



Institut Pythéas
Observatoire des Sciences de l'Univers
Aix-Marseille Université



Etude du couplage physique- biologie aux fines échelles par échantillonnage Lagrangien

Master Sciences de la Mer

Parcours : Océanographie Physique et Biogéochimique

Nathan KIENTZ

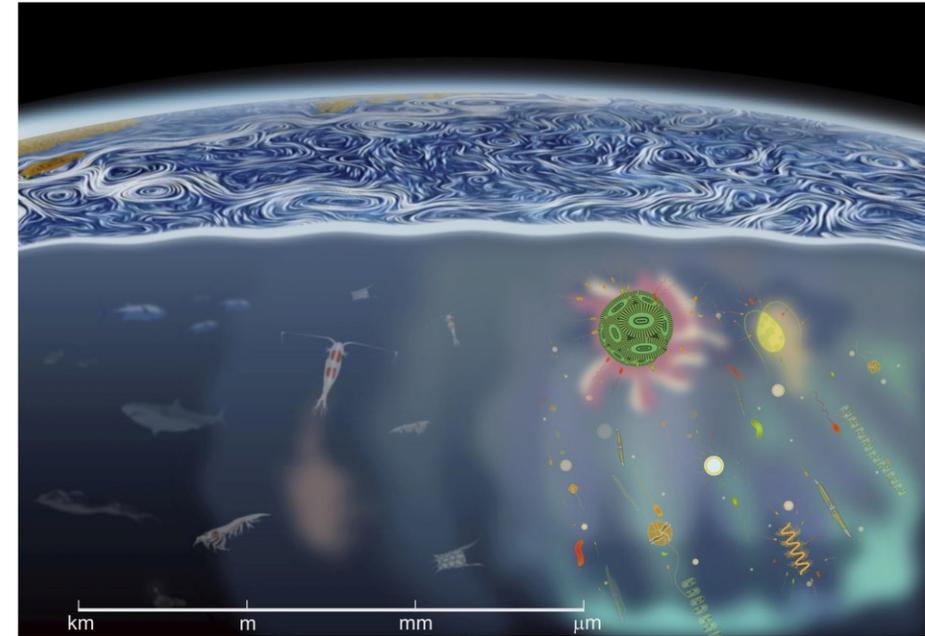
Stage réalisé au sein du M.I.O. sous la direction de :

Andrea Doglioli, Monique Messié (MBARI) et Gérald Grégori

Année universitaire : 2021-2022

Qu'est-ce que la dynamique de fine échelle ?

- Structures : [1-10² km], [jours-mois]
- Circulation agéostrophique tridimensionnelle
 - Visible en terme de courant, de température, de salinité
 - Observation *in situ* difficile
- A partir des années 2000 : augmentation résolution satellites et modèles
 - couplage satellites et modèles pour étude



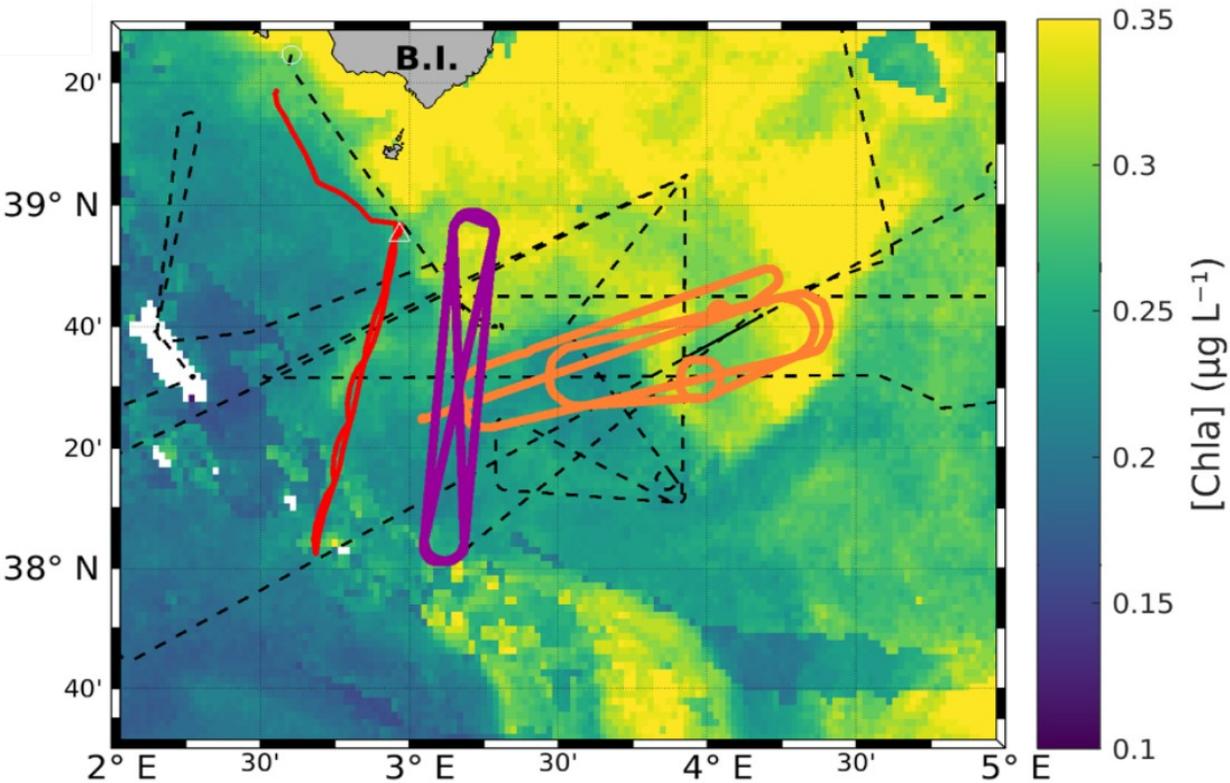
[Basterretxea *et al.*, 2020]

[McWilliams, 2016]

- Rôle clé fines échelles et phytoplancton
 - Flux verticaux de nutriments [Mahadevan, 2016]
 - Influence la distribution planctonique [Lévy *et al.*, 2018]
 - Rôle sur le développement et la répartition des niches écologiques → Barrière infranchissable pour le (phyto)plancton [d'Ovidio *et al.*, 2010]
 - Influence plus grande de l'advection sur le phytoplankton que la sélection environnementale [Hanson *et al.*, 2012]
 - Importance pour le fonctionnement des écosystèmes [Winder & Sommer, 2012]
 - Modélisation simple des bas niveaux trophiques : modèle NPZ [Megrey *et al.*, 2007 ; Fennel & Neumann, 2015]

Campagne PROTEVSMED-SWOT 2018 :

couplage physique-biologie (Seasor, sADCP, cytométrie) et stratégie lagrangienne

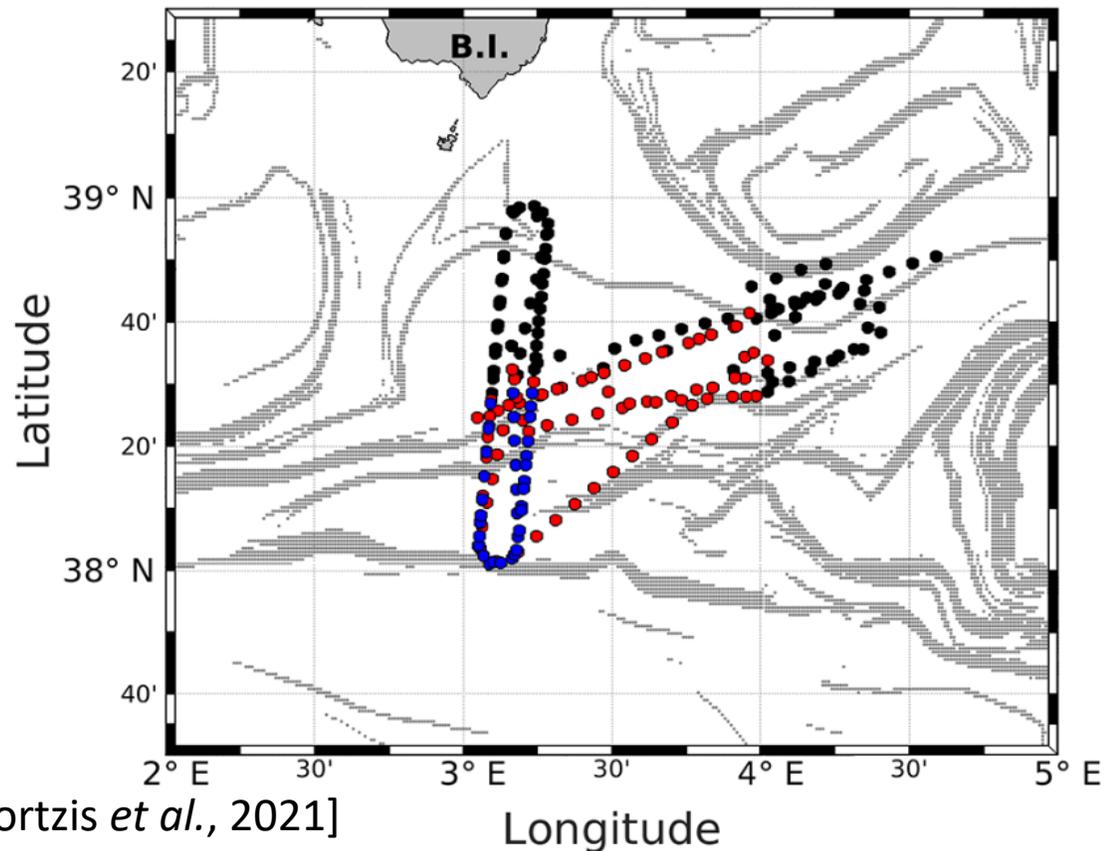


[Tzortzis et al., 2021]

- Echantillonnage sur 3 jours (11 au 13 mai 2018)
- Stratégie d'échantillonnage lagrangienne pour restituer le cycle jour-nuit → **hippodrome**

Campagne PROTEVSMED-SWOT 2018 :

Front induit par la circulation de fine échelle maintient un effet structurant sur les communautés phytoplanctoniques de surface [Tzortzis *et al.*, 2021]



Clustering sur 9 groupes cytométriques,
T et S → 3 communautés distinctes dans
2 masses d'eau différentes :
Eau atlantique vieille au Nord
Eau atlantique jeune au Sud

Comment expliquer la distribution phytoplanctonique ?

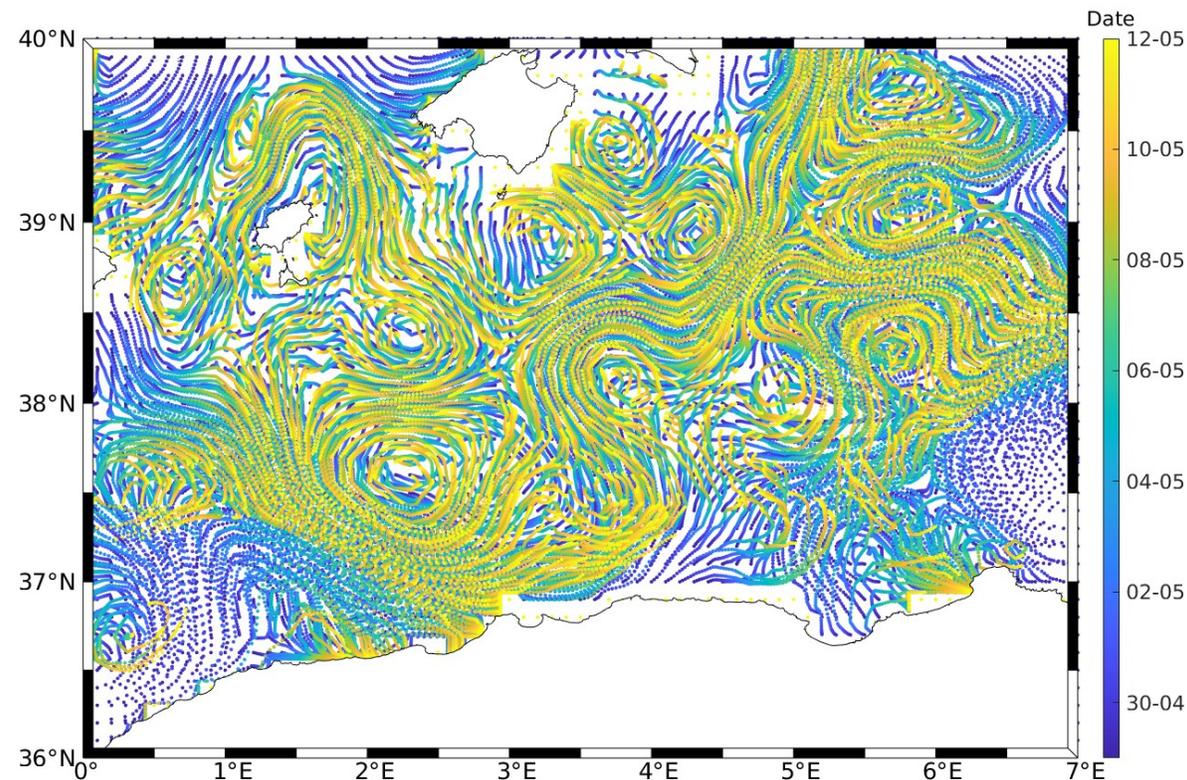
Rôle de la physique ?

Rôle de la biologie ?

→ modélisation numérique lagrangienne couplée à un modèle de plancton adapté à la Méditerranée à partir de mesures *in situ* et de la littérature

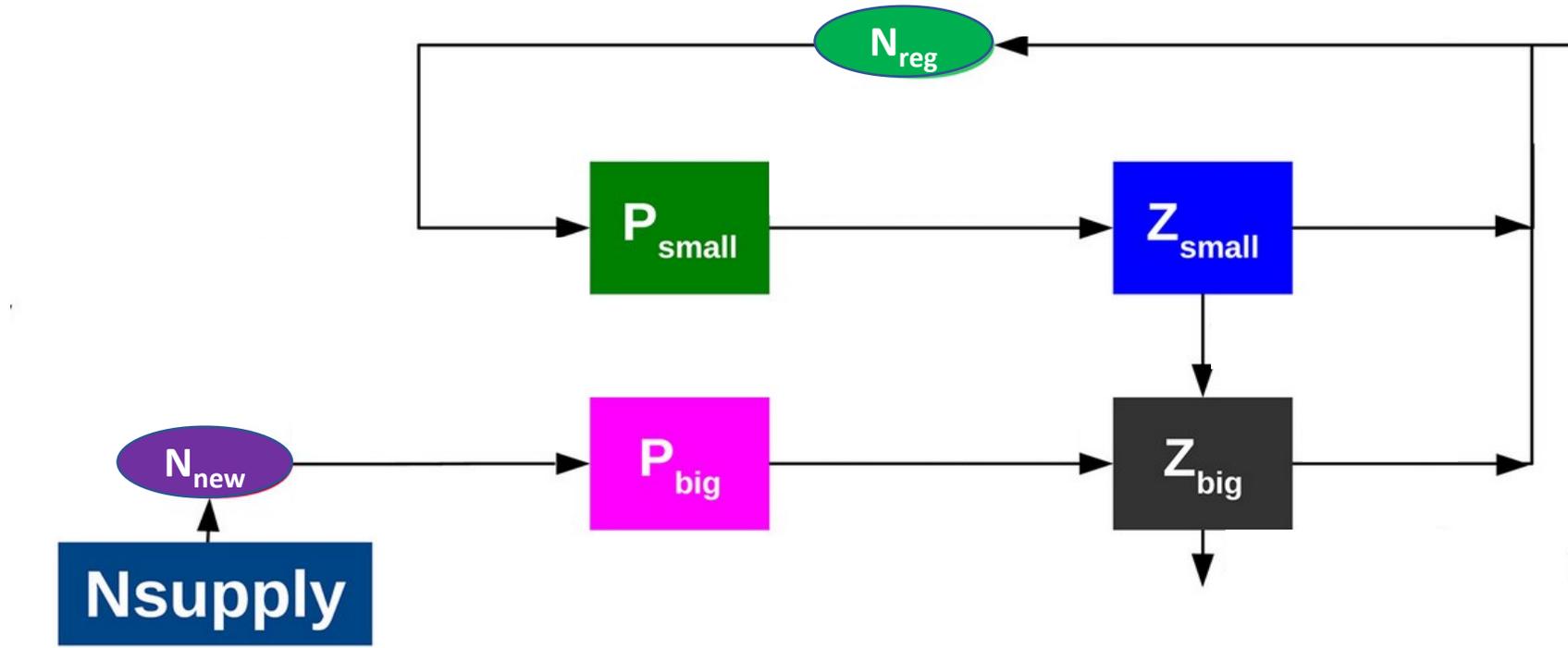
Le modèle *growth-advection* [Messié *et al.*, 2022] :

- Ariane2D [Blanke & Raynaud, 1997] [Messié *et al.*, 2020] : modèle à particules lagrangiennes
- Résolution spatio-temporelle : $0,01^\circ$ (232 069 particules) ; 0,1 jour (13 jours d'advection)
- Données d'entrée : courant dérivé par altimétrie ($0,125^\circ$; 1 jour)



Le modèle **growth-advection** [Messié *et al.*, 2022] :

- Modèle NPZ, adapté pour Phosphates



[Adapté de Messié & Chavez, 2017]

- Début d'adaptation à la Méditerranée [Auger *et al.*, 2011 ; Baklouti *et al.*, 2021 ; Lazzari *et al.*, 2012 ; Pulido-Villena *et al.*, 2021 ; Tzortzis *et al.*, 2021]
- Nombreux tests à l'équilibre

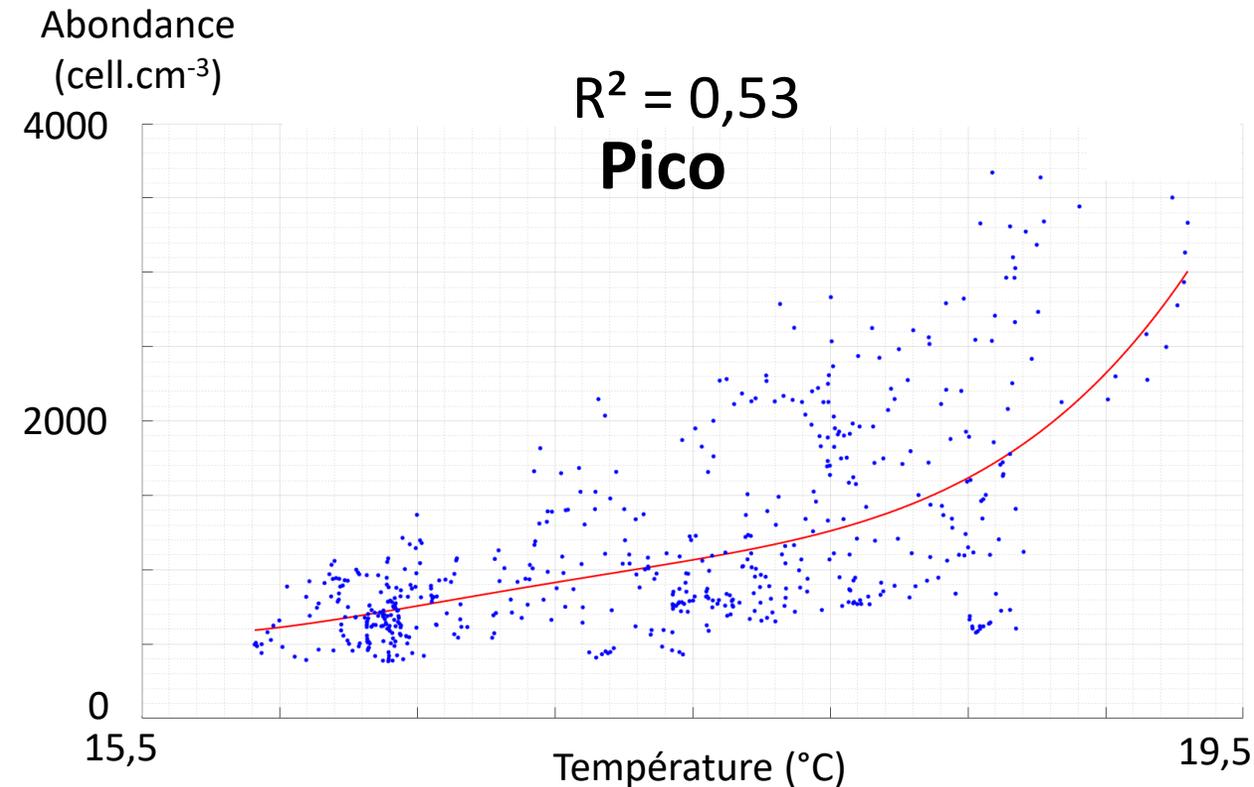
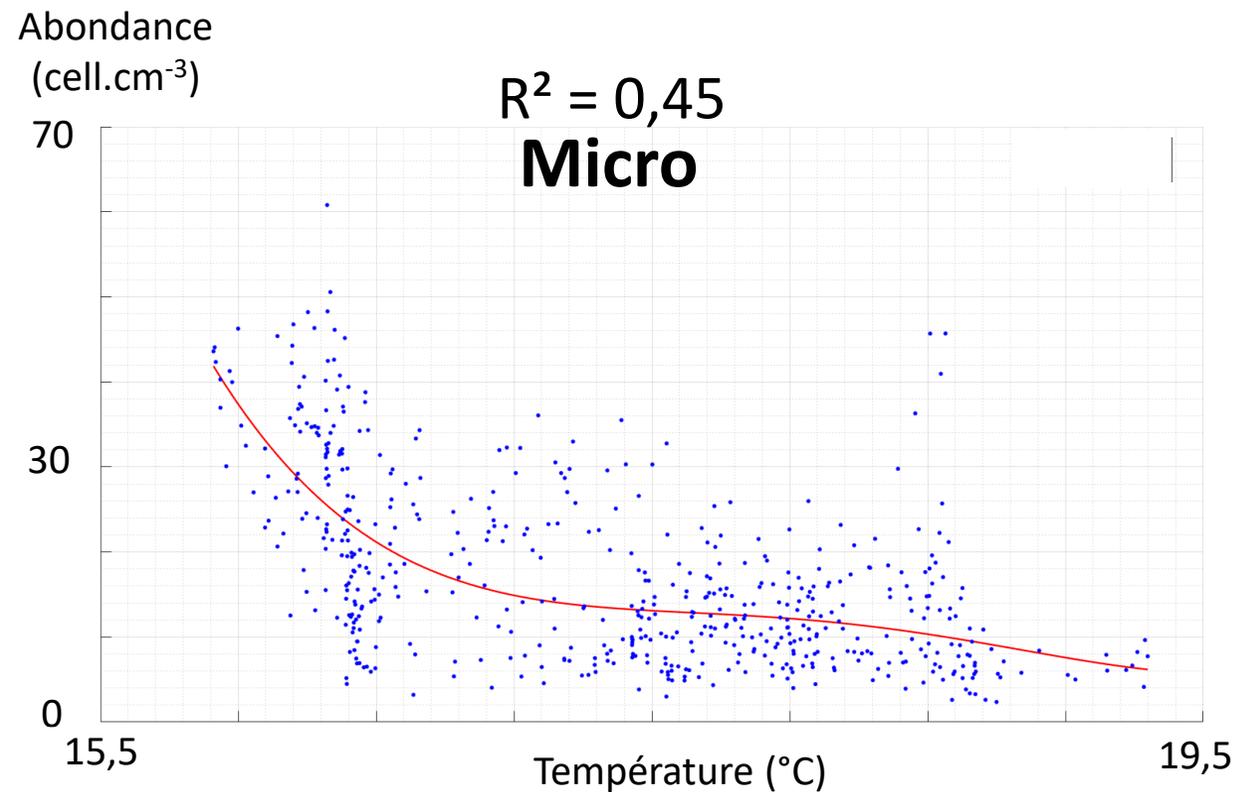
Les données d'entrées :

- SST : 0,01° ; L4, satellite
- Phosphates : 0,042° ; modèles biogéochimiques
- Salinité, Température (3D) et MLD : 0,042° ; modèles physiques → estimation flux phosphates [Pulido-Villena *et al.*, 2021]

→ SST et Nutriments extraits le long des trajectoires

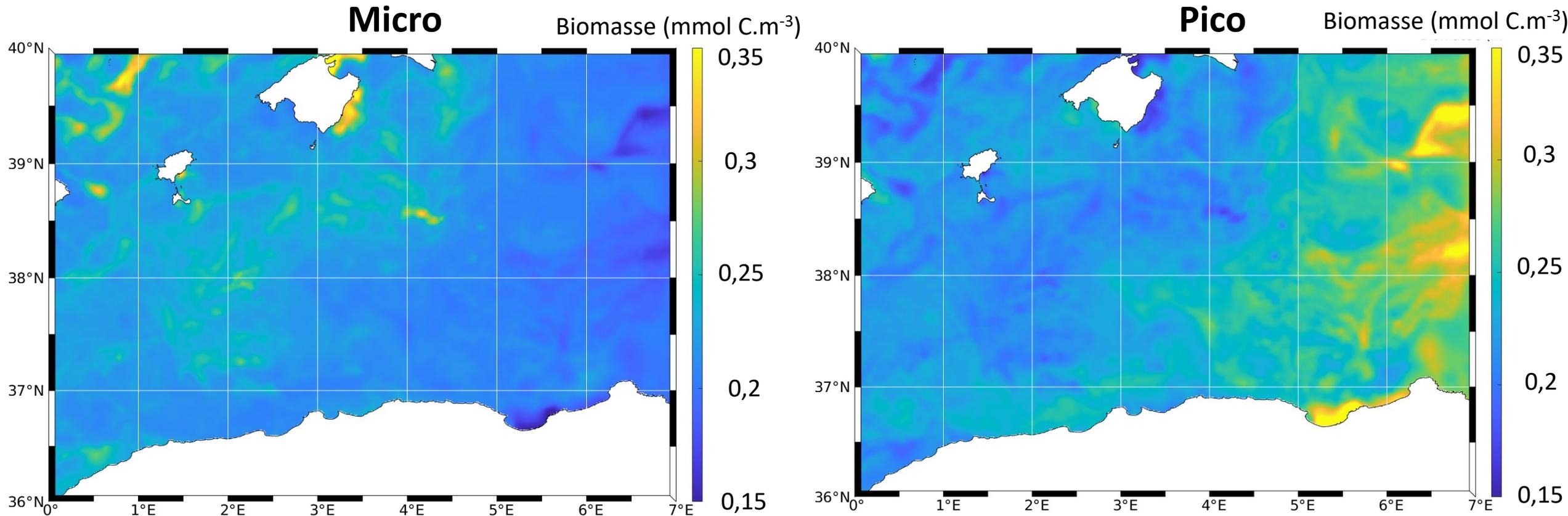
Initialisation du modèle :

- Tous les groupes cytométriques testés avec température, salinité et Chl
- Initialisation dans le modèle par extrapolation des biomasses à partir des relations avec la température du thermosalinographe



Initialisation du modèle:

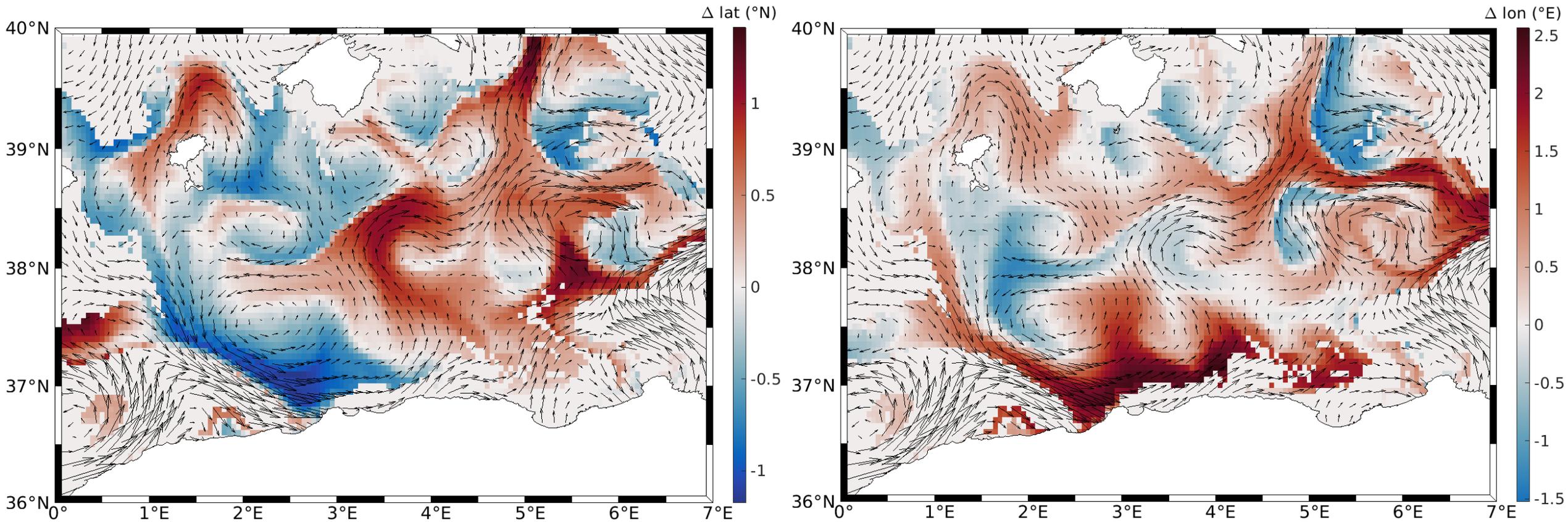
- Initialisation dans le modèle par extrapolation des biomasses à partir des relations avec la température du thermosalinographe



Simulations réalisées :

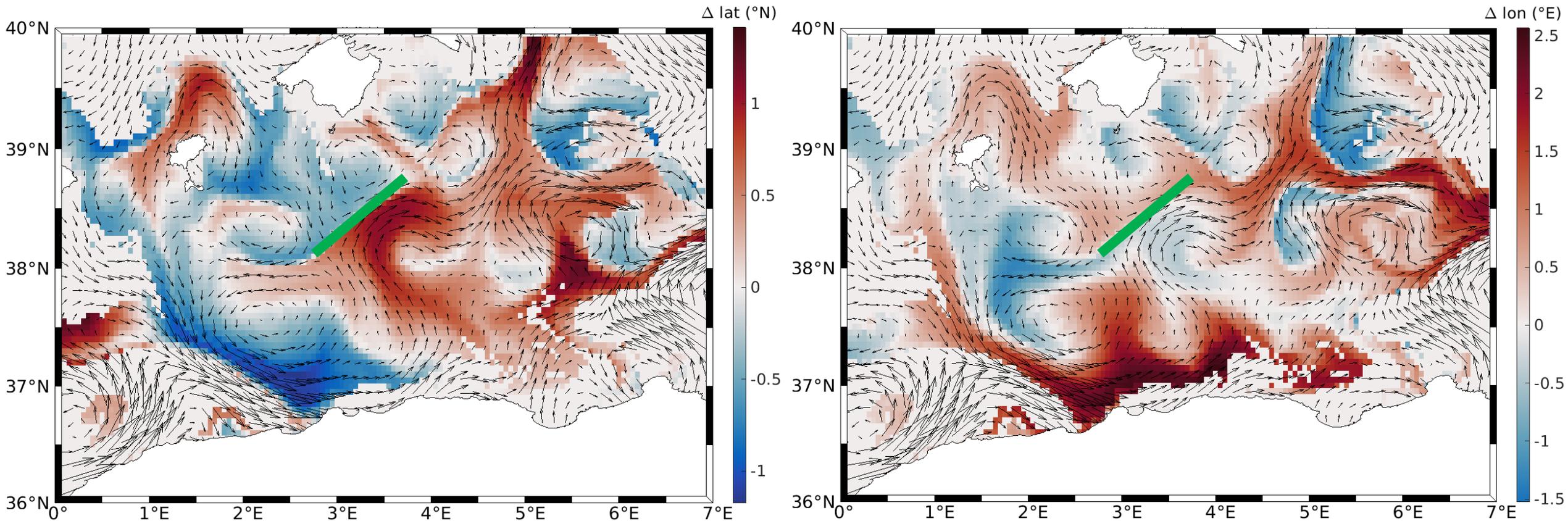
- **Advection des particules lagrangiennes**
- Advection de la SST
- **Advection des biomasses initiales**
- Advection couplée au modèle de plancton avec biomasses initiales constantes
- Advection couplée au modèle de plancton
- **Advection couplée au modèle de plancton température dépendant**

Circulation des masses d'eau au niveau du front



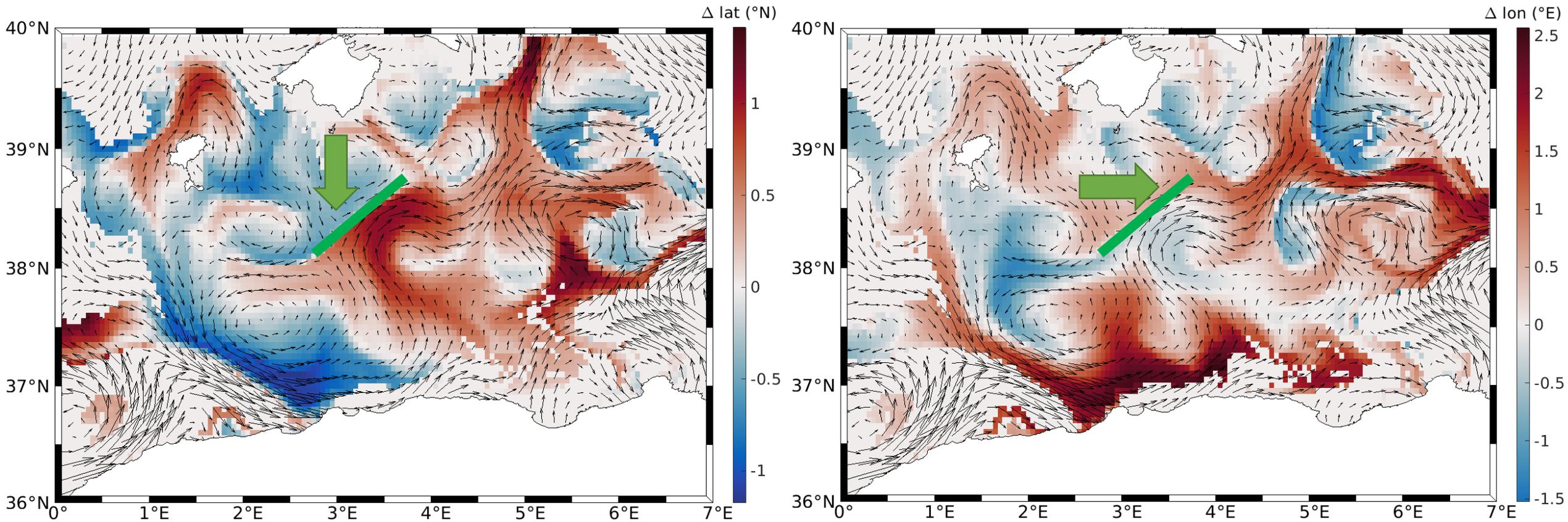
- Front visible par ses deux masses d'eau

Circulation des masses d'eau au niveau du front



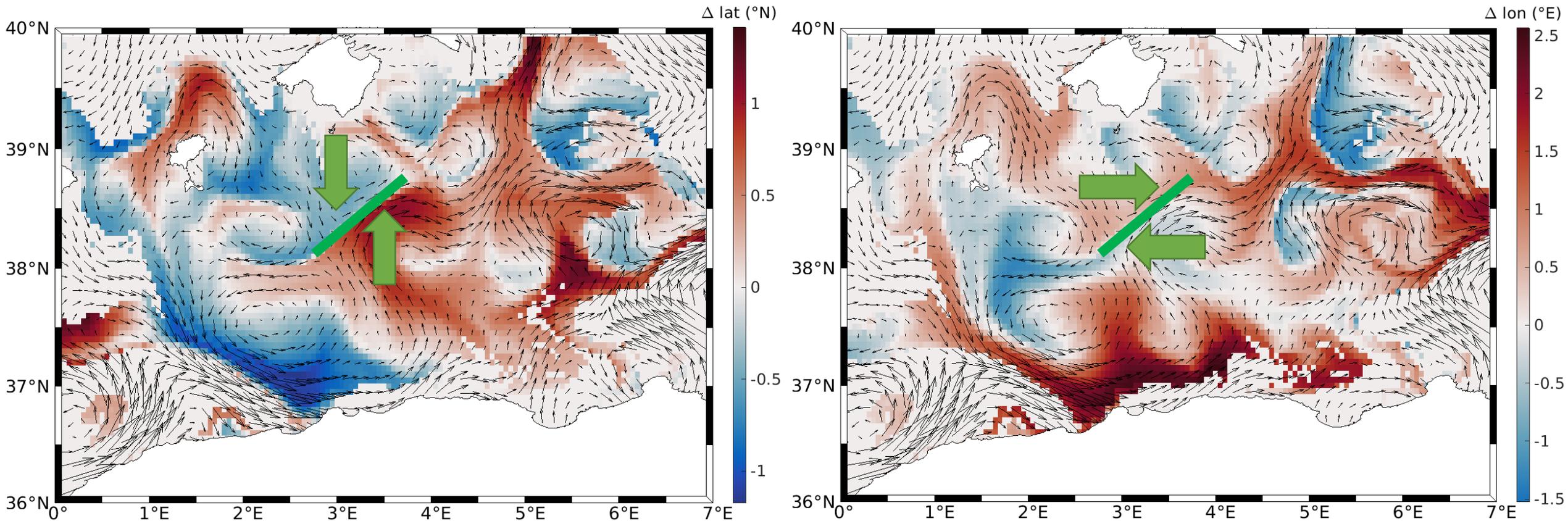
- Front visible par ses deux masses d'eau

Circulation des masses d'eau au niveau du front



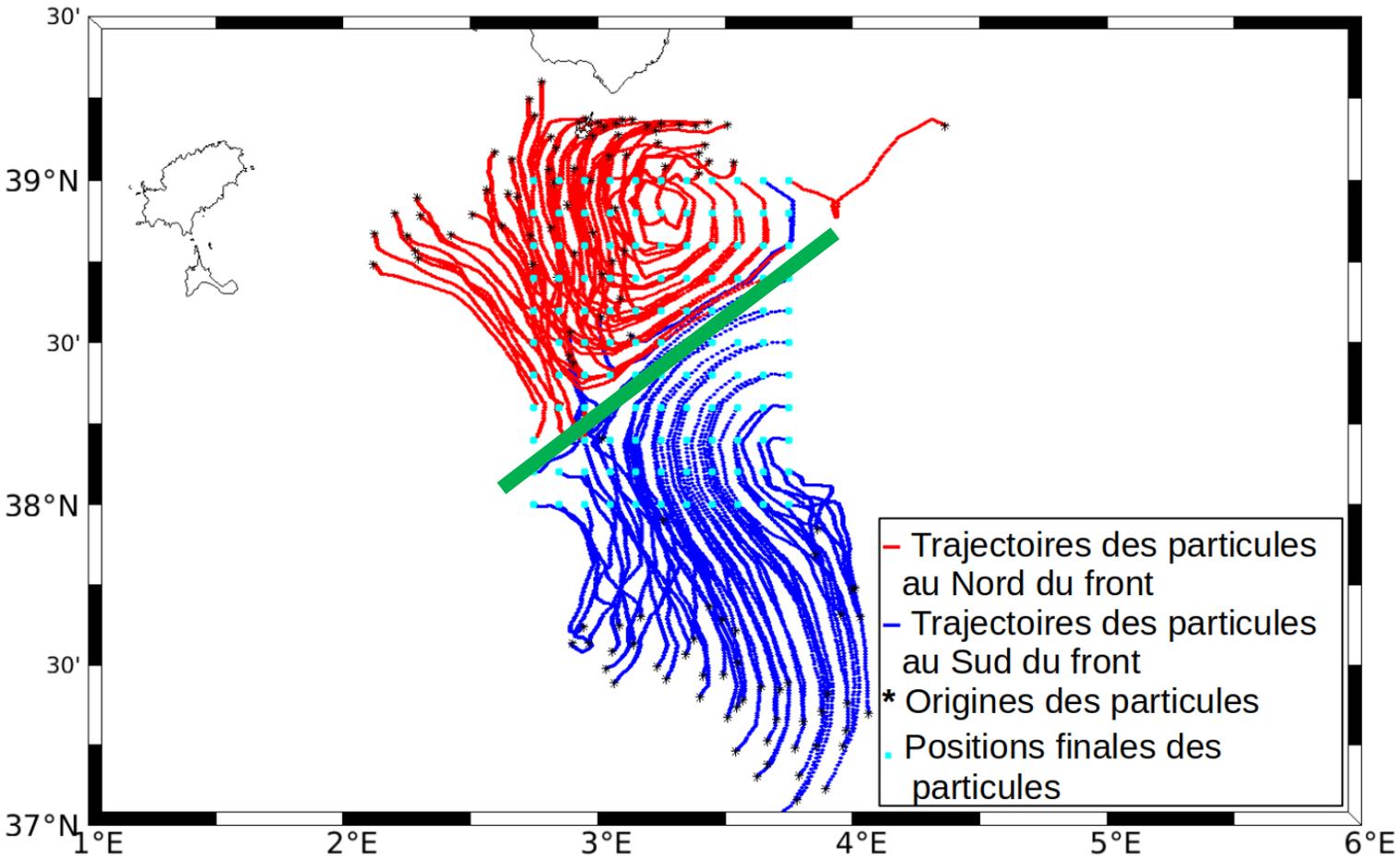
- Front visible par ses deux masses d'eau
 - Partie Nord : vers le Sud et l'Est

Circulation des masses d'eau au niveau du front

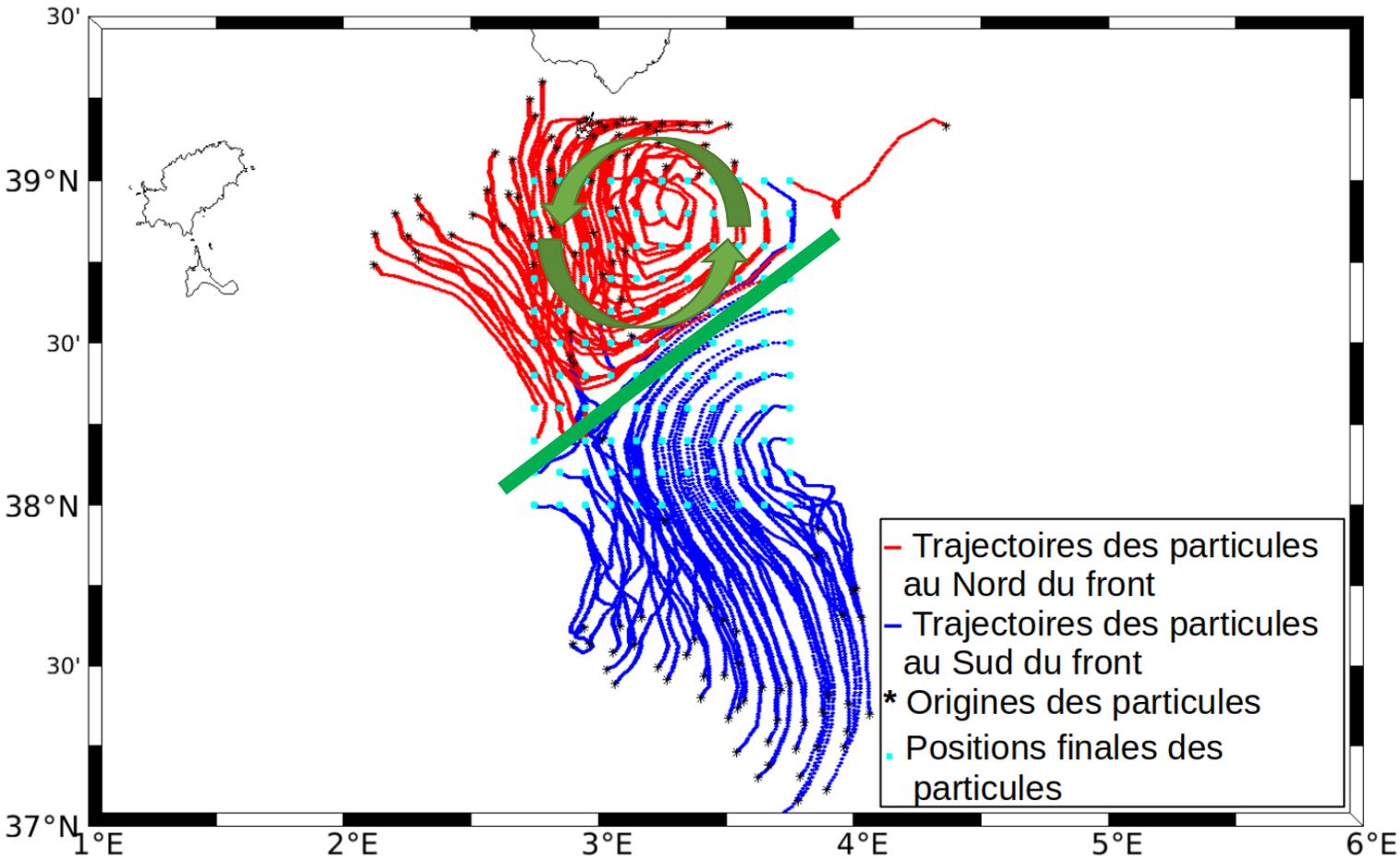


- Front visible par ses deux masses d'eau
 - Partie Nord : vers le Sud et l'Est
 - Partie Sud : vers le Nord et l'Ouest

Circulation des masses d'eau au niveau du front : backward

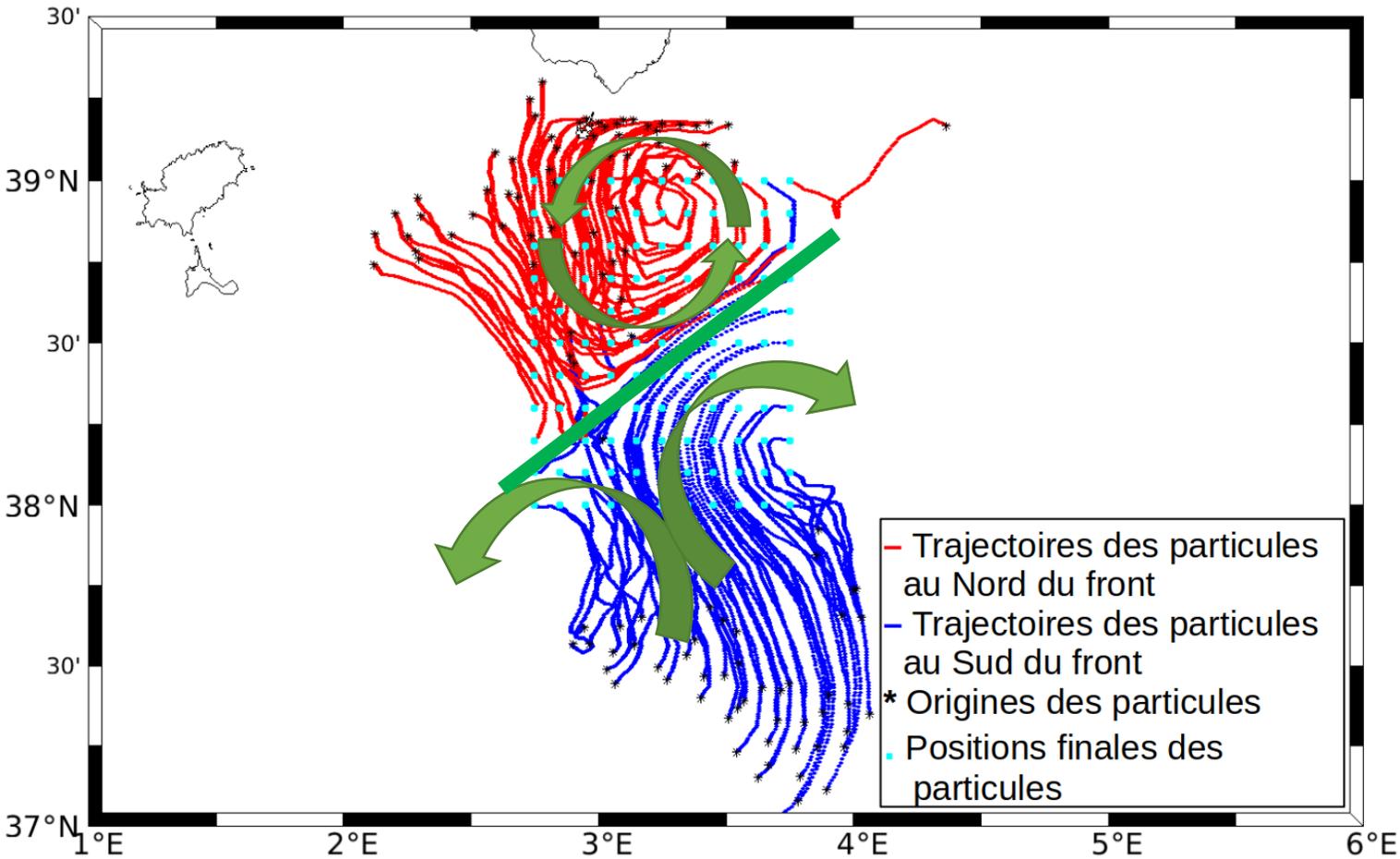


Circulation des masses d'eau au niveau du front : backward



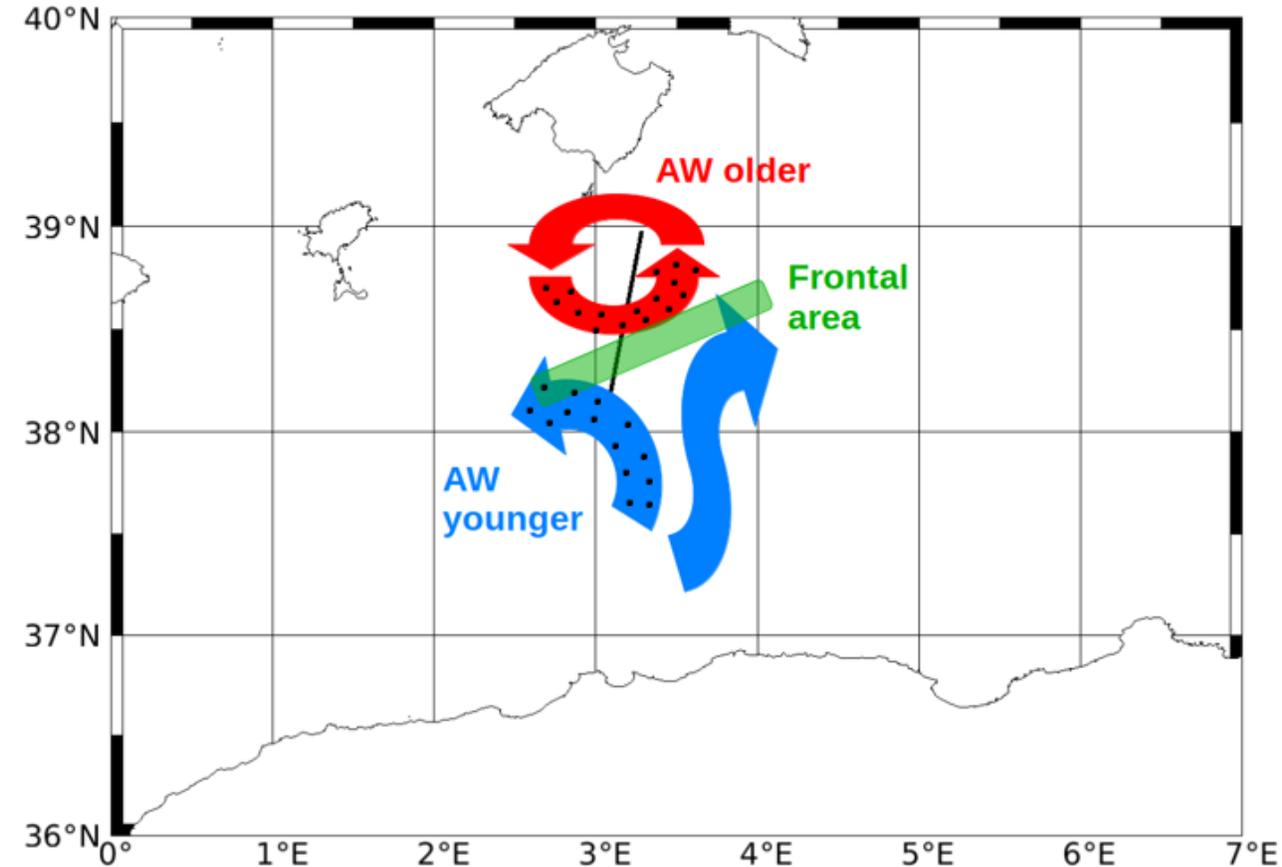
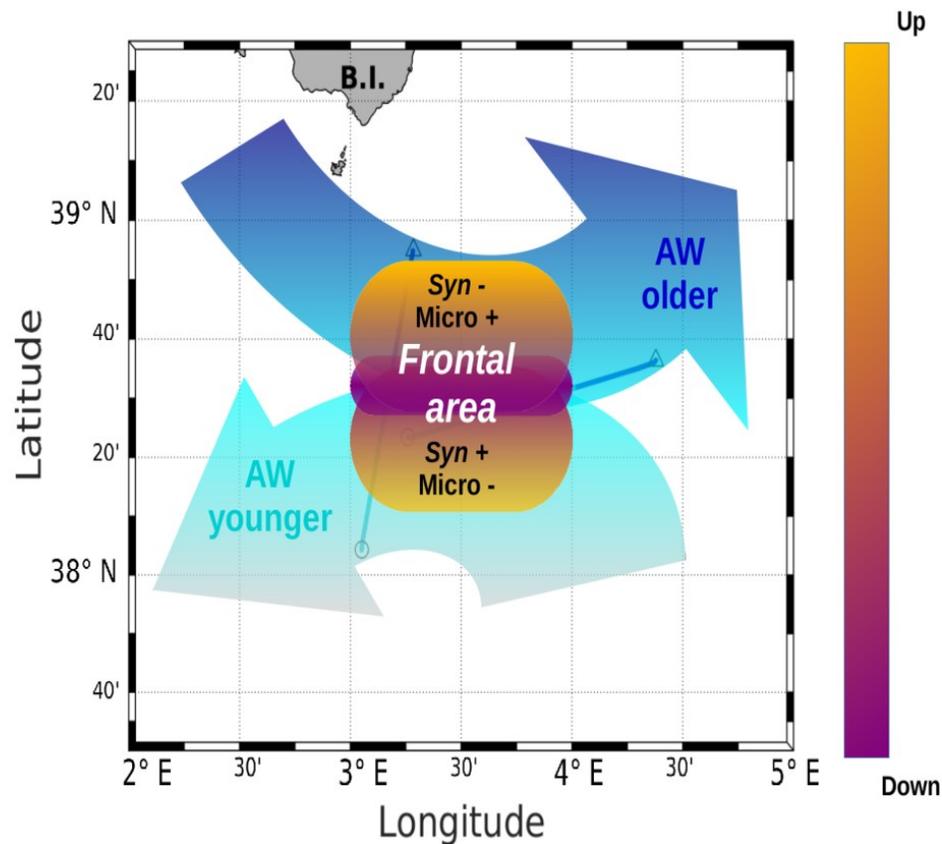
- Partie Nord : tendance cyclonique

Circulation des masses d'eau au niveau du front : backward



- Partie Nord : tendance cyclonique
- Partie Sud : méandres

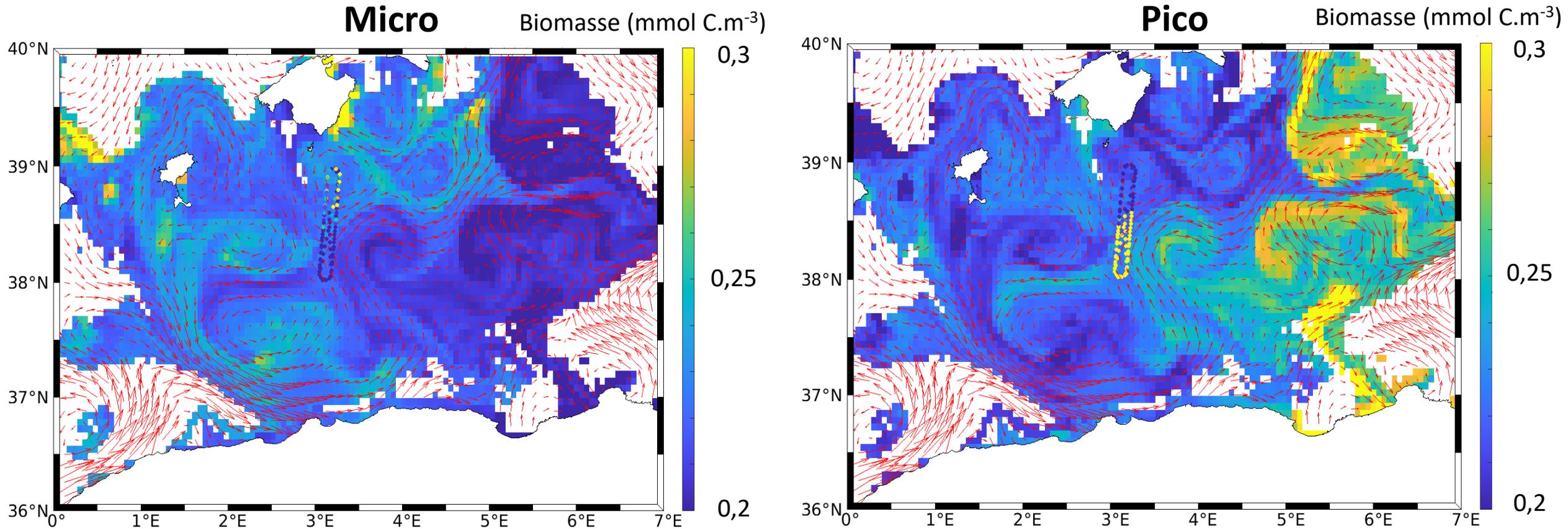
Circulation des masses d'eau au niveau du front : backward



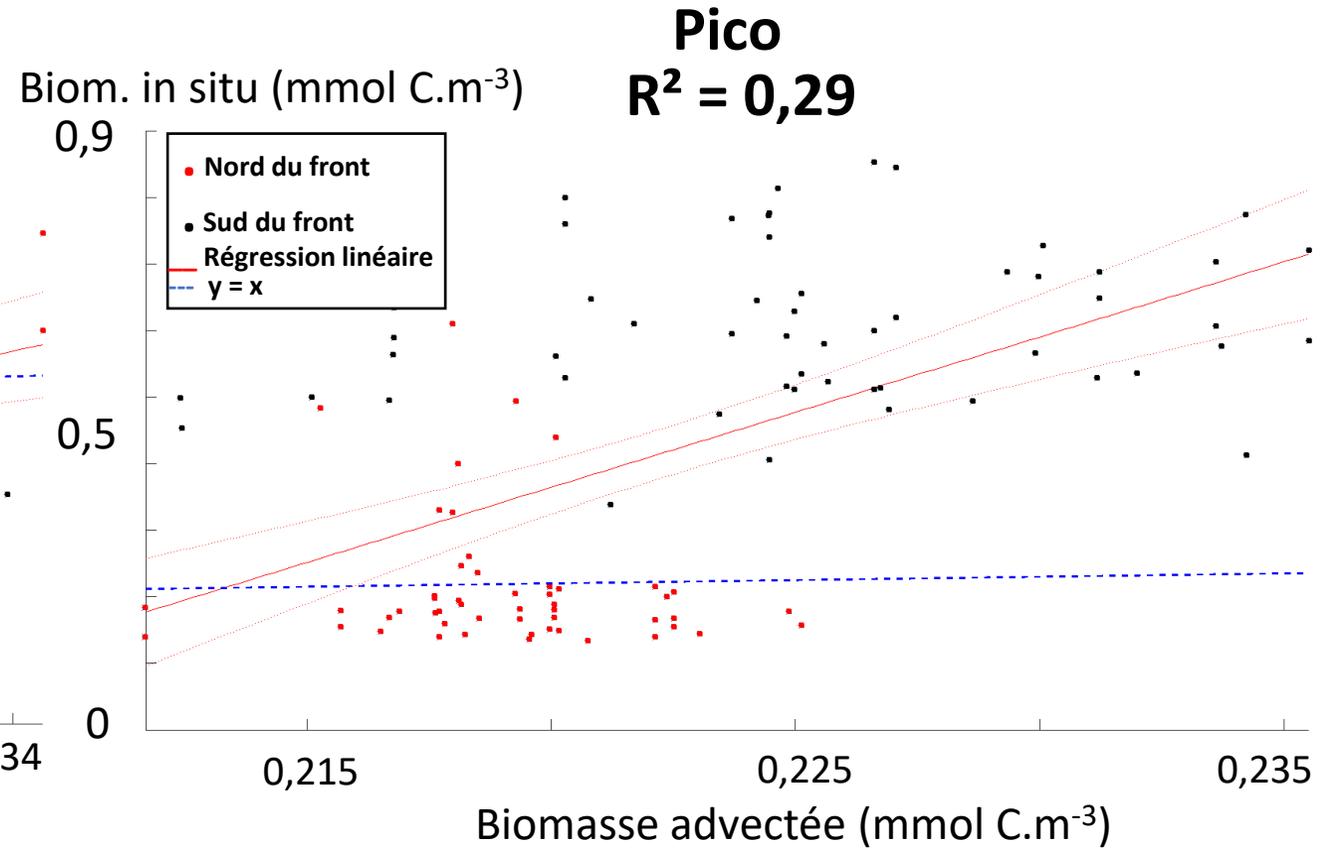
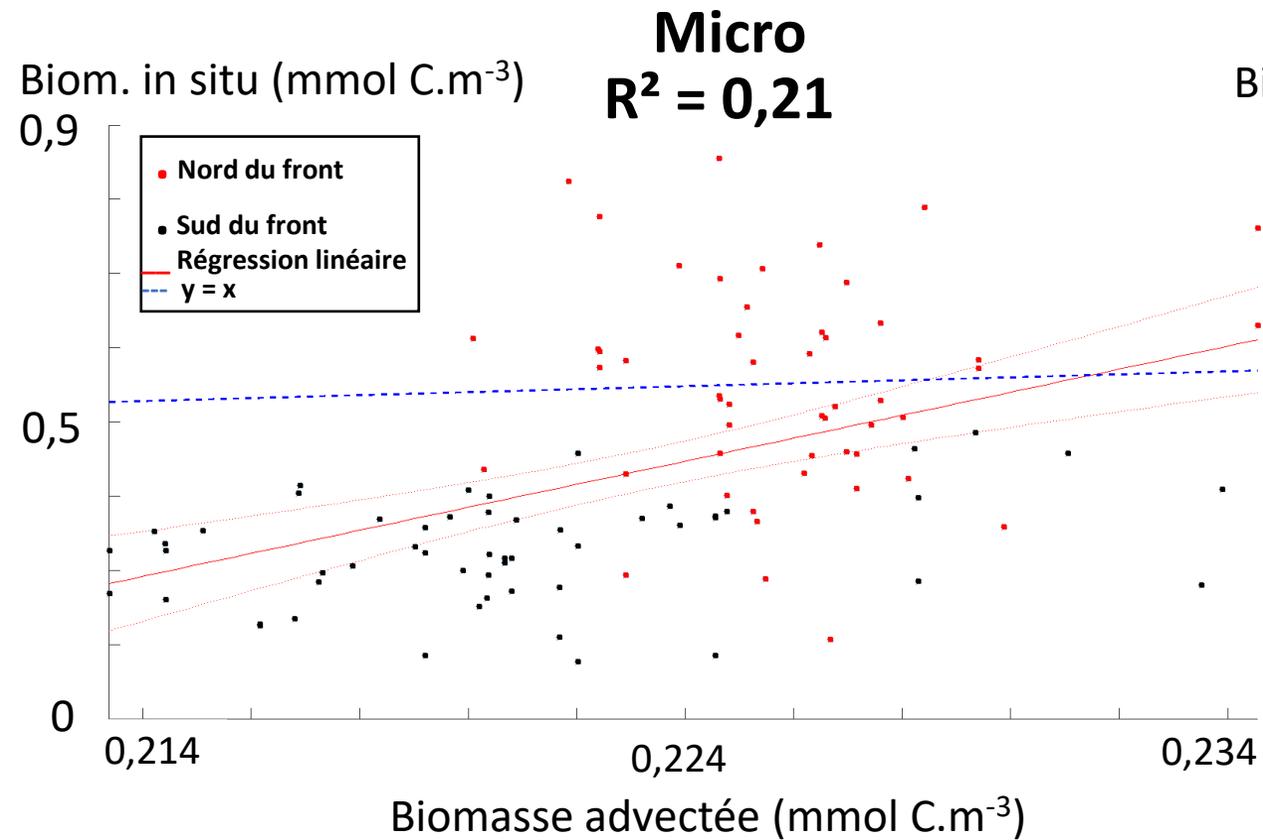
[Tzortzis *et al.*, 2021]

- Nouvelle interprétation
- Meilleure vue du transport des masses d'eau

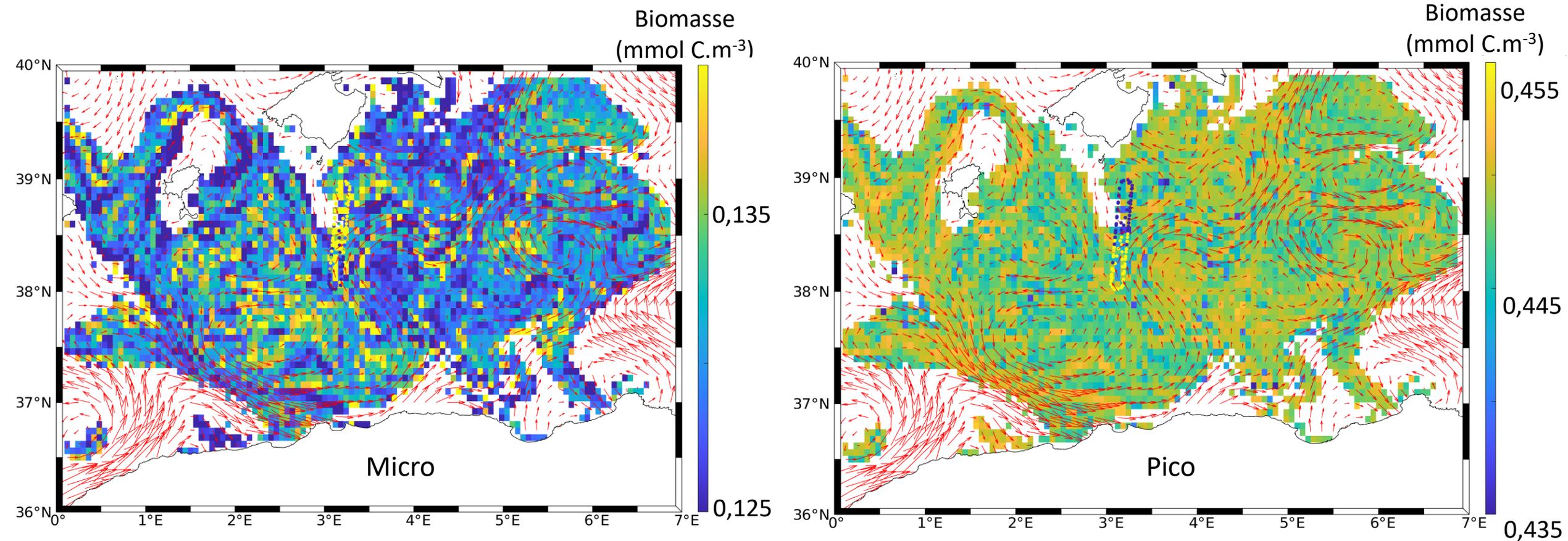
Advection des biomasses initiales



- Gradient N-S représenté pour Pico et Micro
- Amplitude des variations modélisées au niveau du front plus faible

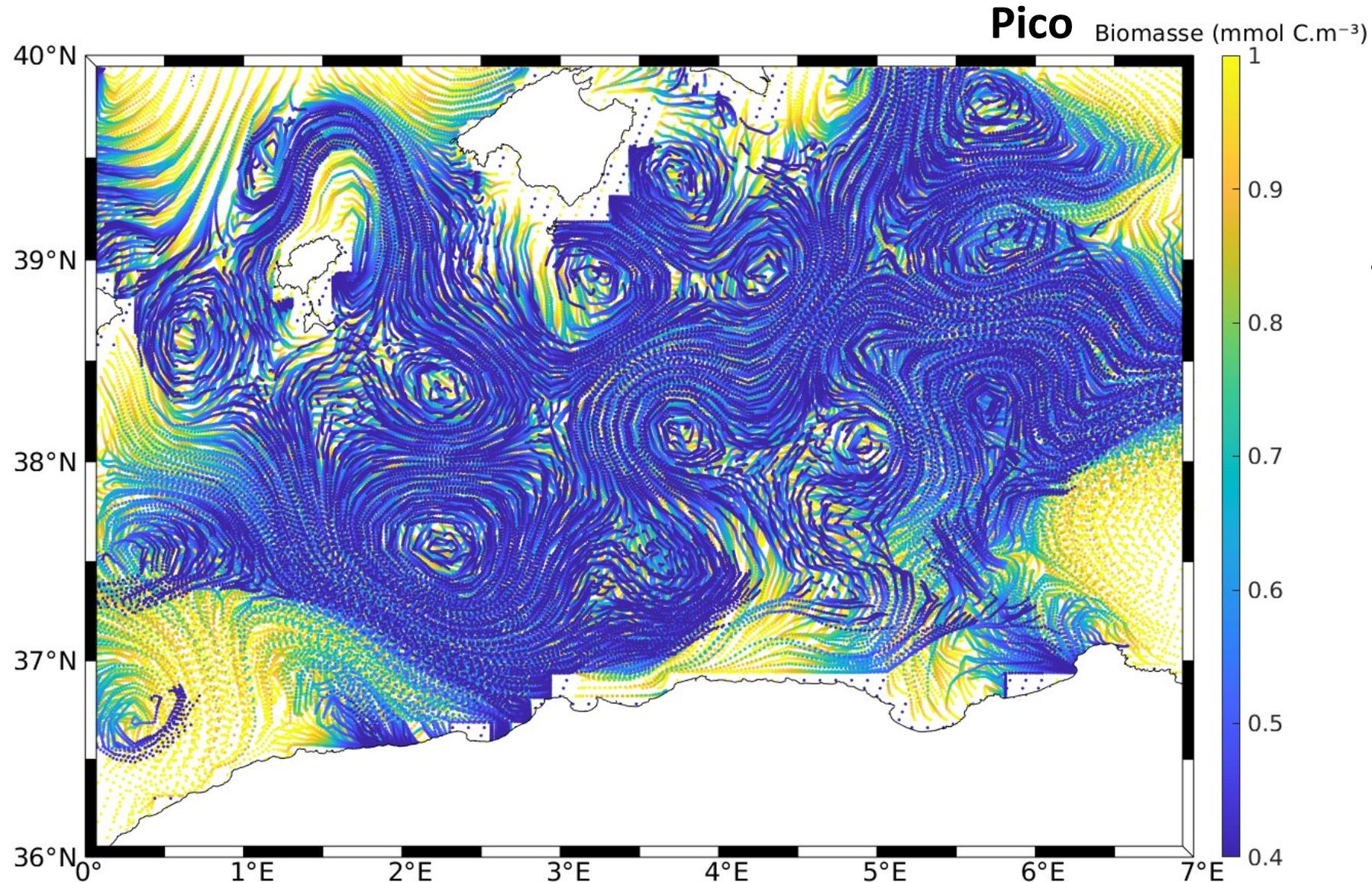
Biomasse advectée vs. *in situ*

Advection des biomasses couplées au modèle de plancton température dépendant



- Très bruité
- Gradient non représenté

Advection des biomasses couplées au modèle de plancton température dépendant



- 10% des trajectoires des particules représentées

- Advection couplée au modèle de plancton température dépendant
 - Corrélations correctes (R^2 Micro = 27% ; R^2 Pico = 37%)
 - Amplitude des variations très faible
 - Tendence à l'équilibre rapide → forçages nutriments/température trop constants
 - Modèle de plancton à améliorer :
 - Spin-up pour partir du réel équilibre
 - Stœchiométrie interne des organismes → Petit phytoplancton favorisé en conditions très oligotrophes (Bakouti *et al.*, 2021)
 - Ajout compartiment détritique (NPZD) → Dynamique des nutriments régénérés plus réalistes

- Advection des biomasses initiales :

$$\mathbf{R^2 \text{ Micro} = 21\% ; R^2 \text{ Pico} = 29\%}$$

- Advection couplée au modèle de plancton :

$$\mathbf{R^2 \text{ Micro} = 17\% ; R^2 \text{ Pico} = 15\%}$$

- Advection couplée au modèle de plancton température dépendant :

$$\mathbf{R^2 \text{ Micro} = 27\% ; R^2 \text{ Pico} = 37\%}$$

- Modèle conceptuellement lagrangien et eulérien
- Adaptation à la configuration méditerranéenne (initialement pour upwelling côtier)
- Adaptation pour une initialisation sur carte entière et forçages évolutifs le long des trajectoires
- Paramétrisation du modèle de plancton pour la Méditerranée

Développement d'une modélisation lagrangienne couplée innovante basée sur des mesures *in situ* et des données satellites

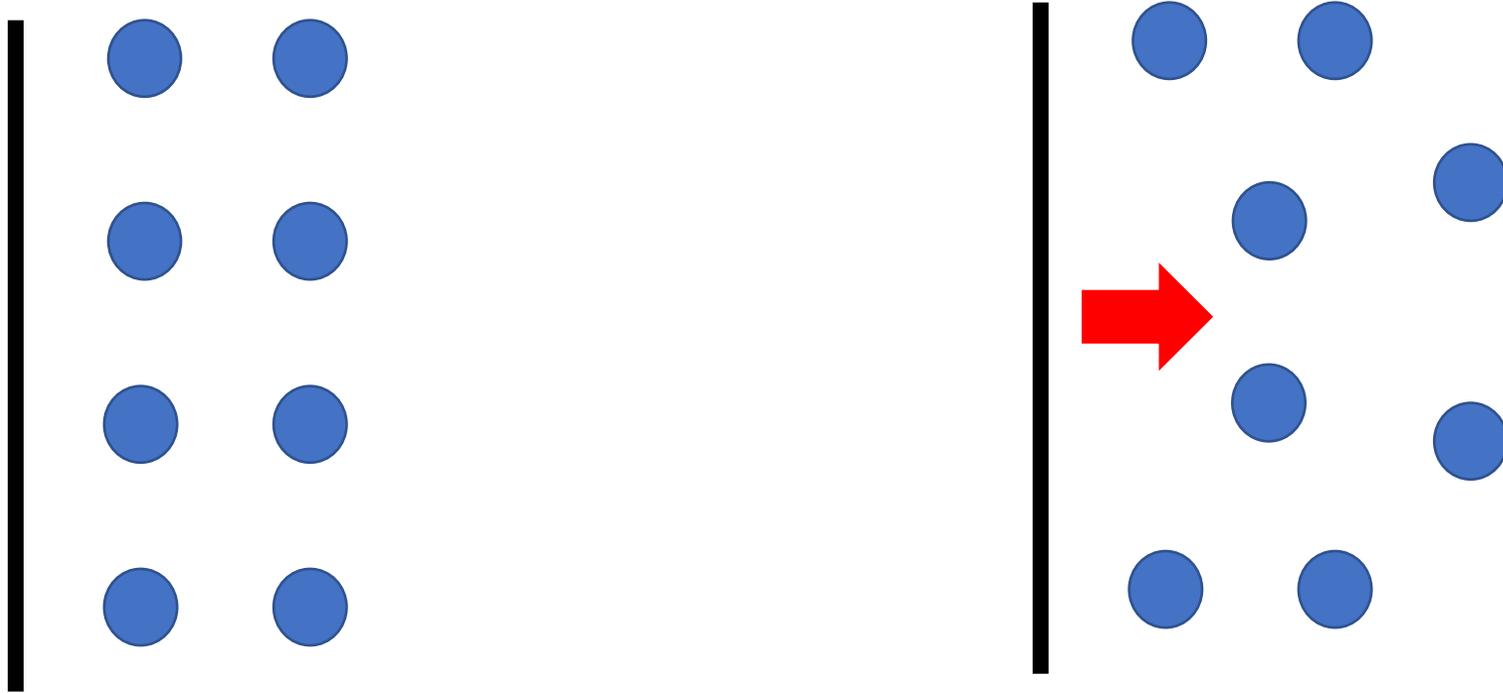
La future campagne BioSWOT 2023 :

- Stratégie basée sur les résultats du stage
- Calcul de courant par anomalie de hauteur dynamique
 - Impact plus réaliste de l'advection sur la distribution horizontale des abondances
- Modèle amélioré
 - Dynamique planctonique plus réaliste

An aerial view of the Earth's ocean circulation, showing complex flow patterns with blue and white arrows overlaid on a dark blue ocean. The flow vectors are concentrated in the mid-latitudes, showing a strong clockwise gyre in the North Atlantic and a more complex, multi-gyre system in the Southern Ocean. The landmasses are visible in shades of brown and green.

Merci de votre écoute !

Annexe 1 : advection de sparticules en limite de zone



Annexe 2 :

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

Annexe 3 :

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

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

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

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

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

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

Annexe 4 :

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

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 et al., 2021)
μ_{max}^{big}	taux de croissance maximal pour P_{big}	2,7648	d ⁻¹	(Baklouti et al., 2021)
g_{max}^{small}	taux de broutage maximal pour Z_{small}	1,4256	d ⁻¹	(Baklouti et al., 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 et al., 2022)
C/Chl_{big}	C :Chl pour P_{big}	50	mg C.mg Chl ⁻¹	(Lazzari et al., 2012)
k_N^{reg}	Cste 1/2 saturation de P_{small} sur PO4	13,3	mmol C.m ⁻³	(Pulido-Villena et al., 2021)
k_N^{new}	Cste 1/2 saturation de P_{big} sur PO4	13,3	mmol C.m ⁻³	(Pulido-Villena et al., 2021)
k_G^{small}	Cste 1/2 saturation de Z_{small} sur P_{small}	5	mmol C.m ⁻³	(Auger et al., 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 et al., 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 et al., 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 et al., 2021)
N_{new}^{ini} (1D)	concentration initiale de phosphate	0,3	mmol C.m ⁻³	<i>in situ</i> (Pulido-Villena et al., 2021)
P_{small}^{ini} (1D)	biomasse initiale de P_{small} (Pico2)	0,6	mmol C.m ⁻³	<i>in situ</i> (Tzortzis et al., 2021)
P_{big}^{ini} (1D)	biomasse initiale de P_{big} (Micro)	0,1	mmol C.m ⁻³	<i>in situ</i> (Tzortzis et al., 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	

Annexe 5 :

TABLEAU IV – R² des relations entre abondances et paramètres du milieu

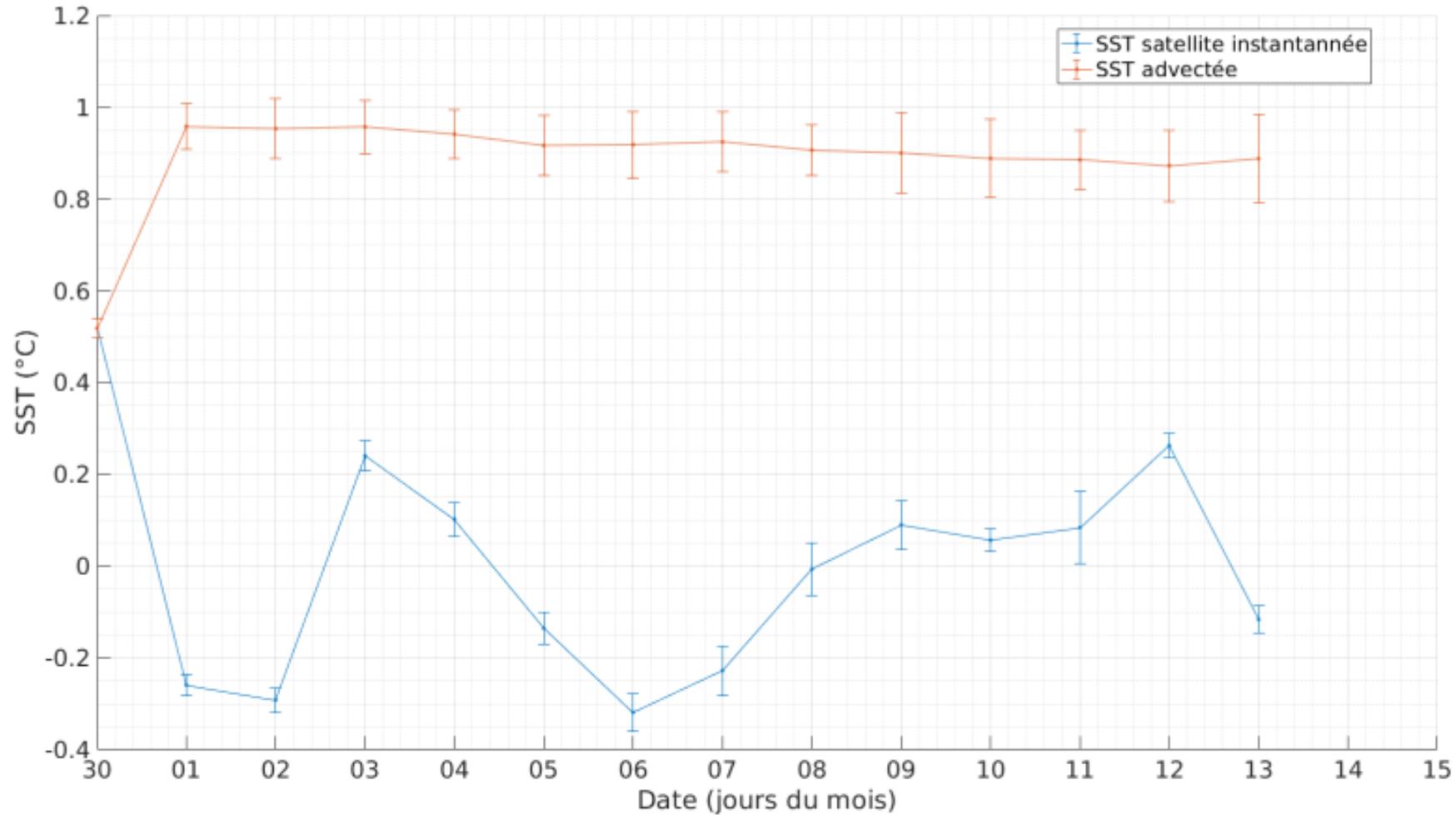
	Paramètre	Syne	Pico1	Pico2	Pico3	PicoHFLR	Rnano	Snano	Micro	Crypto
Hippodrome	T_tsg	0,02400	0,02280	0,22340	0,02190	0,00690	0,21770	0,20664	0,13428	0,01170
	S	0,62395	0,58380	0,71526	0,03630	0,00966	0,38490	0,00172	0,51130	0,04485
	Chl	0,31890	0,22200	0,34660	0,00970	0,00890	0,10540	0,05610	0,33910	0,00001
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

Annexe 6 :

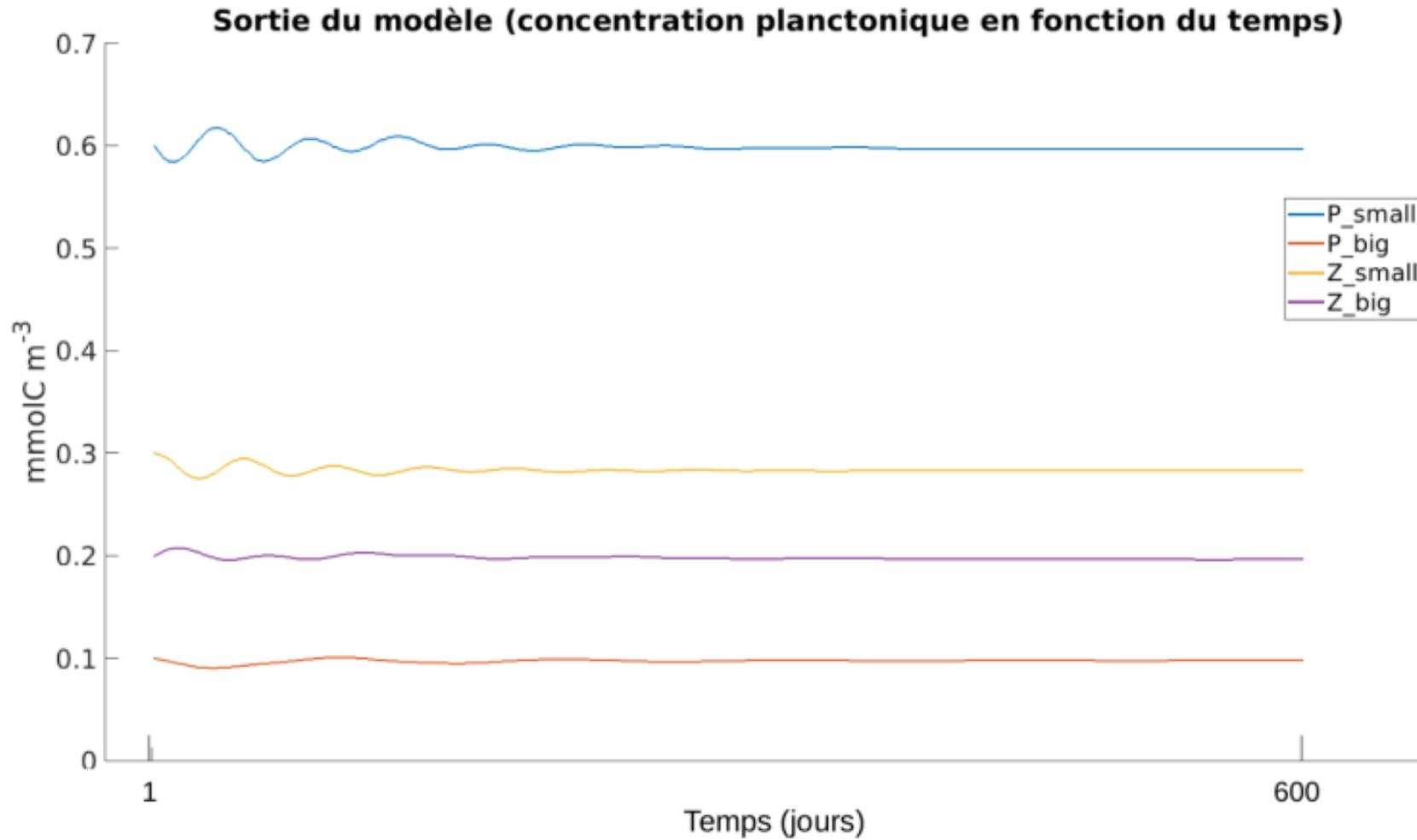
TABLEAU V – Récapitulatif des informations de biovolume, Q_C et biomasse

	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

Annexe 6 :



Annexe 7 :

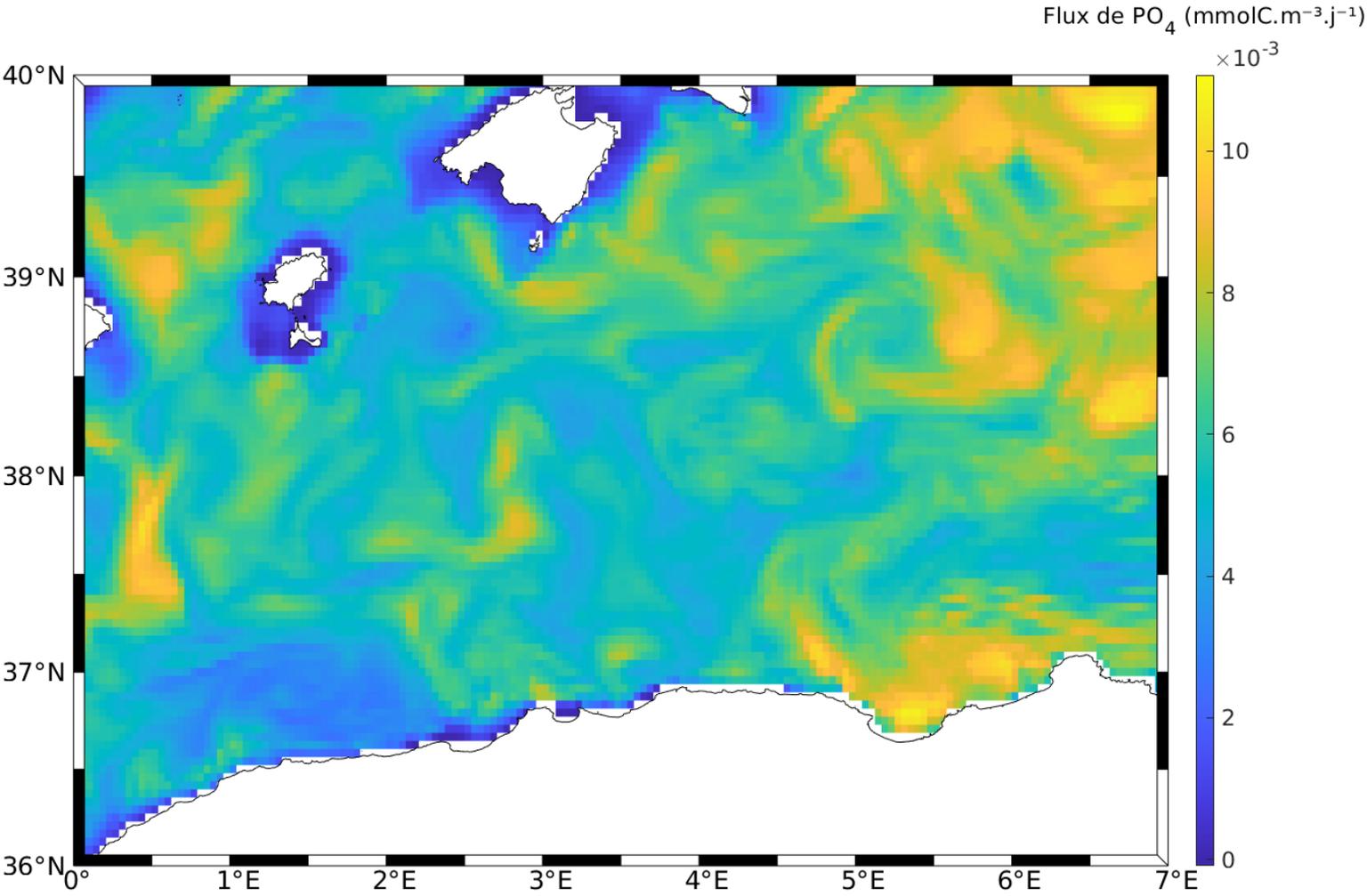


Annexe 8 :

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

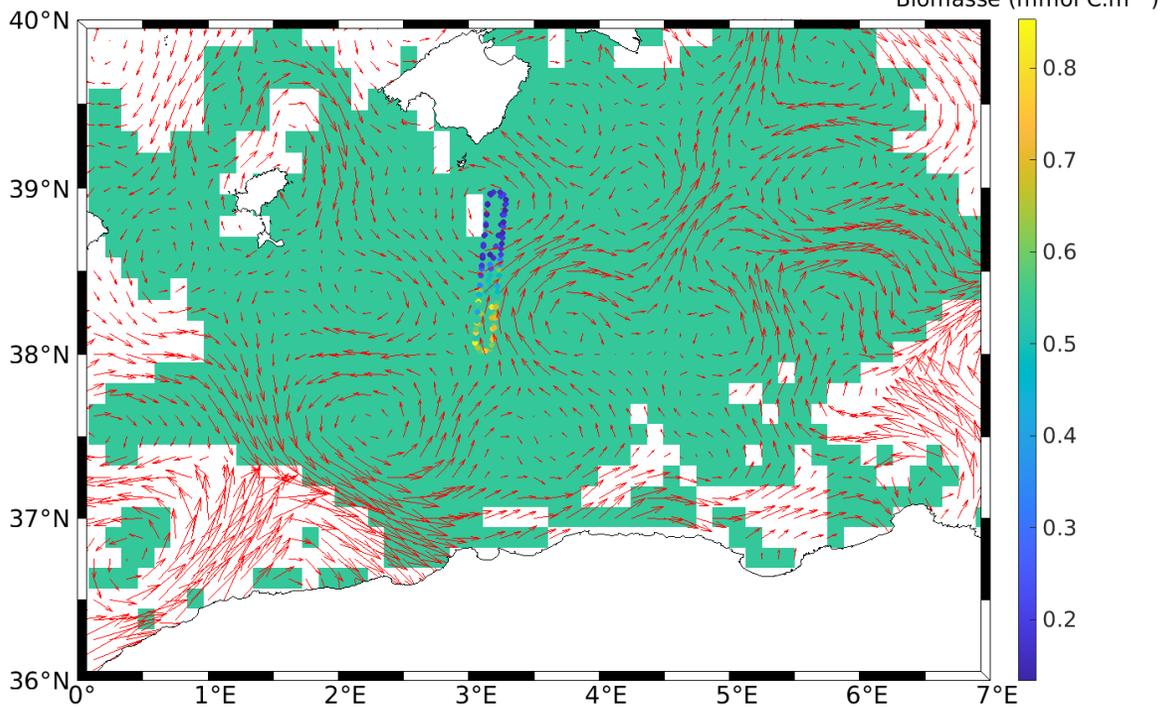
Annexe 9 :



Annexe 10 :

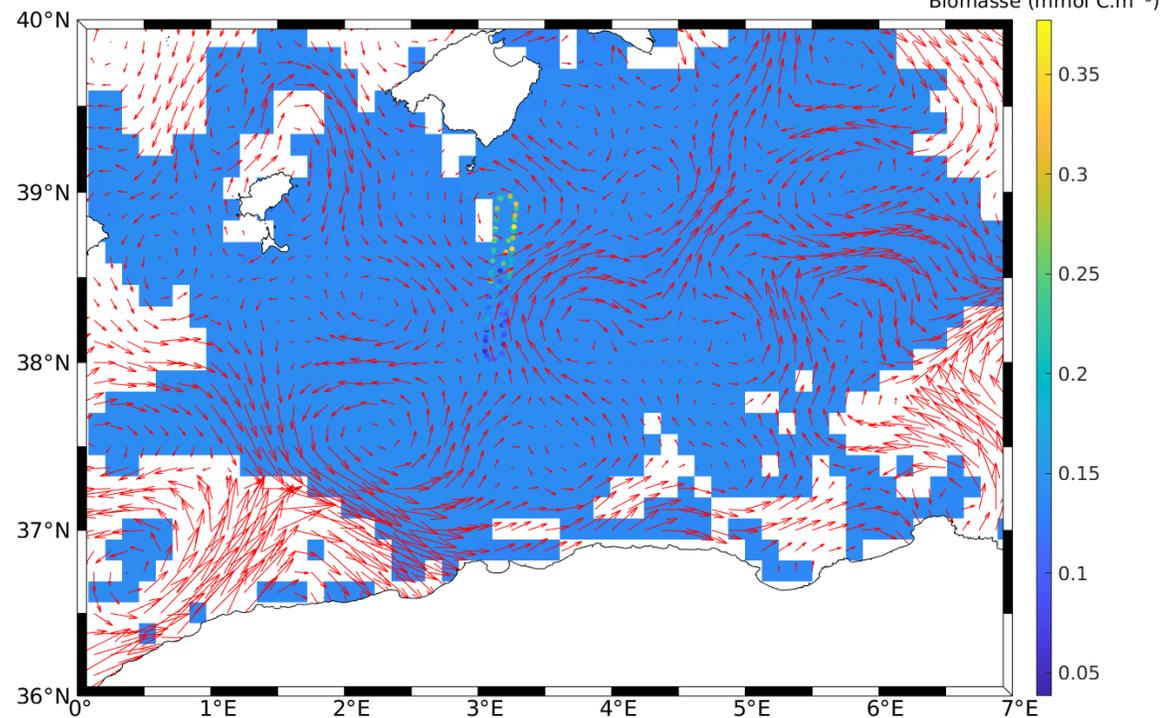
Pico

Biomasse (mmol C.m⁻³)

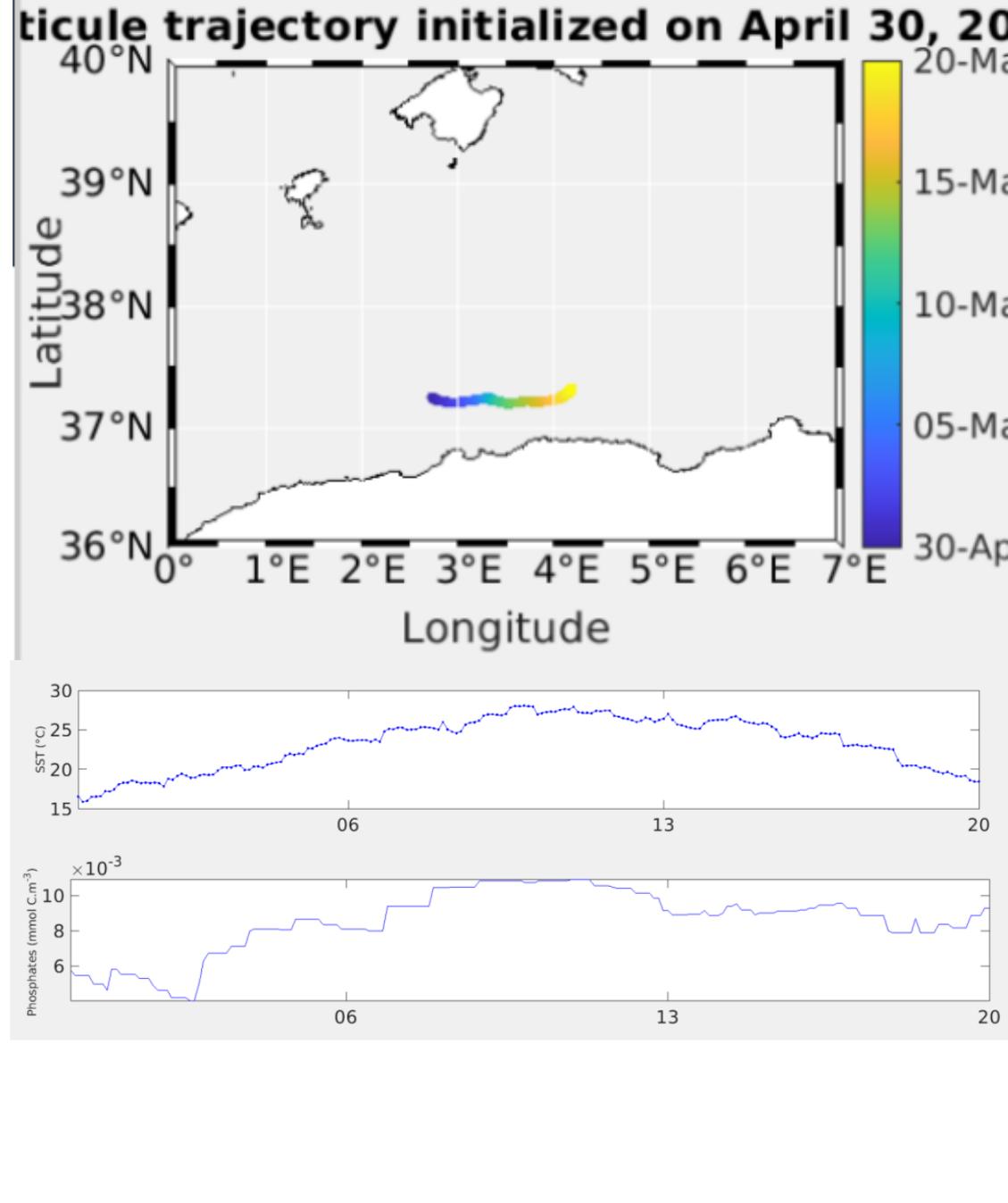
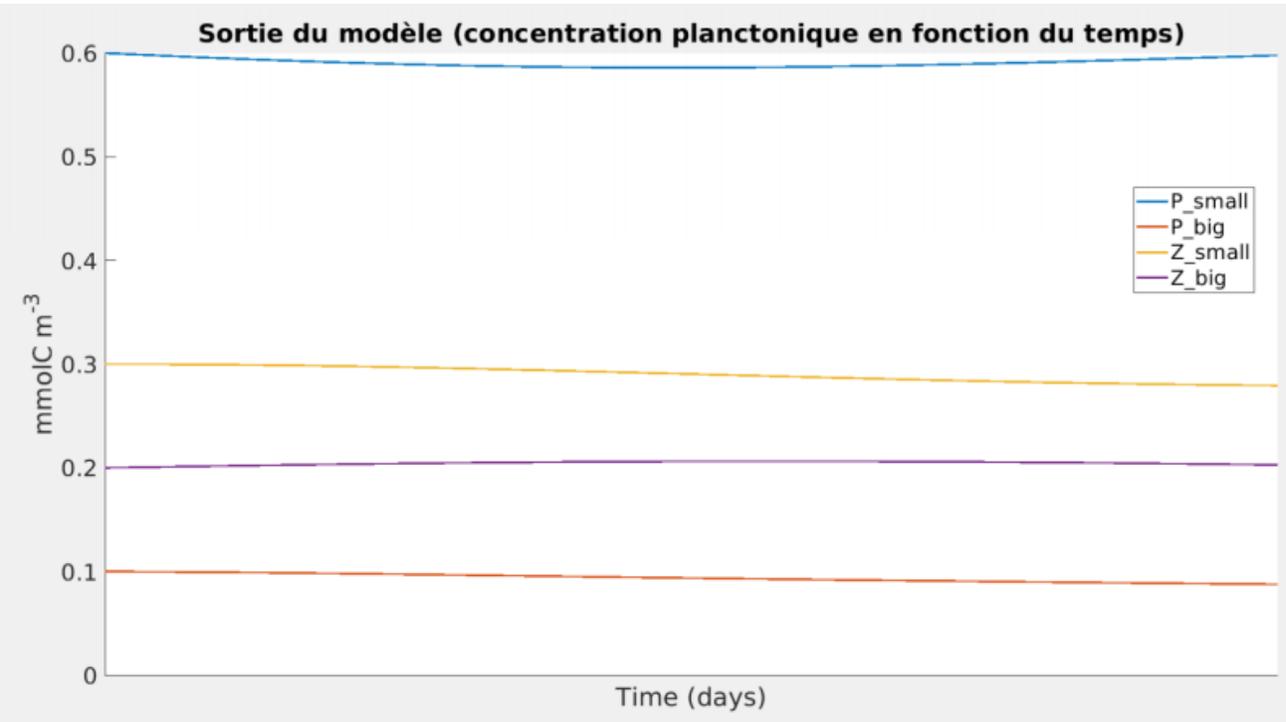


Micro

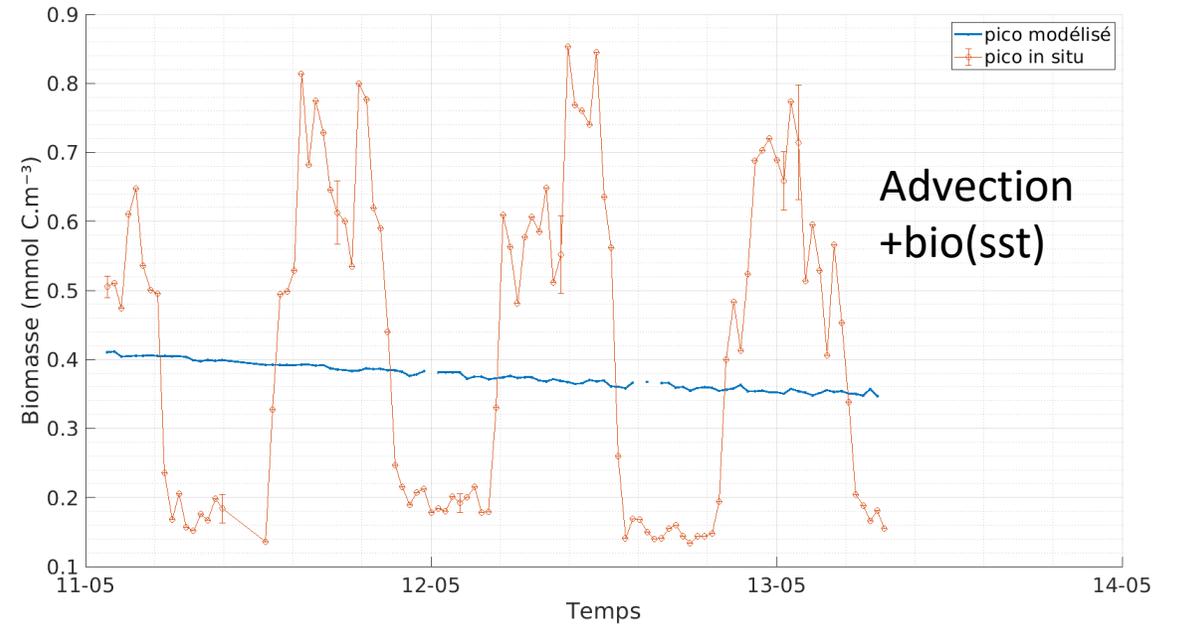
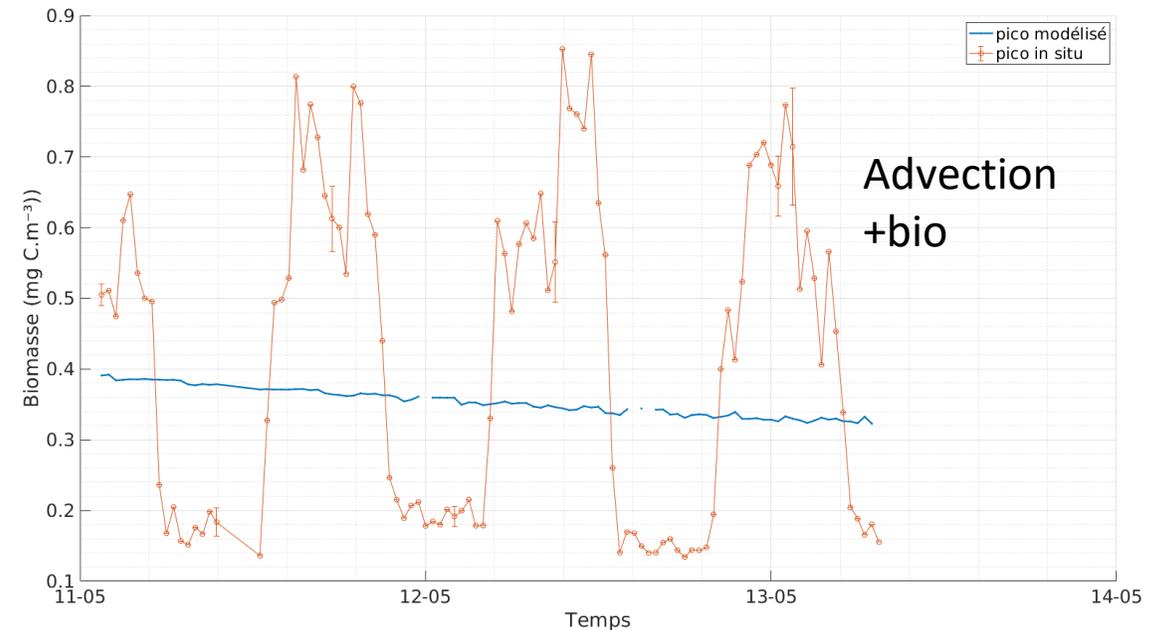
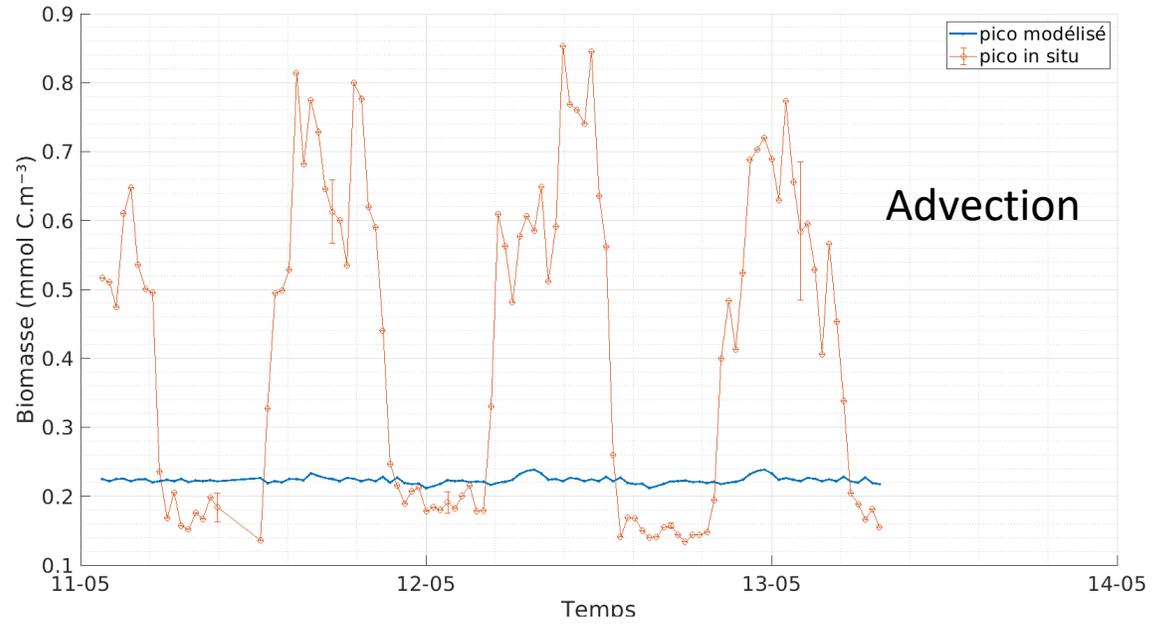
Biomasse (mmol C.m⁻³)



Annexe 10 :



Annexe 11 :



Annexe 12 :

