initiales de P_{small} et P_{big} différentes, apports de nutriments différents).

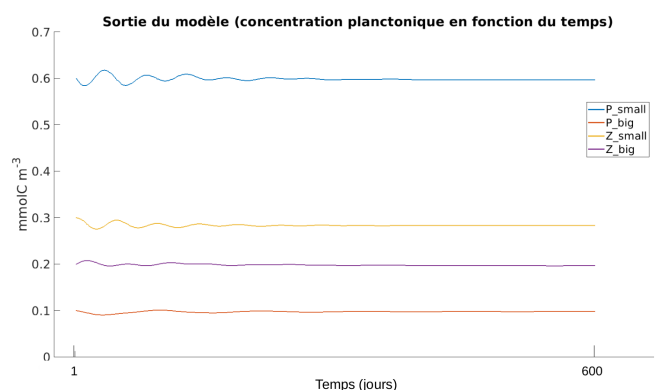


FIGURE 9 – Evolution temporelle des biomasses des différents groupes avec le modèle 1D

3.5.2 Advection des particules avec le modèle bio

Pour Micro, l'advection couplée au modèle de plancton permet d'expliquer environ 17% de la distribution des biomasses observées pendant la campagne. La partie Sud de l'hippodrome est la zone où les données modélisées et *in situ* concordent le mieux. Concernant Pico, l'advection couplée au modèle de plancton semble pouvoir expliquer environ 15% de la distribution des biomasses observées. La zone correspondant le plus aux mesures *in situ* est la partie Sud de l'hippodrome.

3.5.3 Advection des particules avec modèle bio température dépendant

L'advection des particules couplée au modèle de plancton où P_{small} possède un taux de croissance avec un terme température dépendant (99^{ème} quantile de la relation d'Eppley (1972) (Bissinger *et al.*, 2008))

est représentée sur la figure 10. Les vecteurs de courant représentent le courant moyen sur les 3 jours de l'hippodrome. Pour Micro, l'advection couplée au modèle de plancton permet d'expliquer environ 27% de la distribution des biomasses observées pendant la campagne. La partie Sud de l'hippodrome est la zone où les données modélisées et *in situ* concordent le mieux (*i.e.* là où les biomasses modélisées sont les plus proches des biomasses *in situ* correspondantes) (Figures 10a,11a). Concernant Pico, l'advection couplée au modèle de plancton semble pouvoir expliquer environ 37% de la distribution des biomasses observées. La zone concordant le mieux aux mesures *in situ* est la partie Sud de l'hippodrome (Figures 10b,11b).

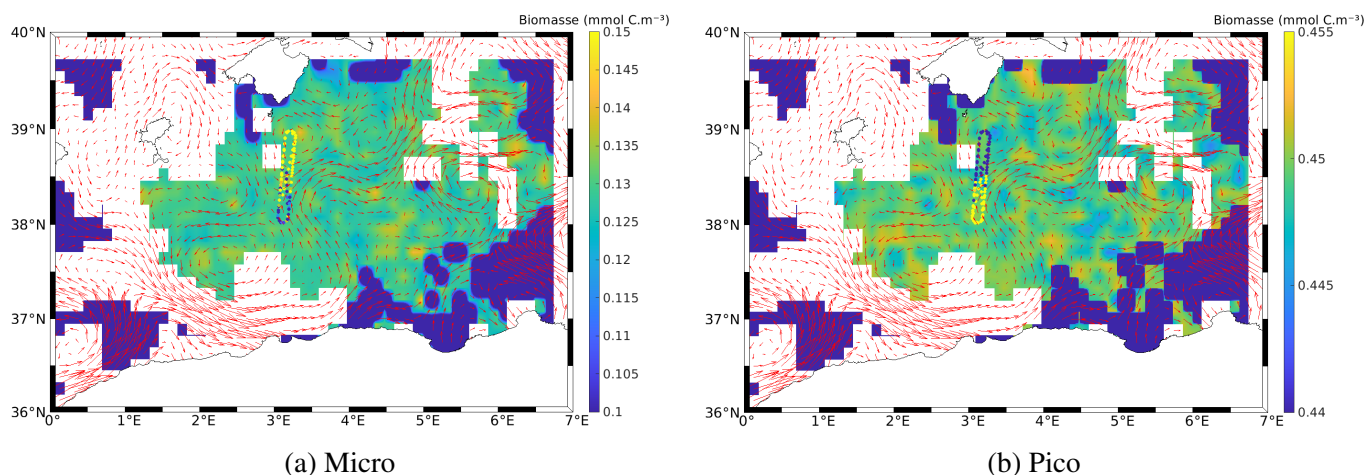


FIGURE 10 – Comparaison des biomasses mesurées *in situ* avec celles modélisées tenant compte de la dépendance à la température de Pico

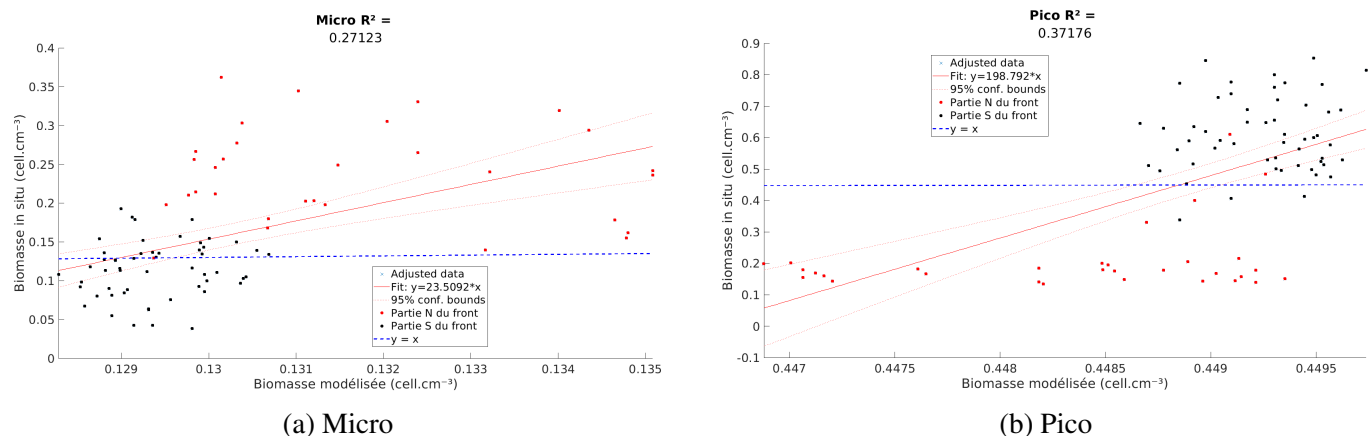


FIGURE 11 – Comparaison des régressions linéaires des biomasses mesurées *in situ* avec celles modélisées tenant compte de la dépendance à la température de Pico

4 Discussion

4.1 Apports des résultats physiques et biologiques

Les résultats montrent que l'advection seule permet d'expliquer une part non négligeable de la distribution horizontale observée lors de la campagne (Tableau VI, Run1). Cela peut s'expliquer par des variations spatiales de la biomasse relativement faibles pour les zones d'origine des masses d'eau composant le front au moment de l'hippodrome, ainsi que par des zone d'origine des masses d'eau peu diversifiées en 13 jours d'advection (Figure 3, section 3.3 et Figure 5, section 3.4.1).

L'ajout du modèle de croissance phytoplanctonique ne permet pas, dans sa configuration où seul le phosphate fait varier le taux de croissance, d'expliquer une part plus grande de la distribution observée (Tableau VI, Run2) que celle lors de l'advection seule. Il semblerait que le modèle, dans sa configuration Run2, avec uniquement un contrôle de la croissance par les concentrations externes (*i.e.* du milieu) de phosphate ne soit pas adapté pour représenter de façon efficace et juste les dynamiques phytoplanctoniques de la zone.

TABLEAU VI – Récapitulatif des R^2 obtenus pour Pico et Micro pour les différentes configurations

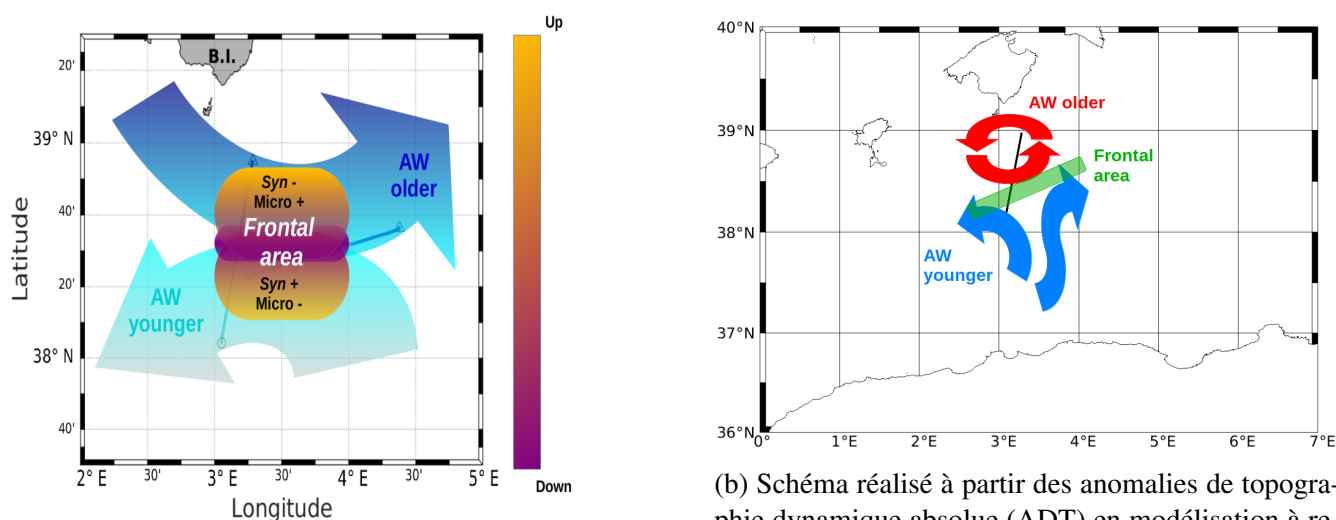
	R^2 Micro	R^2 Pico
Run1(advection)	0,21314	0,29836
Run2(advection,bio_nuts)	0,17924	0,15298
Run3(advection,bio_nuts,bio_SST)	0,27123	0,37176

Cependant l'ajout d'un terme température dépendant dans le calcul du taux de croissance de Pico permet d'expliquer une plus grande partie de la distribution observée pour Pico et pour Micro (Tableau VI, Run3). L'augmentation de la part de la distribution expliquée pour Micro peut résider dans la gestion plus réaliste de Pico par ajout du facteur température. En effet, Pico présentait une bonne corrélation à la température (Figure 2b, section 3.1). Cela pourrait permettre de représenter une dynamique plus réaliste favorable à la fois à Pico et à Micro.

L'hypothèse comme quoi la complexification du modèle par l'ajout de la biologie puis de la biologie avec un terme température dépendant doit permettre d'expliquer une part croissante de la distribution horizontale *in situ* des biomasses est en partie vérifiée. En effet, une augmentation d'environ 15% supplémentaires pour Pico et pour Micro est observée entre les configurations Run1 et Run3 (Tableau VI). Mais cette hypothèse est toutefois à nuancer car l'ajout de la biologie sans dépendance à la température montre une explication plus faible que pour l'advection seule.

Concernant le modèle d'advection, la modélisation à rebours de la trajectoire des particules (Figure

5, section 3.4.1) a permis d'identifier les origines des masses composant le front au moment des mesures *in situ* par rapport au produit de courant utilisé. Une schématisation des trajectoires des masses d'eau à l'origine du front est représentée sur la figure 12. Les principales différences entre le schéma de Tzortzis *et al.* (2021) (Figure 12a) et le nouveau schéma présenté sur la figure 12b peuvent s'expliquer d'une part par la différence du point de vue d'observation. En effet, Tzortzis *et al.* (2021) utilisent les données du sADCP



(a) Schéma réalisé à partir du sADCP. Tiré de Tzortzis *et al.* (2021)

(b) Schéma réalisé à partir des anomalies de topographie dynamique absolue (ADT) en modélisation à rebours du temps. La radiale de l'hippodrome est représentée par la ligne noire.

FIGURE 12 – Comparaison des schématisations des courants sur la période de l'hippodrome.

mesurées le long de la route suivie par le navire, ce qui se rapproche d'une stratégie pseudo-Eulérienne. Le schéma actualisé est issu d'un modèle à particules Lagrangiennes. L'utilisation de modèles, et d'autant plus de modèles Lagrangiens permet des reconstitutions du champ de courant dans un cadre spatio-temporel plus étendu. Lorsque la route suivie lors de la campagne *PROTEVSMED-SWOT* ne permet qu'un aperçu à un instant donné des courants dans la masse d'eau traversée, la modélisation propose une vision élargie dans l'espace et dans le temps, ce qui permet de mettre à jour ce qui semble être des méandres parcourus par les deux masses caractéristiques du front étudié (Figure 4, section 3.4.1) de part et d'autre du front là où les mesures de sADCP ne permettaient que d'observer deux masses d'eau de sens opposés.

4.2 Limitation de l'étude et améliorations possibles

La modélisation de l'advection a permis d'apporter des éléments nouveaux par rapport à l'interprétation des mouvements des masses d'eau réalisée par Tzortzis *et al.* (2021). La prochaine mission *BIOSWOTMED* de 2023 permettra d'apporter des éléments supplémentaires par l'utilisation d'une méthode de détermination des courants originale, à savoir la mesure des anomalies de hauteur dynamique (DH) par satellite (*SWOT* 2022, <https://swot.jpl.nasa.gov/resources/171/swot-nasa-cnes-satellite-to-survey-the-worlds-water-mission-overview/>). Jusqu'à présent, le produit de courant utilisé est

le produit à $1/8^\circ$ basé sur les anomalies de topographie dynamique absolue (ADT). Comme le montrent Barceló-Llull *et al.* (2021), les anomalies de hauteur dynamique, calculées pour une période proche de la période de l'hippodrome, permettent une représentation plus précise et plus juste des courants qu'une estimation des courants par anomalie d'ADT. Cela permettra d'améliorer les futurs produits de courant utilisés dans le modèle et d'ainsi représenter une advection actualisée plus juste et à plus grande résolution. La mission *BIOSWOTMED* de 2023 reposera sur la mission satellite *SWOT* de 2022 .

Concernant le modèle, bien que l'utilisation de modèles relativement simples (NPZ) soit plébiscitée par Megrey *et al.* (2007) et Fennel & Neumann (2015) pour représenter de façon générale les bas niveaux trophiques, ce type de modèle semble toutefois avoir ses limites, notamment pour cette étude qui se situe dans un contexte oligotrophe prononcé typique de la Méditerranée occidentale. En effet, la zone d'étude est caractérisée par une (co)-limitation par les phosphates. Pour permettre au petit phytoplancton d'être dominant dans cette situation oligotrophe, l'utilisation des rapports stoechiométriques internes des organismes modélisés permet de limiter la croissance non pas uniquement par la concentration externe (*i.e.* du milieu) en nutriments, mais également par le rapport interne des organismes par rapport aux autres nutriments (nitrates) et au carbone (Baklouti *et al.*, 2021).

De plus, l'utilisation d'un modèle paramétré avec les carbones (*e.g.* concentrations de nutriments converties en équivalent carbonné) oblige à se baser sur le rapport de Redfield (C/N/P = 106/16/1) pour convertir les différentes variables du modèle en carbone. Or le rapport de Redfield tel qu'énoncé précédemment ne s'avère être respecté que dans des environnements riches et non limités en nutriments (Pujo-Pay *et al.*, 2011), ce qui n'est pas le cas de la Méditerranée. De plus les rapports stoechiométriques C/N/P s'avèrent être peu connus pour la Méditerranée dans la couche de surface pour la période estivale. Le modèle dans sa configuration actuel est idéal pour des situations n'apportant pas de limitation internes des organismes aux nutriments, c'est par exemple le cas de l'*upwelling* de Californie, cas pour lequel a été créé le modèle initialement (Messié *et al.*, 2022).

Le modèle aura permis de mettre en lumière un co-contrôle de la distribution horizontale du phytoplancton par l'advection et les processus biologiques. Un affinage de l'étude du contrôle des distributions horizontales pourra être fait par les mesures *in situ* de paramètres utiles à l'initialisation du modèle tels que les nutriments et les taux de croissance phytoplanctoniques par exemple. Pour cette étude, les taux de croissance estimés des mesures *in situ* pendant la campagne à partir de la méthode développée par Dugenne *et al.* (2014) et Marrec *et al.* (2018) appliquée aux données de la campagne *PROTEVSMED-SWOT* n'était pas possible compte tenu de la trop forte disparité dans les groupes Pico et Micro.

Une autre possibilité d'amélioration du modèle serait l'ajout d'un compartiment détritique, comprenant le cycle de (re)minéralisation bactérien, pour avoir un modèle de type Nutriments-Phytoplancton-Zooplancton-Détritus (NPZD). L'utilisation de ce type de modèle peut permettre de représenter de façon plus cohérente qu'un modèle Nutriments-Phytoplancton-Zooplancton (NPZ) le cycle biogéochimique en Méditerranée et dans les zones oligotrophes où le recyclage des nutriments est essentiel au maintien des communautés (Fasham *et al.*, 1990). Il peut être également envisageable d'avoir un modèle présentant un niveau de complexité supplémentaire, comme cité précédemment incluant les rapports stoechiométriques internes (Baklouti *et al.*, 2021) ou bien en représentant un plus grand nombre de processus dans les expressions mathématiques décrivant le modèle (Aumont *et al.*, 2003).

5 Conclusion

Dans le cadre de ce stage, grâce à un modèle Lagrangien couplé nous avons étudié certains des différents processus qui peuvent expliquer la distribution horizontale de deux groupes phytoplanctoniques dont les abondances ont été mesurées *in situ* pendant la campagne PROTEVSMED_SWOT. Concernant les processus biologiques, lorsqu'ils sont correctement représentés (*i.e.* en ayant un terme de forçage de la température), ils permettent d'expliquer une part plus importante de la distribution horizontale observée par rapport à l'advection seule. Cet élément valide l'hypothèse formulée comme quoi le couplage d'un modèle physique et d'un modèle biologique température dépendant permet d'expliquer une part plus importante de la distribution horizontale des biomasses phytoplanctoniques observées lors de la campagne PROTEVSMED-SWOT qu'un modèle d'advection. La modélisation Lagrangienne a permis d'apporter des éléments nouveaux à l'origine des masses d'eau et à la constitution du front en permettant une vision spatio-temporelle plus étendue et complète que les mesures du sADCP seules. Enfin ce stage offre une bonne base de travail pour la suite, la mission BIOSWOTSWOT 2023 apportera son lot d'avancées techniques facilitant l'initialisation des futures nouvelles configurations du modèles qui bénéficieront également des points soulevés lors de la discussion comme par exemple le passage à une configuration NPZD permettant de représenter de façon plus réaliste le cycle de (re)minéralisation de la matière, le passage à un modèle exprimé en phosphate pour s'affranchir des rapports de Redfield et encore l'ajout de la limitation interne des nutriments par les rapports stoechiométriques internes des organismes.

Références

- Auger, P. A., Diaz, F., Ulses, C., Estournel, C., Neveux, J., Joux, F., Pujo-Pay, M., & Naudin, J. J. 2011. Functioning of the planktonic ecosystem on the Gulf of Lions shelf (NW Mediterranean) during spring and its impact on the carbon deposition : a field data and 3-D modelling combined approach. *Biogeosciences*, **8**(11), 3231–3261. doi : 10.5194/bg-8-3231-2011.
- Aumont, Olivier, Maier-Reimer, Ernst, Blain, Stéphane, & Monfray, P. 2003. An ecosystem model of the global ocean including Fe, Si, P colimitations. *Global Biogeochemical Cycles*, **17**(2). doi : 10.1029/2001GB001745.
- Baklouti, Melika, Pagès, Rémi, Alekseenko, Elena, Guyennon, Arnaud, & Grégori, Gérald. 2021. On the benefits of using cell quotas in addition to intracellular elemental ratios in flexible-stoichiometry Plankton functional type models. Application to the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, **197**(Sept.), 102634. doi : 10.1016/j.pocean.2021.102634.
- Bissinger, Jan E., Montagnes, David J. S., Harples, Jonathan, & Atkinson, David. 2008. Predicting marine phytoplankton maximum growth rates from temperature : Improving on the Eppley curve using quantile regression. *Limnology and Oceanography*, **53**(2), 487–493. doi : 10.4319/lno.2008.53.2.0487.
- Blanke, Bruno, & Raynaud, Stéphane. 1997. Kinematics of the Pacific Equatorial Undercurrent : An Eulerian and Lagrangian Approach from GCM Results. *Journal of Physical Oceanography*, **27**(6), 1038–1053. doi : 10.1175/1520-0485(1997)027<1038 :KOTPEU>2.0.CO;2.
- Cuypers, Y., Bouruet-Aubertot, P., Marec, C., & Fuda, J.-L. 2012. Characterization of turbulence from a fine-scale parameterization and microstructure measurements in the Mediterranean Sea during the BOUM experiment. *Biogeosciences*, **9**(8), 3131–3149. doi : 10.5194/bg-9-3131-2012.
- Dobler, Delphine, Huck, Thierry, Maes, Christophe, Grima, Nicolas, Blanke, Bruno, Martinez, Elodie, & Ardhuin, Fabrice. 2019. Large impact of Stokes drift on the fate of surface floating debris in the South Indian Basin. *Marine Pollution Bulletin*, **148**(Nov.), 202–209. doi : 10.1016/j.marpolbul.2019.07.057.
- d'Ovidio, Francesco, De Monte, Silvia, Alvain, Séverine, Dandonneau, Yves, & Lévy, Marina. 2010. Fluid dynamical niches of phytoplankton types. *PNAS*, **107**(43), 18366–18370. doi : 10.1073/pnas.1004620107.
- Dugenne, Mathilde, Thyssen, Melilotus, Nerini, David, Mante, Claude, Poggiale, Jean-Christophe, Garcia, Nicole, Garcia, Fabrice, & Grégori, Gérald J. 2014. Consequence of a sudden wind event on the dynamics of a coastal phytoplankton community : an insight into specific population growth rates using a single cell high frequency approach. *Frontiers in Microbiology*, **5**(Sept.). doi : 10.3389/fmicb.2014.00485.
- Eppley, R. W. 1972. Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fish. Bull.*, **70**(4), 1063–1085.
- Fasham, M. J. R., Ducklow, H. W., & McKelvie, S. M. 1990. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer. *Journal of Marine Research*, **48**(3), 591–639. doi : 10.1357/002224090784984678.
- Fennel, Wolfgang, & Neumann, Thomas. 2015. *Introduction to the modelling of marine ecosystems*. 2nd edition edn. Amsterdam, Netherlands : Elsevier.
- Ferrari, Raffaele, & Wunsch, Carl. 2009. Ocean Circulation Kinetic Energy : Reservoirs, Sources, and Sinks. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **41**(1), 253–282. doi : 10.1146/annurev.fluid.40.111406.102139.
- Fofonoff, N. P., & Millard Jr, R. C. 1983. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater. *UNESCO Technical Papers in Marine Sciences*, **44**. doi : 10.25607/OBP-1450.
- Hanson, China A., Fuhrman, Jed A., Horner-Devine, M. Claire, & Martiny, Jennifer B. H. 2012. Beyond biogeographic patterns : processes shaping the microbial landscape. *Nature Reviews Microbiology*, **10**(7), 497–506. doi : 10.1038/nrmicro2795.
- Johnson, Kenneth S., Riser, Stephen C., & Karl, David M. 2010. Nitrate supply from deep to near-surface waters of the North Pacific subtropical gyre. *Nature*, **465**(7301), 1062–1065. doi : 10.1038/nature09170.
- Lazzari, P., Solidoro, C., Ibello, V., Salon, S., Teruzzi, A., Béanger, K., Colella, S., & Crise, A. 2012. Seasonal and inter-annual variability of plankton chlorophyll and primary production in the Mediterranean Sea : a modelling approach. *Biogeosciences*, **9**(1), 217–233. doi : 10.5194/bg-9-217-2012.
- Leroy, Claude C., & Parthiot, François. 1998. Depth-pressure relationships in the oceans and seas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **103**(3), 1346–1352. doi : 10.1121/1.421275.
- Lévy, M., Franks, P.J.S., & Smith, K.S. 2018. The role of submesoscale currents in structuring marine ecosystems. *Nat. Commun.*, **9**(1), 4758. doi : 10.1038/s41467-018-07059-3.
- Maes, C., Grima, N., Blanke, B., Martinez, E., Paviet-Salomon, T., & Huck, T. 2018. A Surface “Superconvergence” Pathway Connecting the South Indian Ocean to the Subtropical South Pacific Gyre. *Geophysical Research Letters*, **45**(4), 1915–1922. doi : 10.1002/2017GL076366.
- Mahadevan, Amala. 2016. The impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **8**, 161–184. doi : 10.1146/annurev-marine-010814-015912.
- Mahadevan, Amala, & Tandon, Amit. 2006. An analysis of mechanisms for submesoscale vertical motion at ocean fronts. *Ocean Model.*, **14**(3–4), 241–256. doi : 10.1016/j.ocemod.2006.05.006.
- Marrec, Pierre, Grégori, Gérald, Doglioli, Andrea M., Dugenne, Mathilde, Della Penna, Alice, Bhairy, Nagib, Cariou, Thierry, Hélias Nunige, Sandra, Lahbib, Soumaya, Rougier, Gilles, Wagener, Thibaut, & Thyssen, Melilotus. 2018. Coupling physics and biogeochemistry thanks to high-resolution observations of the phytoplankton community structure in the northwestern Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, **15**(5), 1579–1606. doi : 10.5194/bg-15-1579-2018.
- McGillicuddy, Dennis J., Anderson, Laurence A., Bates, Nicholas R., Bibby, Thomas, Buesseler, Ken O., Carlson, Craig A., Davis, Cabell S., Ewart, Courtney, Falkowski, Paul G., Goldthwait, Sarah A., Hansell, Dennis A., Jenkins, William J., Johnson, Rodney, Kosnyrev, Valery K., Ledwell, James R., Li, Qian P., Siegel, David A., & Steinberg, Deborah K. 2007. Eddy/Wind Interactions Stimulate Extraordinary Mid-Ocean Plankton Blooms. *Science*, **316**(5827), 1021–1026. doi : 10.1126/science.1136256.
- McWilliams, James C. 2016. Submesoscale currents in the ocean. *P. Roy. Soc. A-Math. Phys.*, **472**(2189), 20160117. doi : 10.1098/rspa.2016.0117.
- Megrey, Bernard A., Rose, Kenneth A., Klumb, Robert A., Hay, Douglas E., Werner, Francisco E., Eslinger, David L., & Smith, S. Lan. 2007. A bioenergetics-based population dynamics model of Pacific herring (*Clupea harengus* pallasi) coupled to a lower trophic level nutrient-phytoplankton-zooplankton model : Description, calibration, and sensitivity analysis. *Ecological Modelling*, **202**(1), 144–164. doi : 10.1016/j.ecolmodel.2006.08.020.
- Menkes, Christophe E., Lengaigne, Matthieu, Lévy, Marina, Ethé, Christian, Bopp, Laurent, Aumont, Olivier, Vincent, Emmanuel, Vialard, Jérôme, & Jullien, Swen. 2016. Global impact of tropical cyclones on primary production. *Global Biogeochemical Cycles*, **30**(5), 767–786. doi : 10.1002/2015GB005214.
- Messié, Monique, & Chavez, Francisco P. 2017. Nutrient supply, surface currents, and plankton dynamics predict zooplankton hotspots in coastal upwelling systems. *Geophysical Research Letters*, **44**(17), 8979–8986. doi : 10.1002/2017GL074322.
- Messié, Monique, Petrenko, Anne, Doglioli, Andrea M., Aldebert, Clément, Martinez, Elodie, Koenig, Guillaume, Bonnet, Sophie, & Moutin, Thierry. 2020. The Delayed Island Mass Effect : How Islands can Remotely Trigger Blooms in the Oligotrophic Ocean. *Geophysical Research Letters*, **47**(2), e2019GL085282. doi : 10.1029/2019GL085282.
- Messié, Monique, Sancho-Gallegos, Diego A., Fiechter, Jerome, Santora, Jarrod A., & Chavez, Francisco P. 2022. Satellite-Based Lagrangian Model Reveals How Upwelling and Oceanic Circulation Shape Riff Hotspots in the California Current System. *Frontiers in Marine Science*, **9**. doi : 10.3389/fmars.2022.835813.
- Morrow, Rosemary, Fu, Lee-Lueng, Ardhuin, Fabrice, Benkiran, Mounir, Chapron, Bertrand, Cosme, Emmanuel, d'Ovidio, Francesco, Farrar, J Thomas, Gille, Sarah T, Lapeyre, Guillaume, & others. 2019. Global observations of fine-scale ocean surface topography with the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission. *Front. Mar. Sci.*, **6**, 232. doi : 10.3389/fmars.2019.00232.
- Osborn, T. R. 1980. Estimates of the Local Rate of Vertical Diffusion from Dissipation Measurements. *Journal of Physical Oceanography*, **10**(1), 83–89. doi : 10.1175/1520-0485(1980)010<0083 :EOTLRO>2.0.CO;2.
- Pagès, Rémi, Baklouti, Melika, Barrier, Nicolas, Ayache, Mohamed, Sevault, Florence, Sotom, Samuel, & Moutin, Thierry. 2020. Projected Effects of Climate-Induced Changes in Hydrodynamics on the Biogeochemistry of the Mediterranean Sea Under the RCP 8.5 Regional Climate Scenario. *Frontiers in Marine Science*, **7**. doi : 10.3389/fmars.2020.563615.
- Pujo-Pay, M., Conan, P., Oriol, L., Cornet-Barthaux, V., Falco, C., Ghiglione, J.-F., Goyet, C., Moutin, T., & Prieur, L. 2011. Integrated survey of elemental stoichiometry (C, N, P) from the western to eastern Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, **8**(4), 883–899. doi : 10.5194/bg-8-883-2011.
- Pulido-Villena, Elvira, Desboeufs, Karine, Djaoudi, Kahina, Van Wambeke, France, Barrillon, Stéphanie, Doglioli, Andrea, Petrenko, Anne, Taillandier, Vincent, Fu, Franck, Gaillard, Tiphanie, Guasco, Sophie, Nunige, Sandra, Triquet, Sylvain, & Guiou, Cécile. 2021. Phosphorus cycling in the upper waters of the Mediterranean Sea (PEACETIME cruise) : relative contribution of external and internal sources. *Biogeosciences*, **18**(21), 5871–5889. doi : 10.5194/bg-18-5871-2021.
- Ruiz, Simón, Claret, Mariona, Pascual, Ananda, Olita, Antonio, Troupin, Charles, Capet, Arthur, Tovar-Sánchez, Antonio, Allen, John, Poullain, Pierre-Marie, Tintoré, Joaquín, & others. 2019. Effects of oceanic mesoscale and submesoscale frontal processes on the vertical transport of phytoplankton. *J. Geophys. Res.-Oceans*, **124**(8), 5999–6014. doi : 10.1029/2019JC015034.
- Ryan, John P., Polito, Paulo S., Strutton, Peter G., & Chavez, Francisco P. 2002. Unusual large-scale phytoplankton blooms in the equatorial Pacific. *Progress in Oceanography*, **55**(3), 263–285. doi : 10.1016/S0079-6611(02)00137-4.
- Sosik, Heidi M., Olson, Robert J., Neubert, Michael G., Shalapyonok, Alexi, & Solow, Andrew R. 2003. Growth rates of coastal phytoplankton from time-series measurements with a submersible flow cytometer. *Limnology and Oceanography*, **48**(5), 1756–1765. doi : 10.4319/lno.2003.48.5.1756.
- Thyssen, M., Garcia, N., & Denis, M. 2009. Sub meso scale phytoplankton distribution in the North East Atlantic surface waters determined with an automated flow cytometer. *Biogeosciences*, **6**(4), 569–583. doi : 10.5194/bg-6-569-2009.
- Thyssen, Melilotus, Tarran, Glen A., Zubkov, Mikhail V., Holland, Ross J., Grégori, Gérald, Burkill, Peter H., & Denis, Michel. 2008. The emergence of automated high-frequency flow cytometry : revealing temporal and spatial phytoplankton variability. *Journal of Plankton Research*, **30**(3), 333–343. doi : 10.1093/plankt/fbn005.
- Tzortzis, Roxane, Doglioli, Andrea M., Barrillon, Stéphanie, Petrenko, Anne A., d'Ovidio, Francesco, Izard, Lloyd, Thyssen, Melilotus, Pascual, Ananda, Barceló-Llull, Bàrbara, Cyr, Frédéric, Tedetti, Marc, Bhairy, Nagib, Garreau, Pierre, Dumas, Franck, & Grégori, Gérald. 2021. Impact of moderately energetic fine-scale dynamics on the phytoplankton community structure in the western Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, **18**(24), 6455–6477. doi : 10.5194/bg-18-6455-2021.
- Winder, Monika, & Sommer, Ulrich. 2012. Phytoplankton response to a changing climate. *Hydrobiologia*, **698**(1), 5–16. doi : 10.1007/s10750-012-1149-2.

Résumé

L'étude du couplage physique-biologie à fine échelle est un enjeu majeur pour mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes. Les stratégies Lagrangiennes et notamment par modélisation permettent un point de vue plus large sur les zones observées *in situ* et sont une façon plus aisée d'étudier les interactions qui y règnent. Pour ce stage, un modèle à particules Lagrangiennes couplé à un modèle de croissance planctonique a été utilisé pour simuler les abondances mesurées *in situ* pendant la campagne *PROTEVSMED-SWOT* de 2018 et tenter d'expliquer l'influence de la physique et de la biologie sur la distribution phytoplanctonique horizontale observée. Pour se faire il a fallu adapter un modèle de croissance planctonique à la zone d'étude et trouver les relations entre les biomasses phytoplanctoniques observées et les paramètres du milieu pour pouvoir initialiser le modèle. Dans la configuration actuelle, il semblerait que l'advection seule puisse expliquer une partie non négligeable de la distribution des biomasses observée. Le couplage du modèle de plancton avec le modèle d'advection montre les limites du modèle de plancton utilisé, et en absence d'une relation forte entre le taux de croissance du petit phytoplancton et la température, la biologie couplée à l'advection ne permet pas d'expliquer une part plus importante de la distribution observée.

Abstract

The study of the physical-biological coupling at a fine scale is a major challenge to better understand the functioning of ecosystems. Lagrangian strategies, especially by modeling, allow a broader view of the areas observed *in situ* and are an easier way to study the interactions that prevail there. For this internship, a Lagrangian particle model coupled to a planktonic growth model was used to simulate the abundances measured *in situ* during the 2018 *PROTEVSMED-SWOT* cruise and attempt to explain the influence of physics and biology on the observed horizontal phytoplanktonic distribution. To do this it was necessary to fit a planktonic growth model to the study area and find the relationships between the observed phytoplanktonic biomasses and the environmental parameters in order to initialize the model. In the current configuration, it would appear that advection alone can explain a significant portion of the observed biomass distribution. The coupling of the plankton model with the advection model shows the limitations of the plankton model used, and in the absence of a strong relationship between the growth rate of small phytoplankton and temperature, biology coupled with advection does not explain a larger part of the observed distribution.