

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

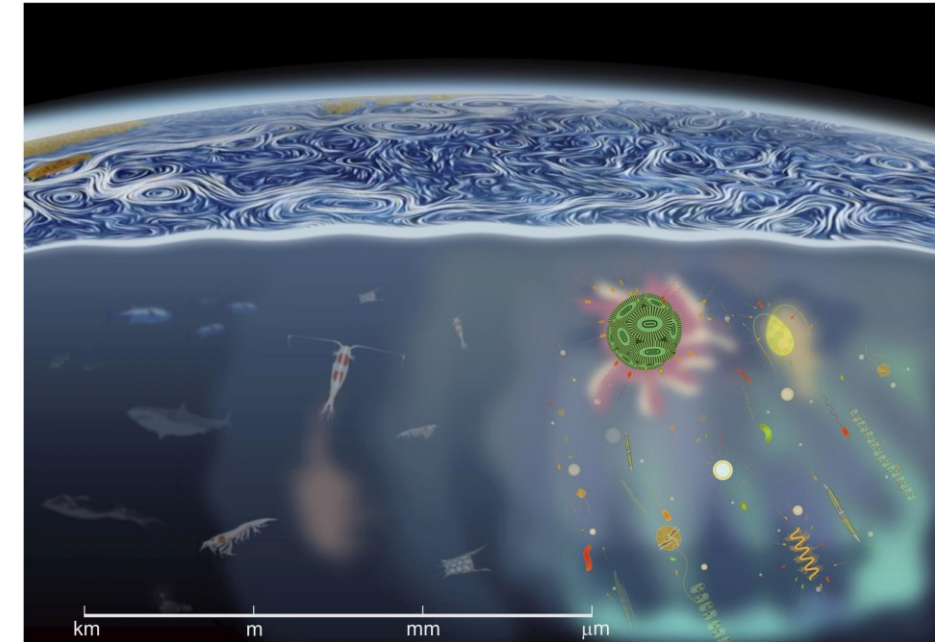
Stage réalisé au sein du M.I.O. sous la direction de :

Andrea Doglioli, Monique Messié (MBARI) et Gérald Grégori

Année universitaire : 2021-2022

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

- Structures : [1-10<sup>2</sup> 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



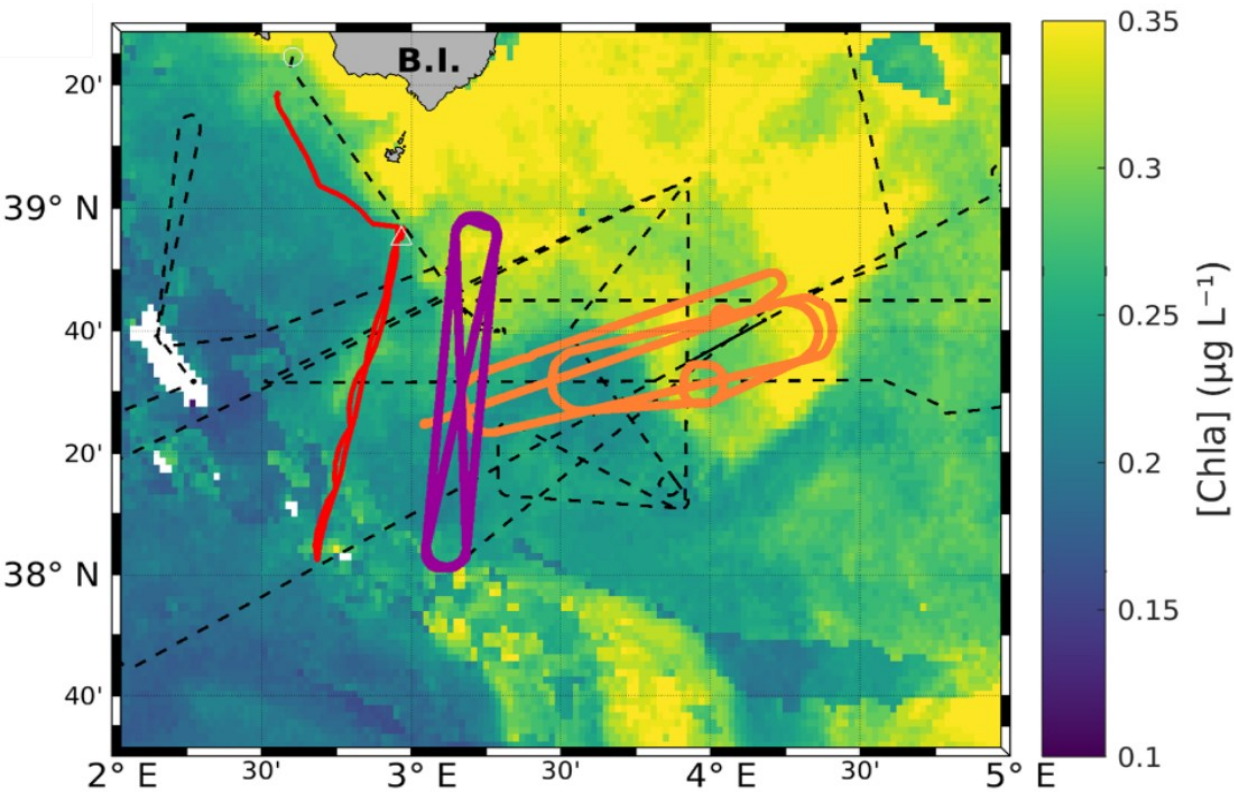
[Basterretxea et al., 2020]

[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 phytoplancton 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

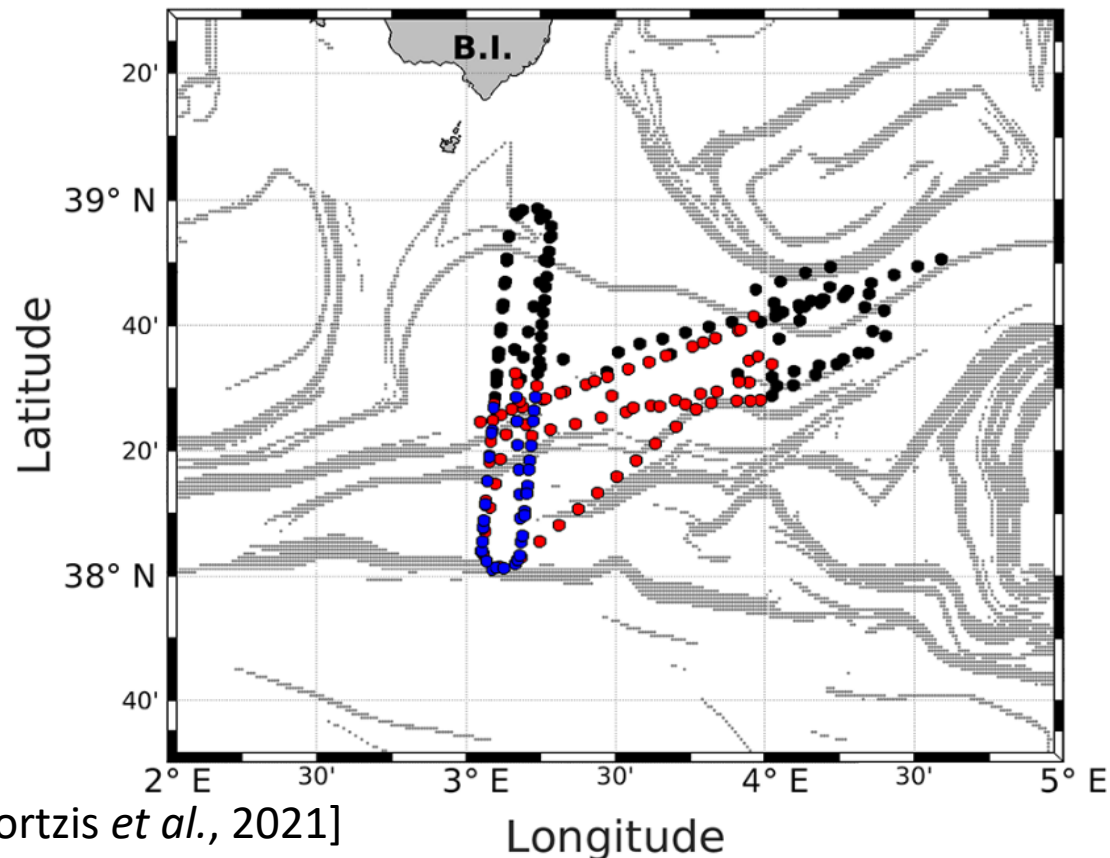


[Tzortzis *et al.*, 2021]

- 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 ?**

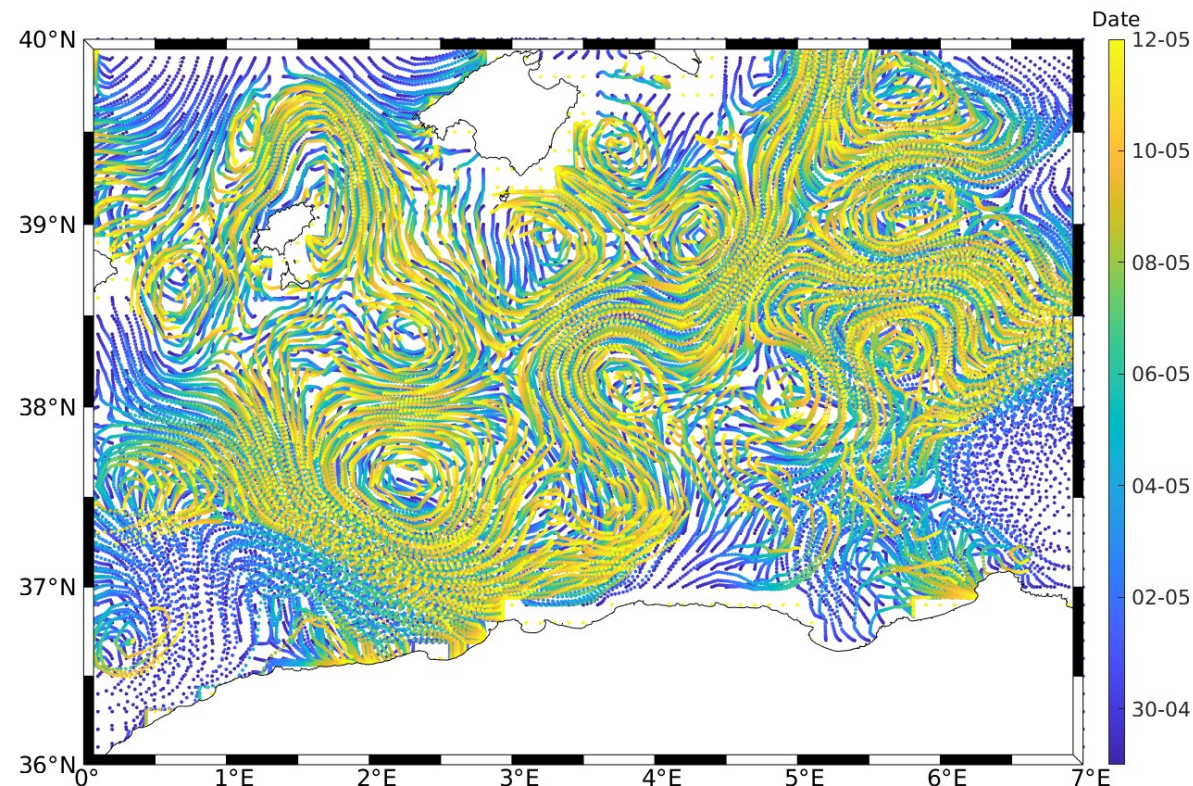
**Rôle de la biologie ?**

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



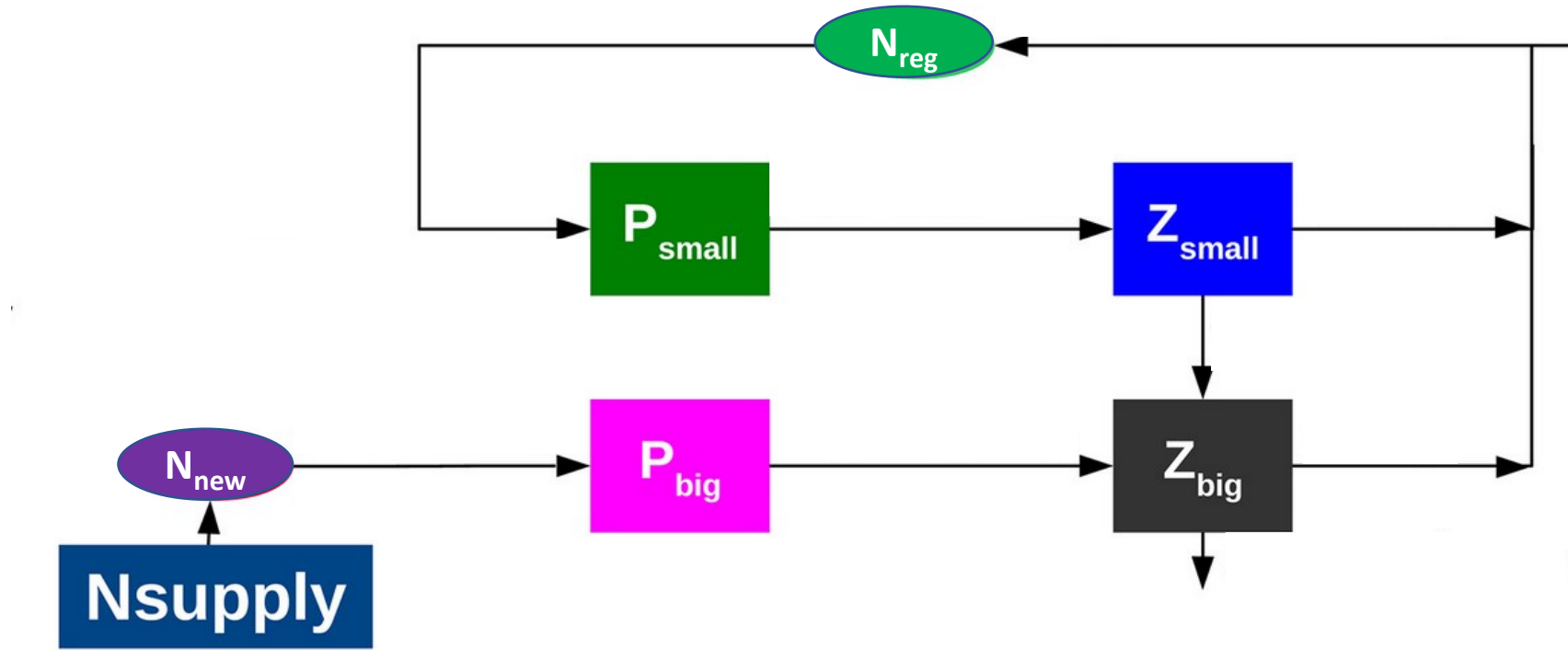
Le modèle *growth-advection* [Messié *et al.*, 2022] :

- 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



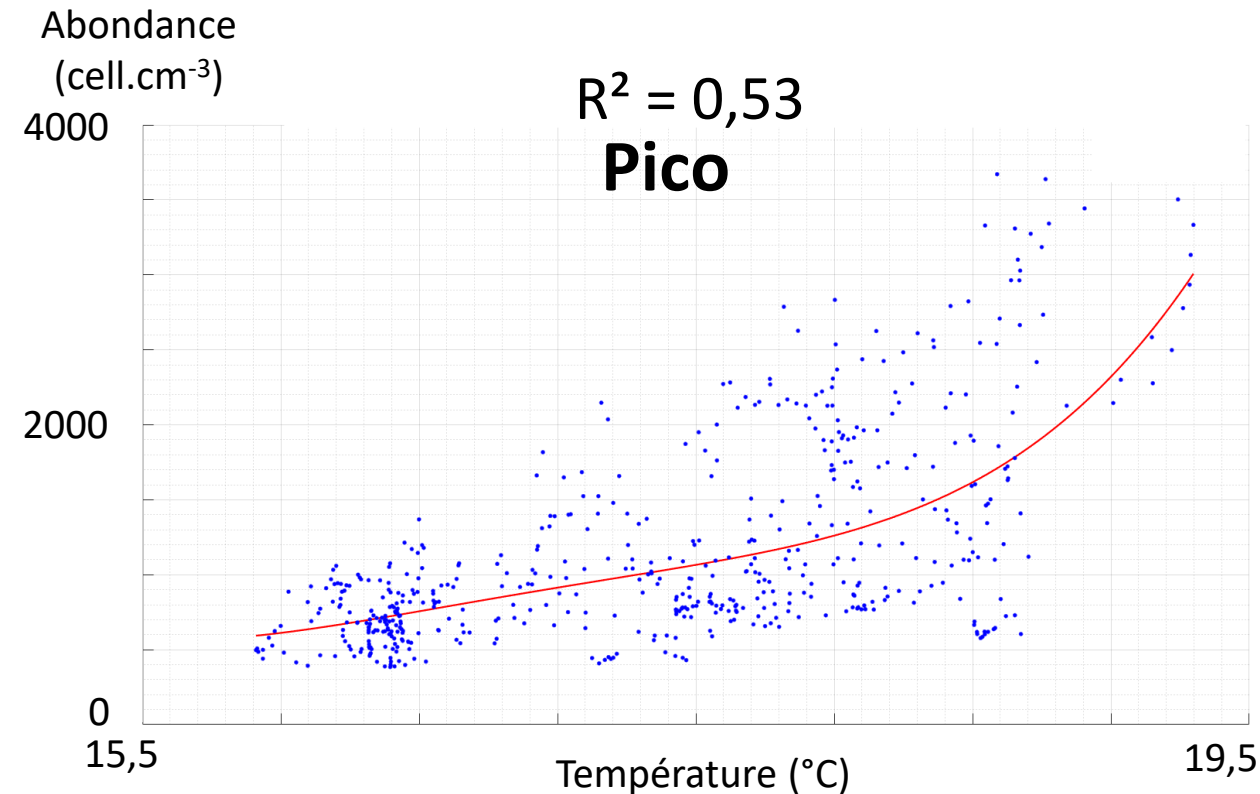
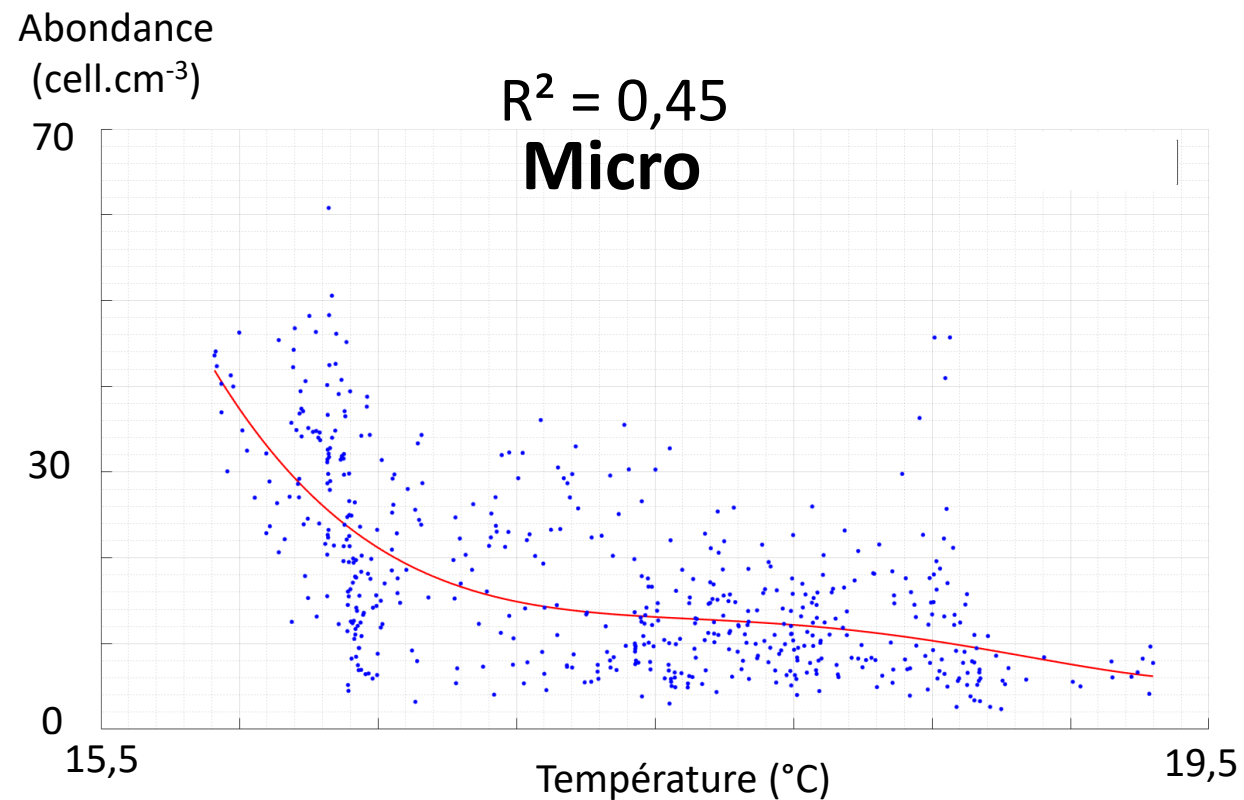
## Les données d'entrées :

- 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

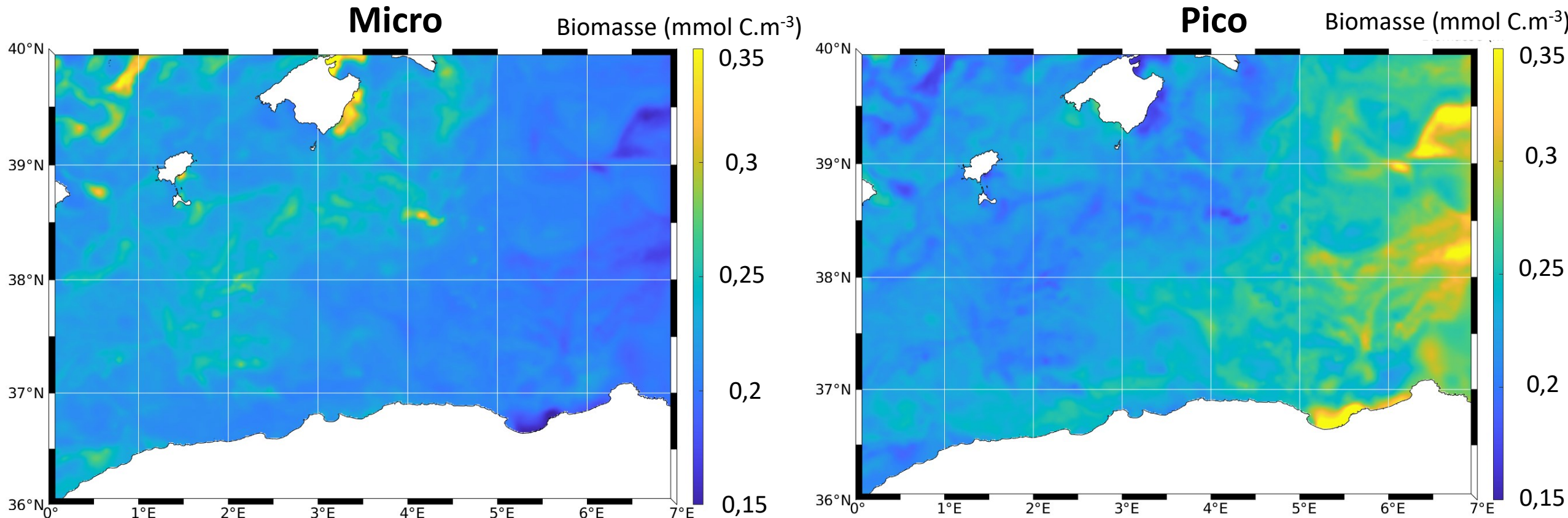
## Initialisation du modèle :

- 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:

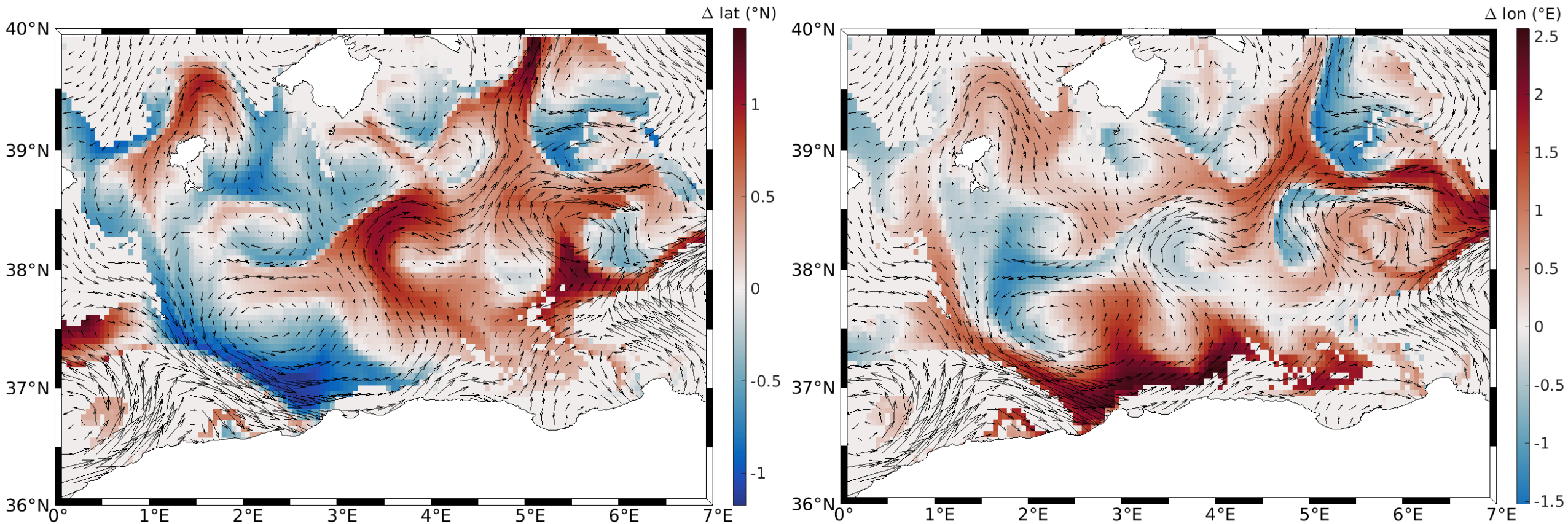
- Initialisation dans le modèle par extrapolation des biomasses à partir des relations avec la température du thermosalinographe



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**

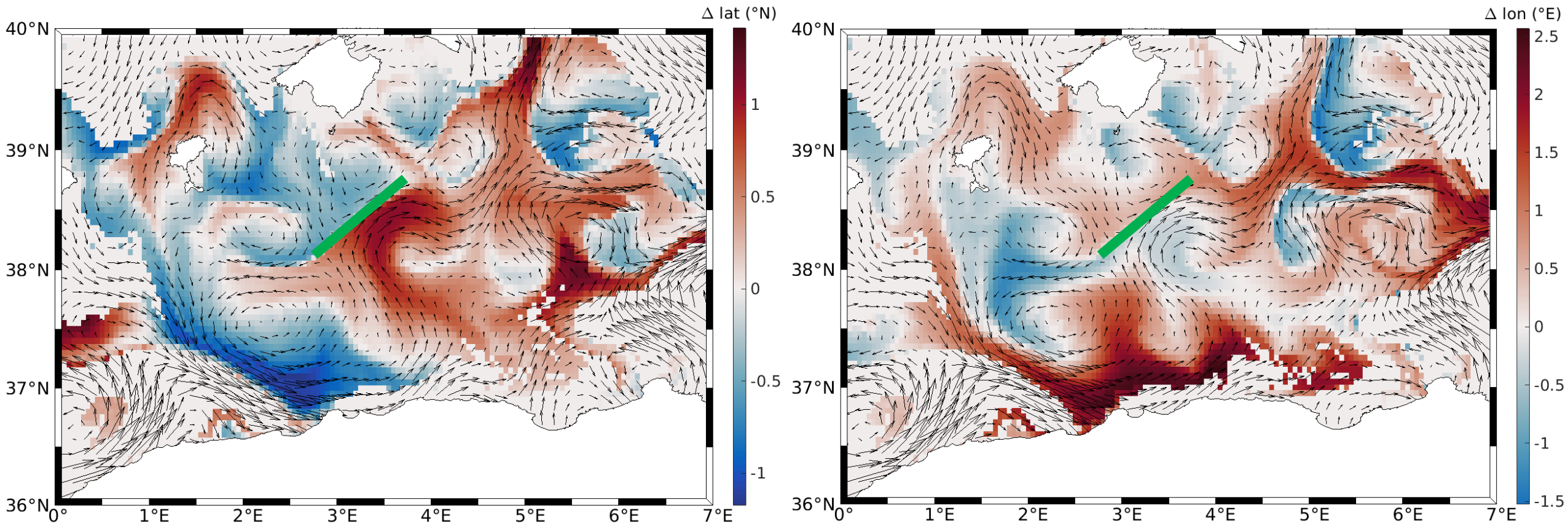
# Circulation des masses d'eau au niveau du front



- Front visible par ses deux masses d'eau



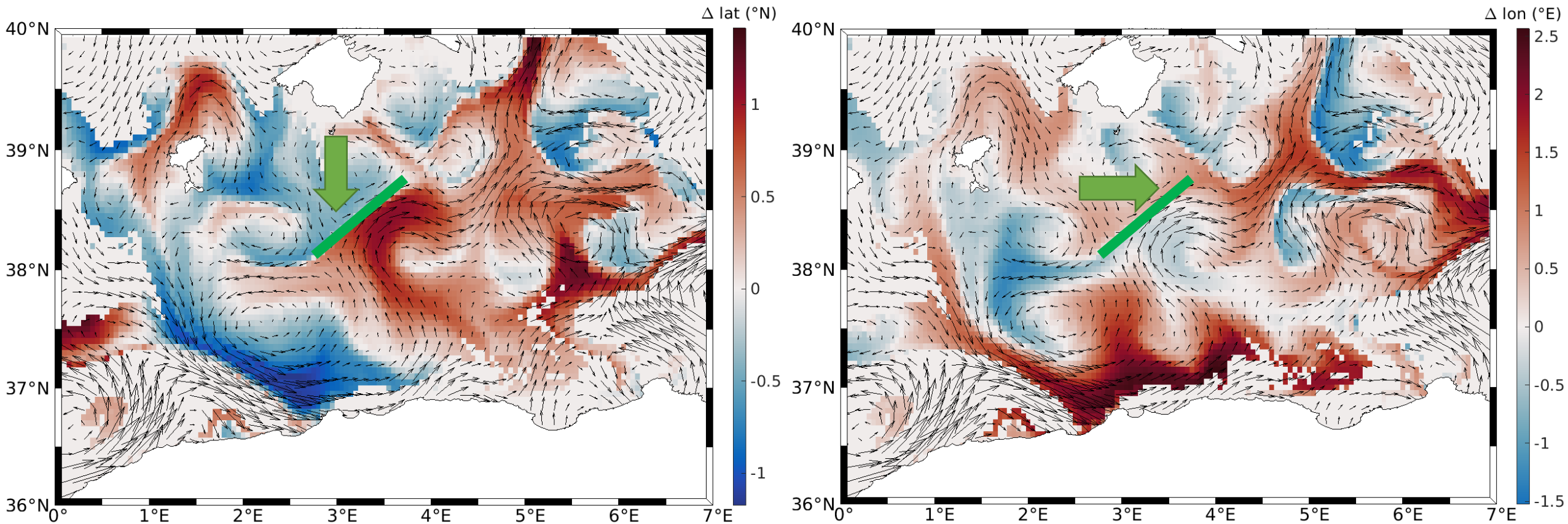
# Circulation des masses d'eau au niveau du front



- Front visible par ses deux masses d'eau

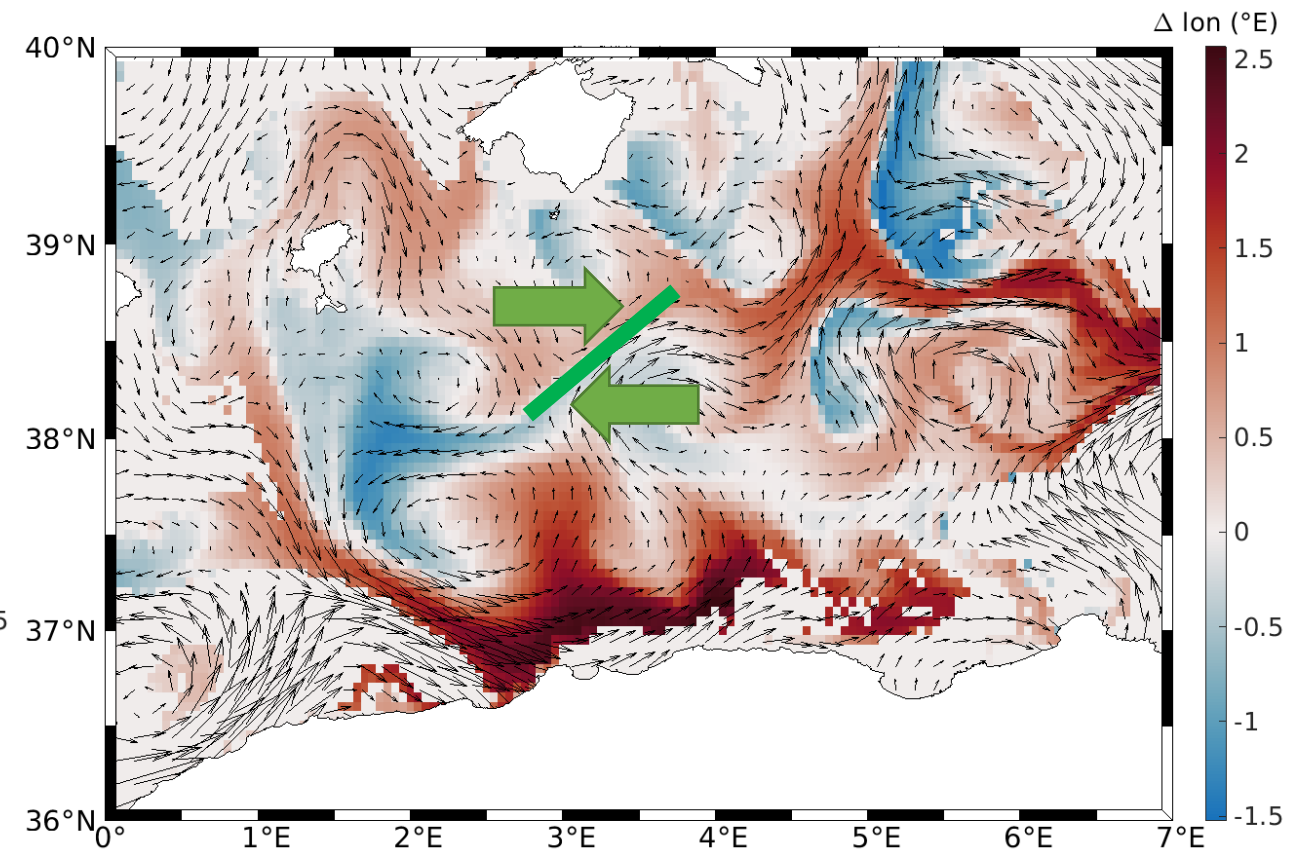
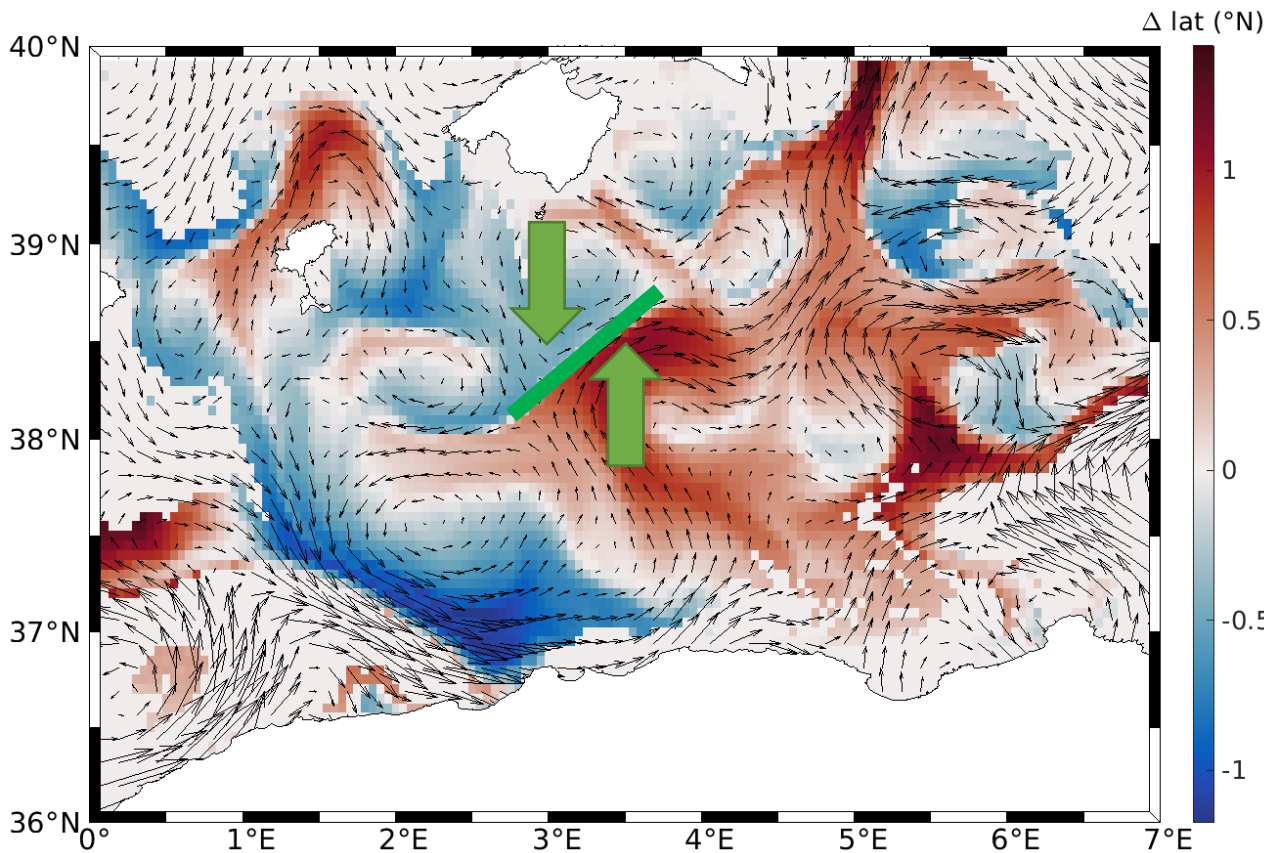


# Circulation des masses d'eau au niveau du front



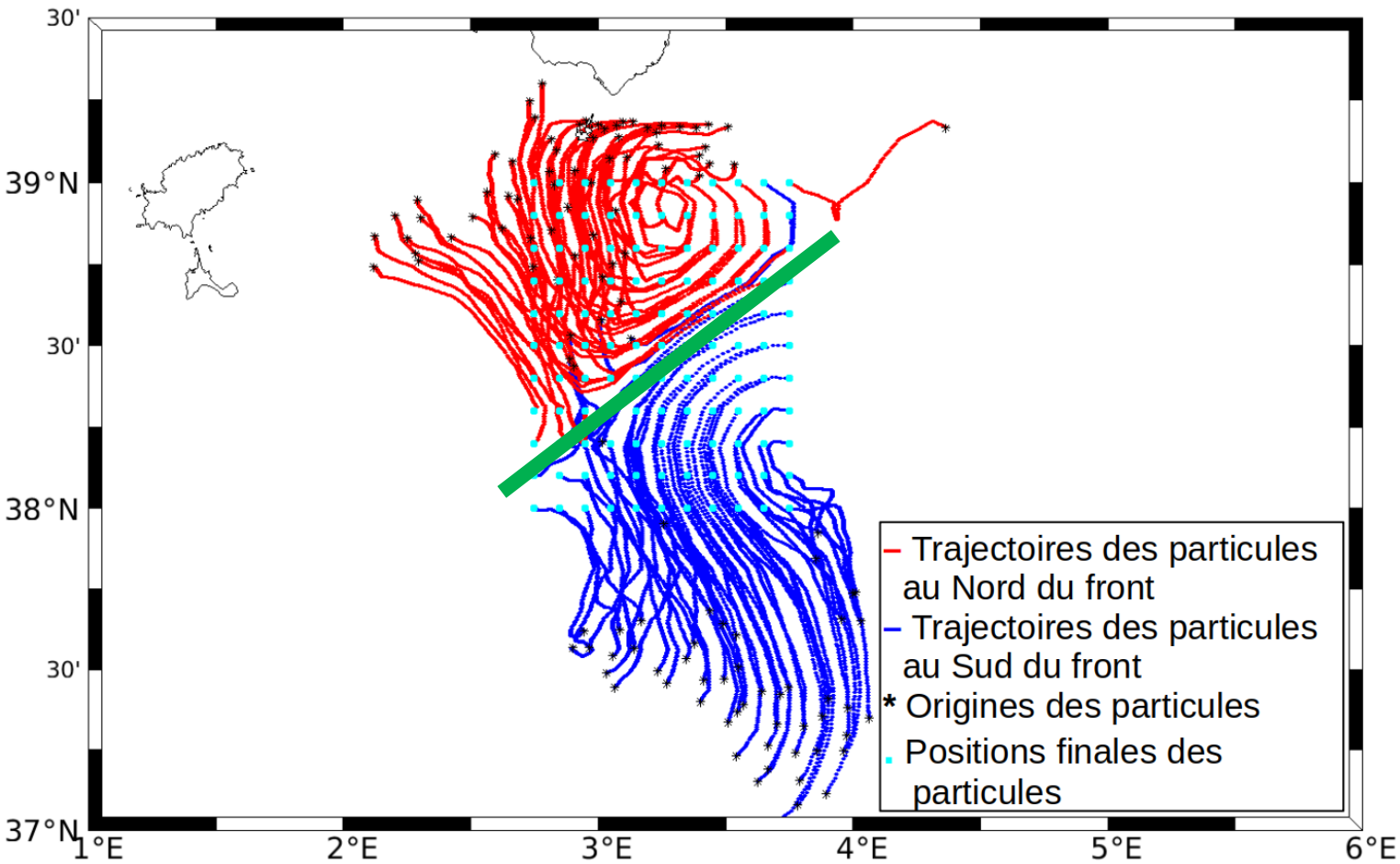
- Front visible par ses deux masses d'eau
  - Partie Nord : vers le Sud et l'Est

# Circulation des masses d'eau au niveau du front

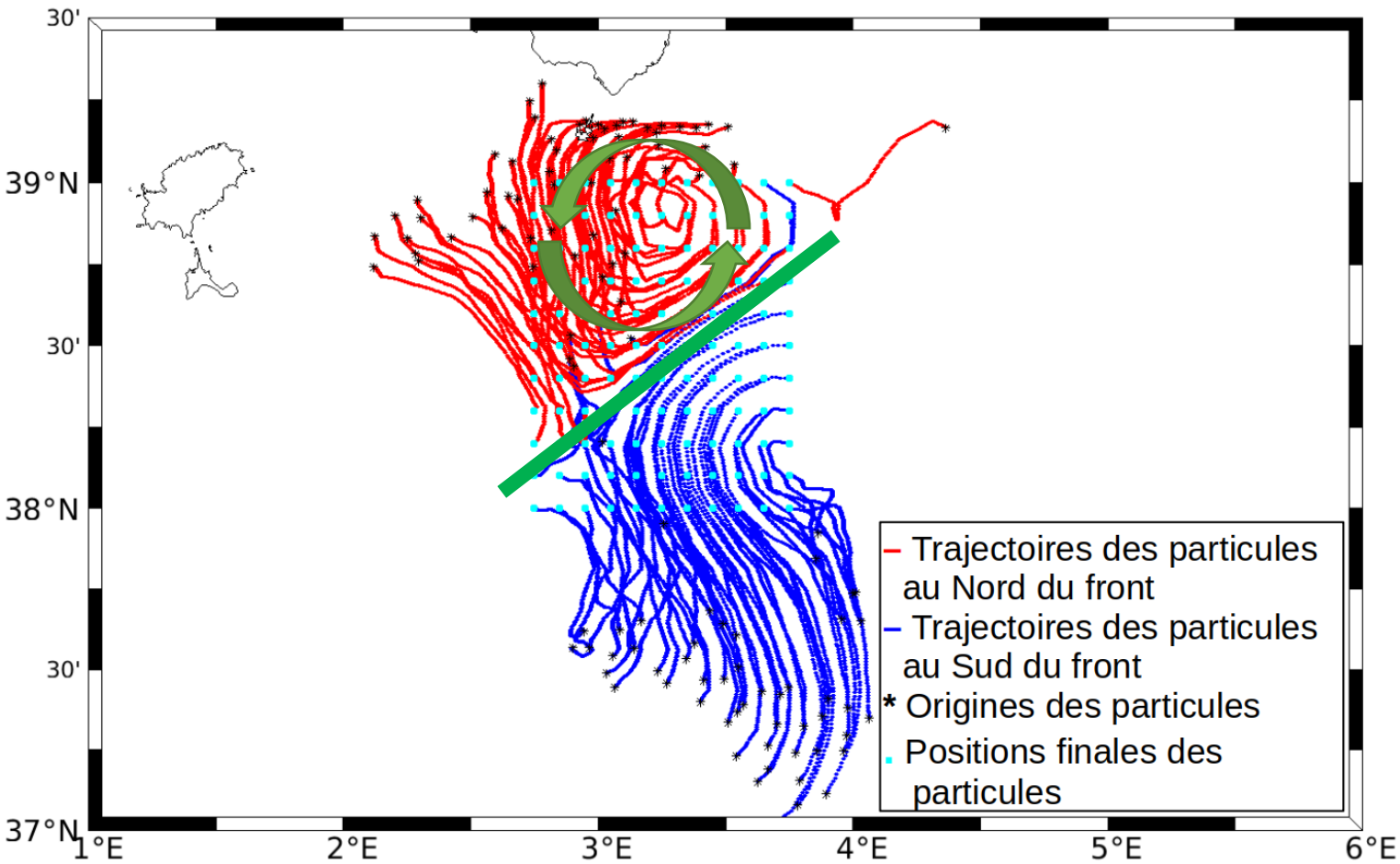


- Front visible par ses deux masses d'eau
  - Partie Nord : vers le Sud et l'Est
  - Partie Sud : vers le Nord et l'Ouest

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

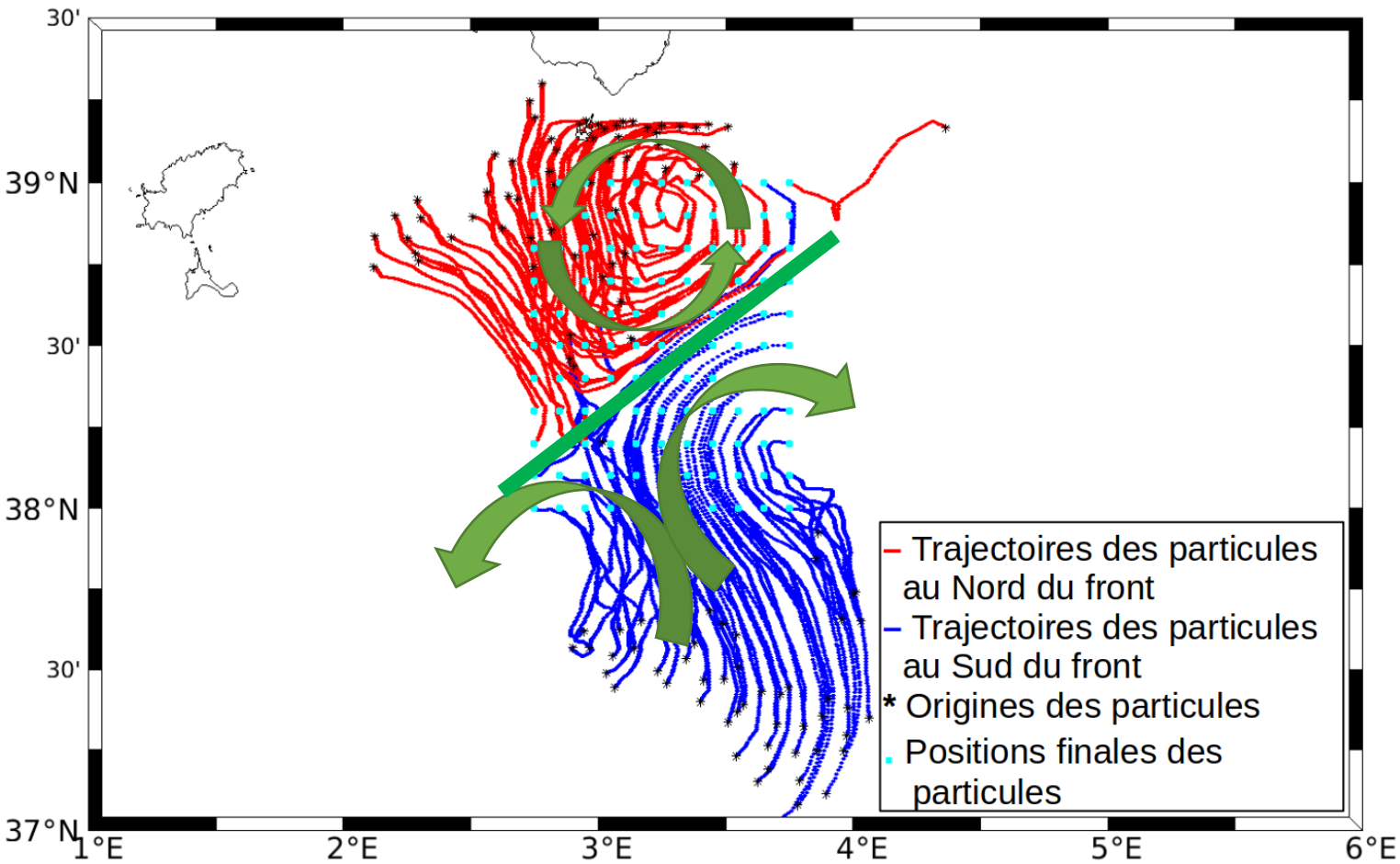


# Circulation des masses d'eau au niveau du front : backward



- Partie Nord : tendance cyclonique

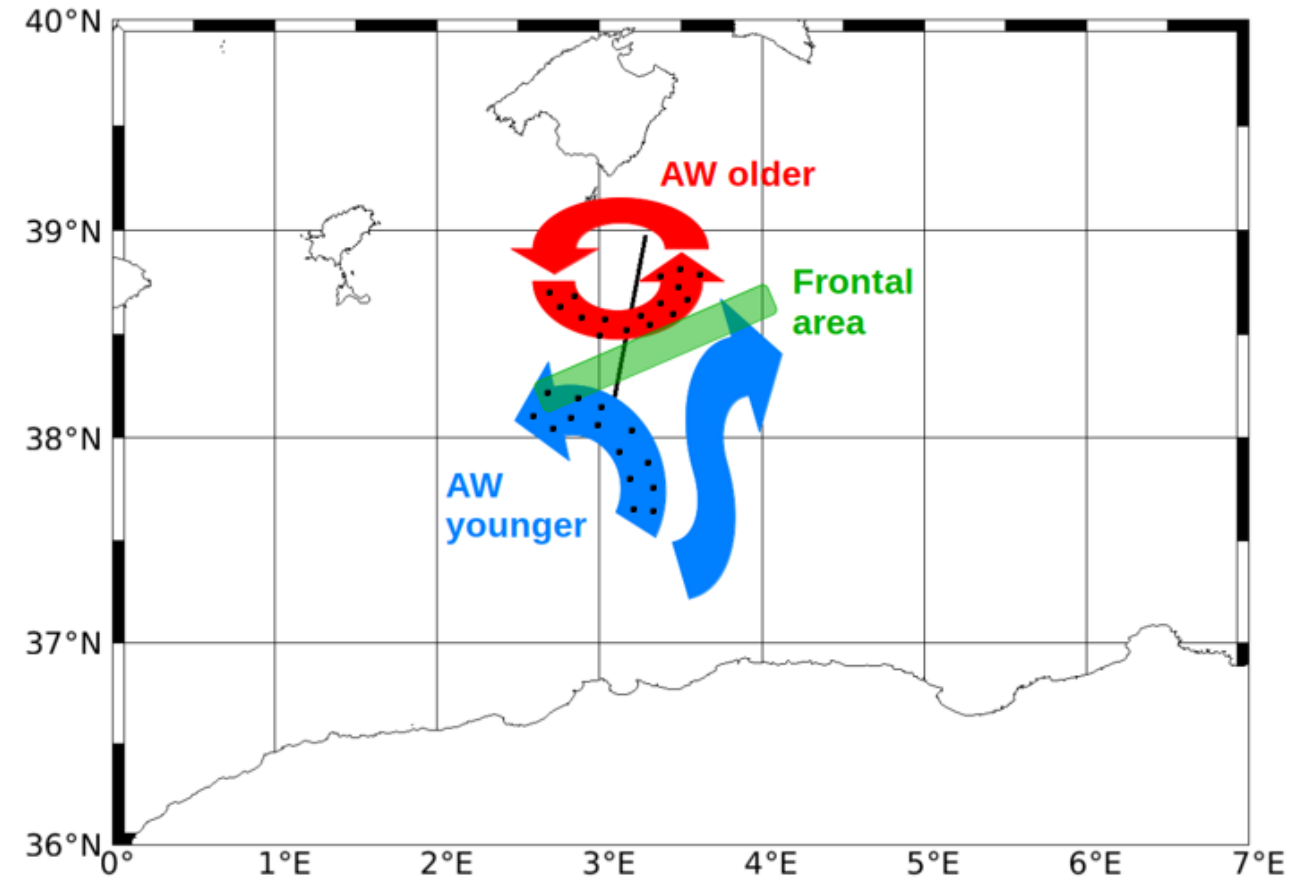
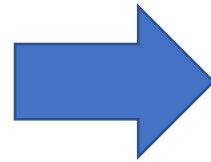
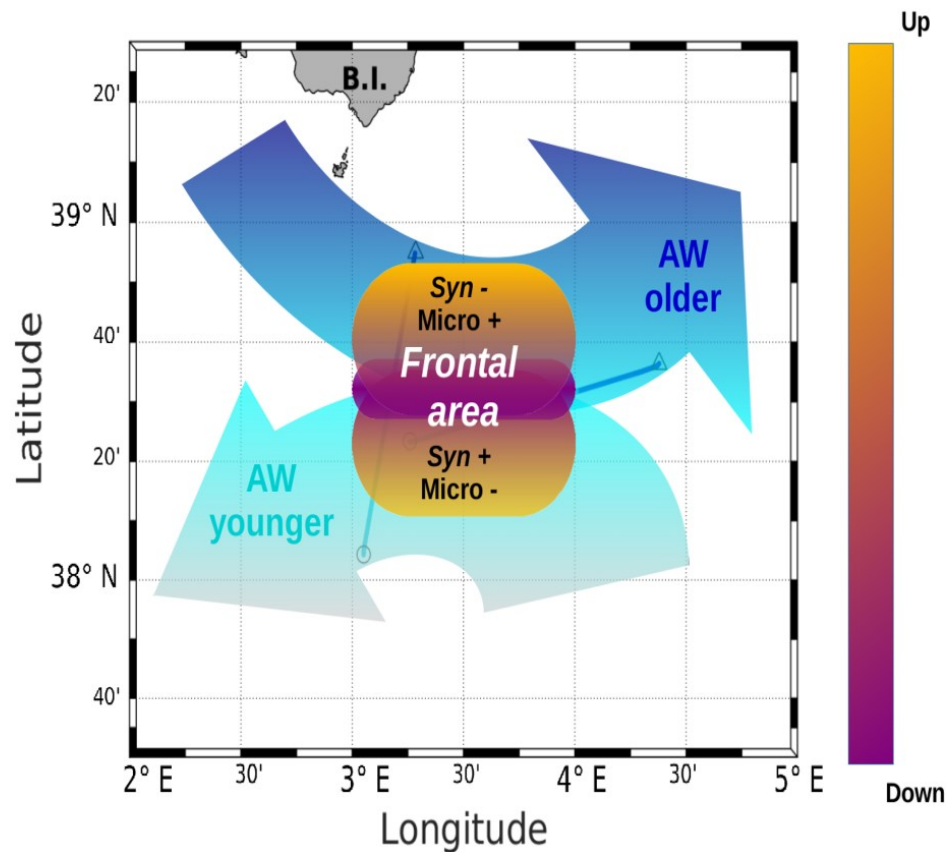
# Circulation des masses d'eau au niveau du front : backward



- Partie Nord : tendance cyclonique
- Partie Sud : méandres



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

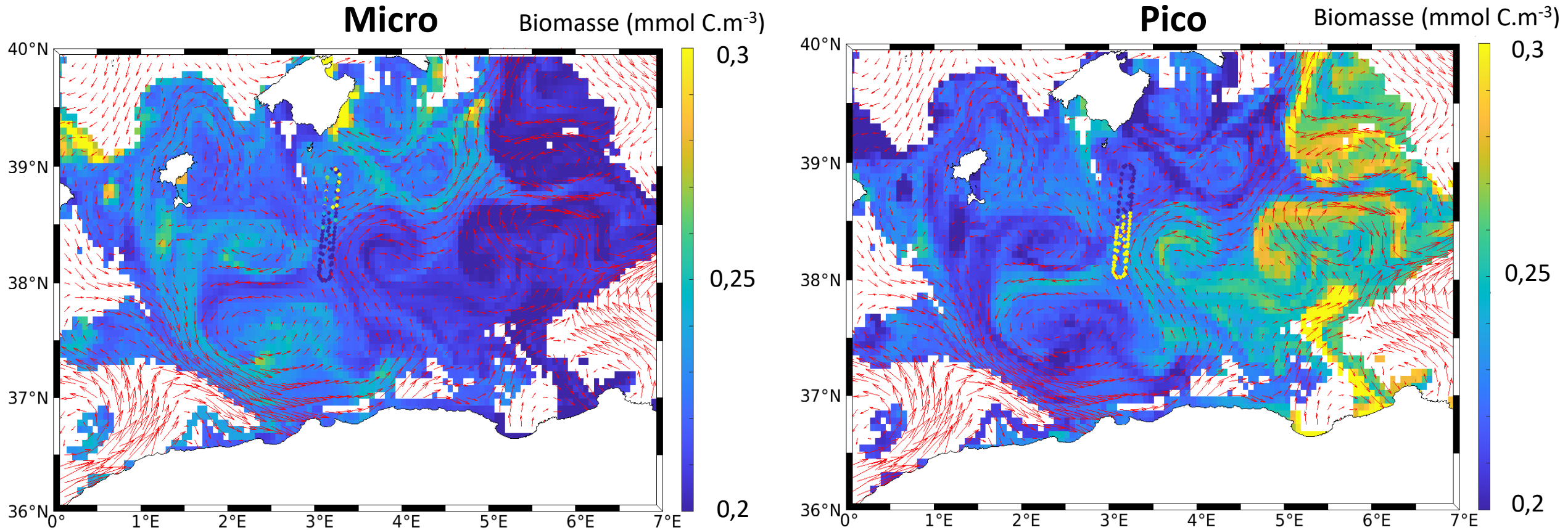


[Tzortzis *et al.*, 2021]

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

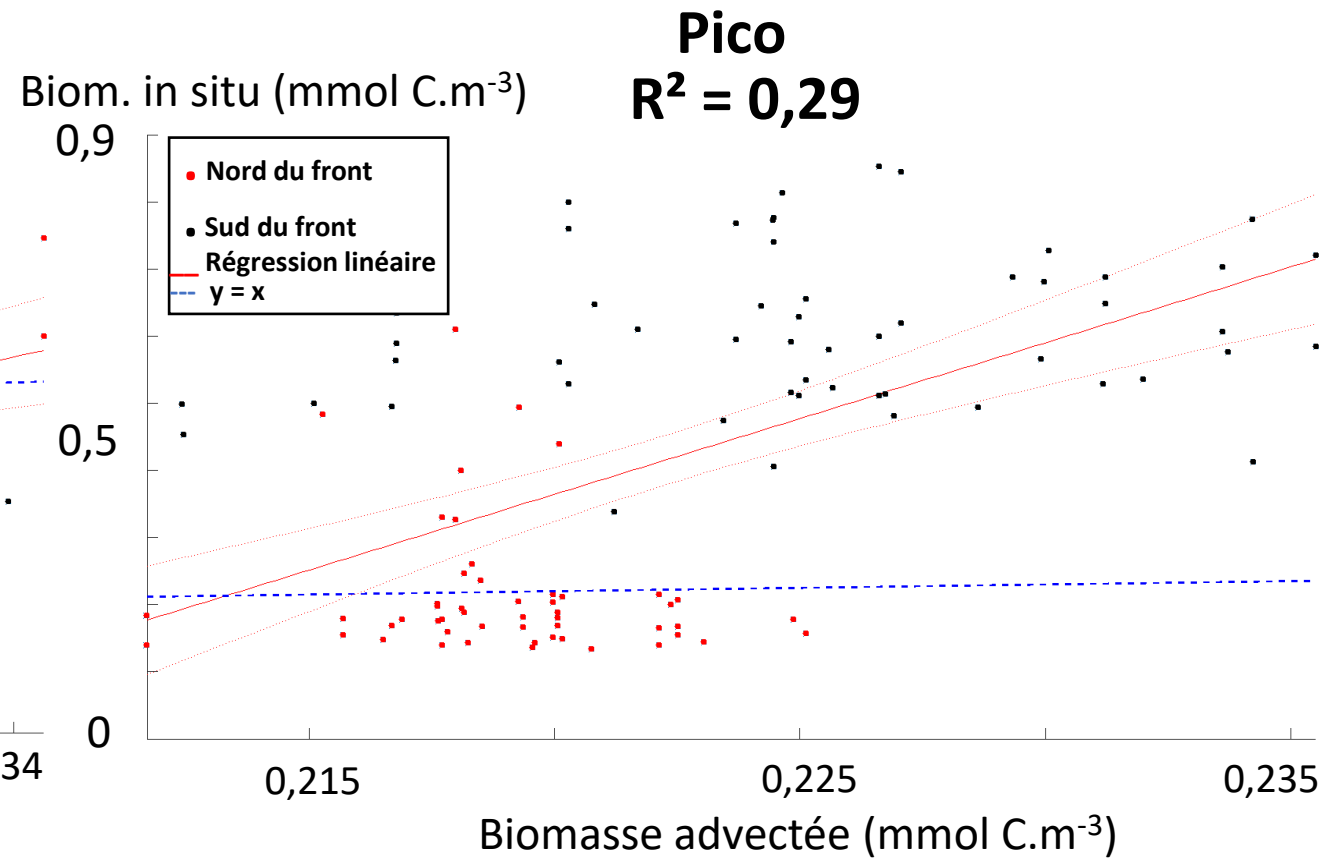
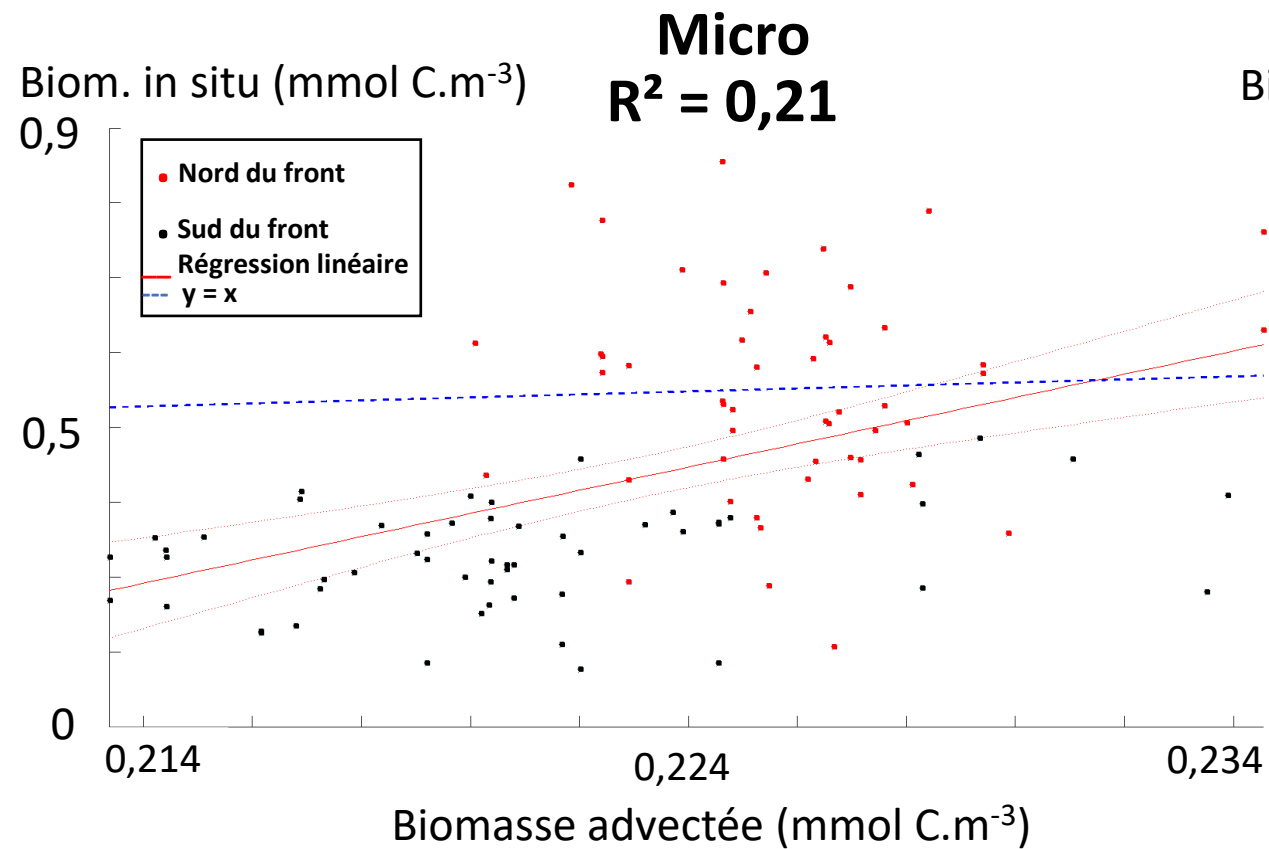


# Advection des biomasses initiales

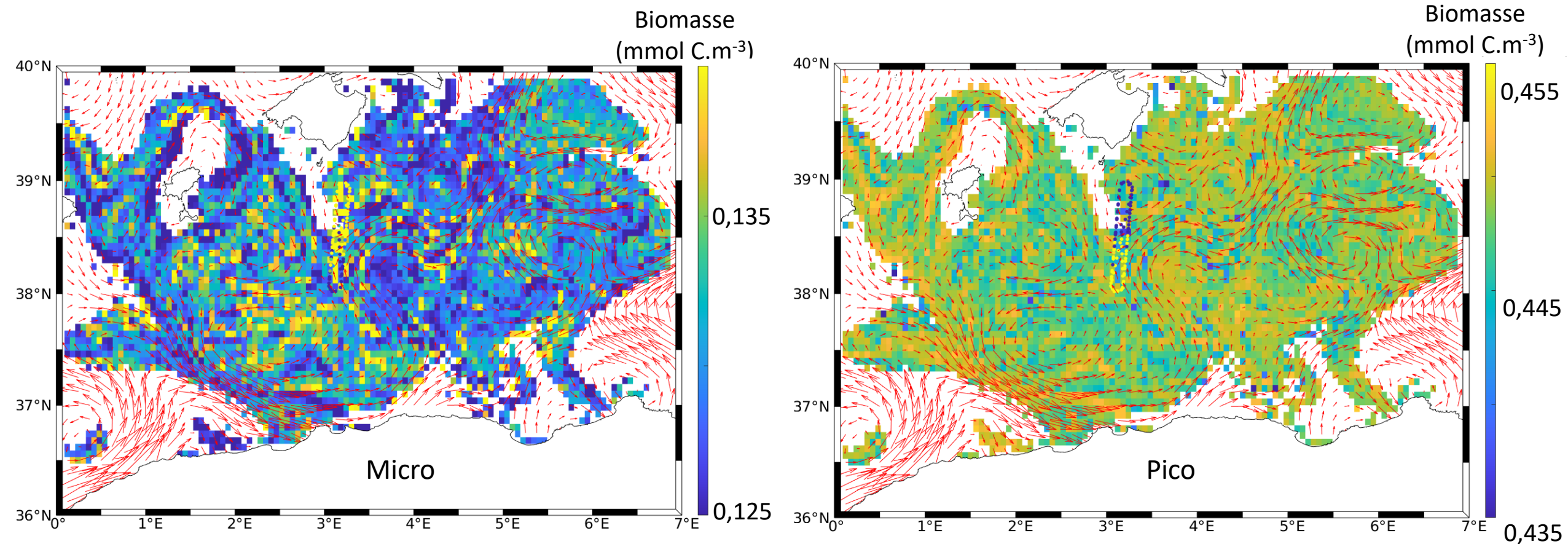


- Gradient N-S représenté pour Pico et Micro
- Amplitude des variations modélisées au niveau du front plus faible

# Biomasse advectée vs. *in situ*



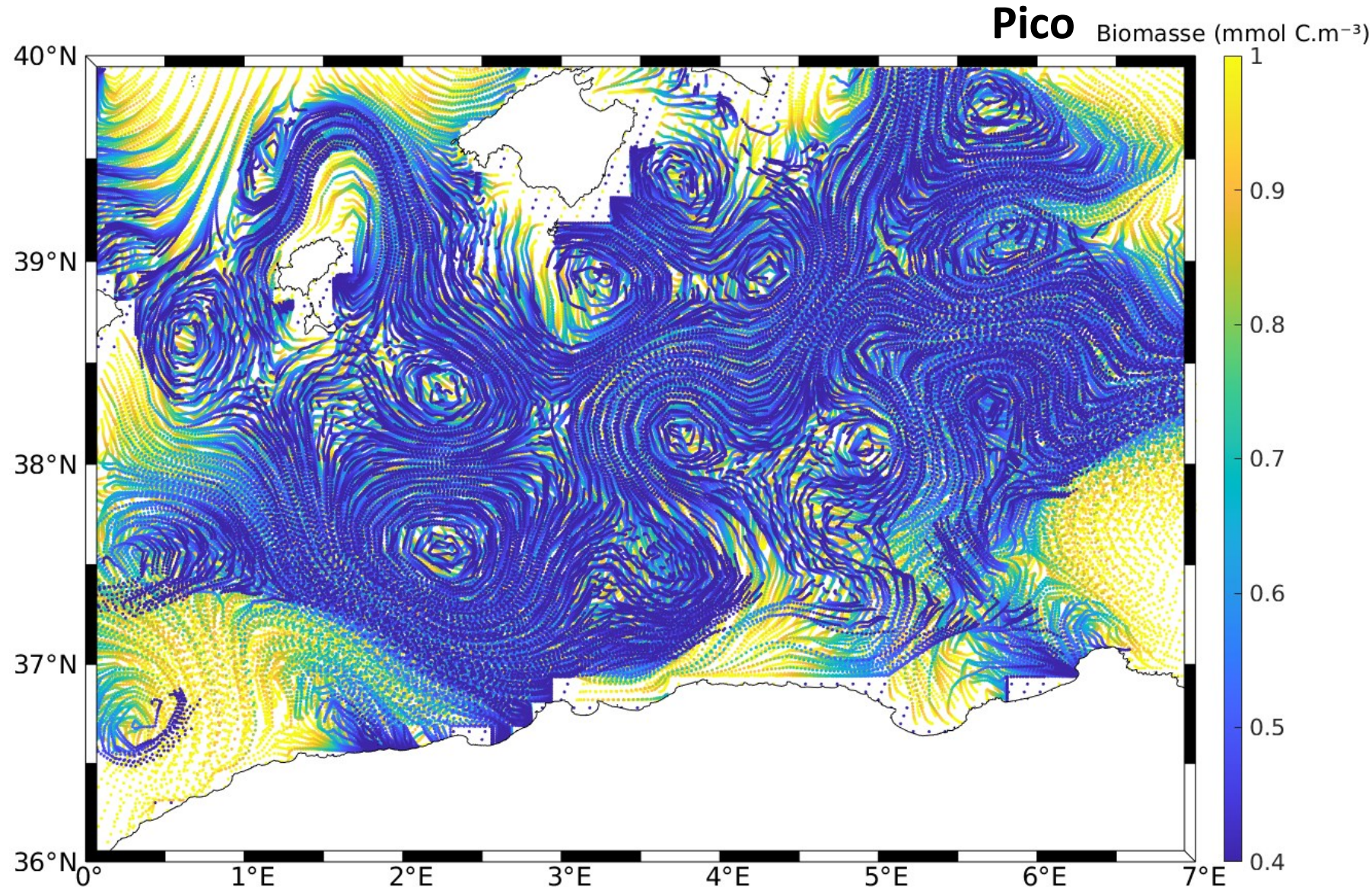
# Advection des biomasses couplées au modèle de plancton température dépendant



- 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
  - Tendance 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

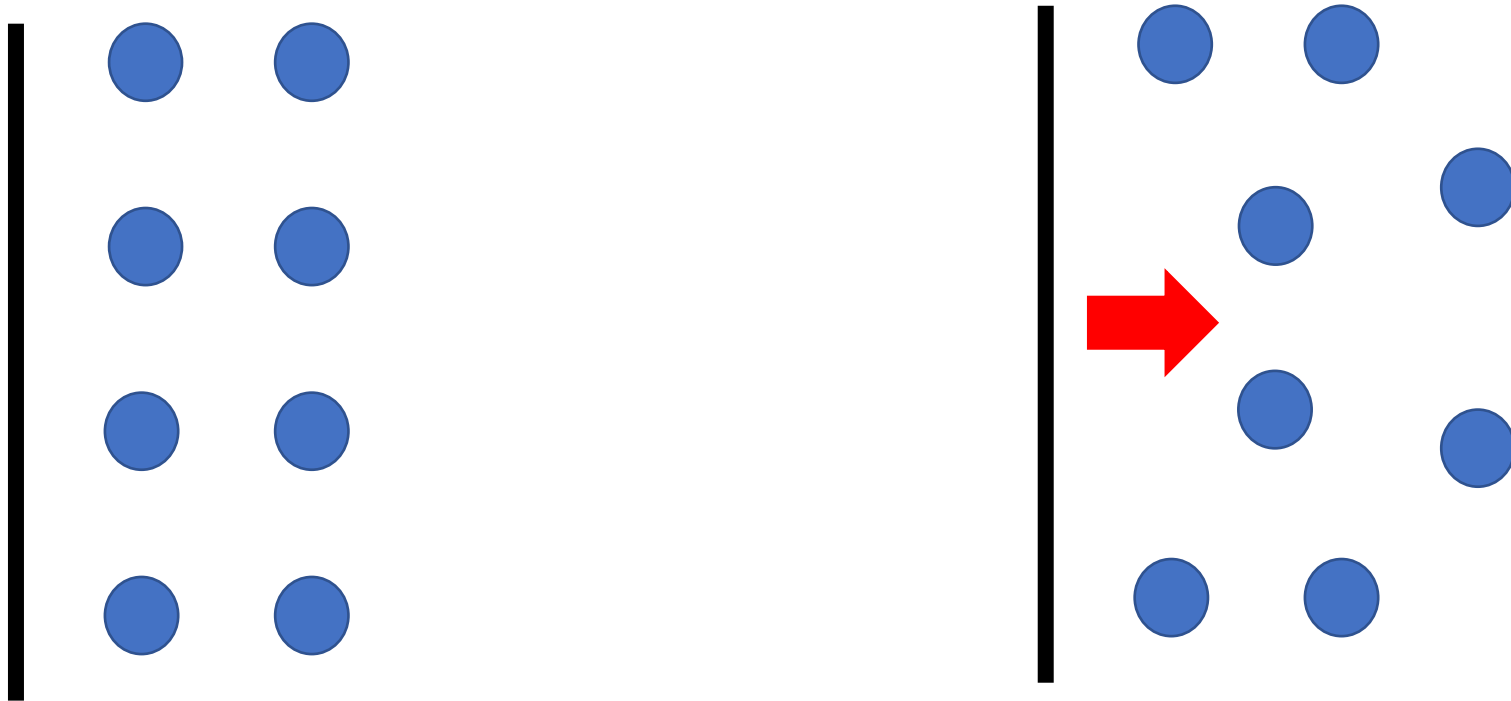




Merci de votre écoute !



# 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 <sup>3</sup> )	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
$\mu_{max}^{small}$ (variable quand pondéré par SST)	taux de croissance maximal pour $P_{small}$	1,9872	d <sup>-1</sup>	(Baklouti et al., 2021)
$\mu_{max}^{big}$	taux de croissance maximal pour $P_{big}$	2,7648	d <sup>-1</sup>	(Baklouti et al., 2021)
$g_{max}^{small}$	taux de broutage maximal pour $Z_{small}$	1,4256	d <sup>-1</sup>	(Baklouti et al., 2021)
$g_{max}^{big}$	taux de broutage maximal pour $Z_{big}$	1,4256	d <sup>-1</sup>	
$C/Chl_{small}$	C :Chl pour $P_{small}$	200	mg C.mg Chl <sup>-1</sup>	(Messié et al., 2022)
$C/Chl_{big}$	C :Chl pour $P_{big}$	50	mg C.mg Chl <sup>-1</sup>	(Lazzari et al., 2012)
$k_N^{reg}$	Cste 1/2 saturation de $P_{small}$ sur PO4	13,3	mmol C.m <sup>-3</sup>	(Pulido-Villena et al., 2021)
$k_N^{new}$	Cste 1/2 saturation de $P_{big}$ sur PO4	13,3	mmol C.m <sup>-3</sup>	(Pulido-Villena et al., 2021)
$k_G^{small}$	Cste 1/2 saturation de $Z_{small}$ sur $P_{small}$	5	mmol C.m <sup>-3</sup>	(Auger et al., 2011)
$k_G^{big}$	Cste 1/2 saturation de $Z_{big}$ sur $P_{big}$	5	mmol C.m <sup>-3</sup>	
mP	taux de mortalité de $P_{big}$	0.05	d <sup>-1</sup>	(Auger et al., 2011)
mZ	taux de mortalité quadratique de $Z_{big}$	0,005	mmol C.m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup>	
eZ	fraction excrétée de $Z_{big}$ et $Z_{small}$	0,1		(Baklouti et al., 2021)
$\epsilon$	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 <sup>-3</sup>	in situ (Pulido-Villena et al., 2021)
$N_{new}^{ini}$ (1D)	concentration initiale de phosphate	0,3	mmol C.m <sup>-3</sup>	in situ (Pulido-Villena et al., 2021)
$P_{small}^{ini}$ (1D)	biomasse initiale de $P_{small}$ (Pico2)	0,6	mmol C.m <sup>-3</sup>	in situ (Tzortzis et al., 2021)
$P_{big}^{ini}$ (1D)	biomasse initiale de $P_{big}$ (Micro)	0,1	mmol C.m <sup>-3</sup>	in situ (Tzortzis et al., 2021)
$Z_{small}^{ini}$ (1D)	biomasse initiale de $Z_{small}$	0,3	mmol C.m <sup>-3</sup>	
$Z_{big}^{ini}$ (1D)	biomasse initiale de $Z_{big}$	0,2	mmol C.m <sup>-3</sup>	



# Annexe 5 :

TABLEAU IV – R<sup>2</sup> des relations entre abondances et paramètres du milieu

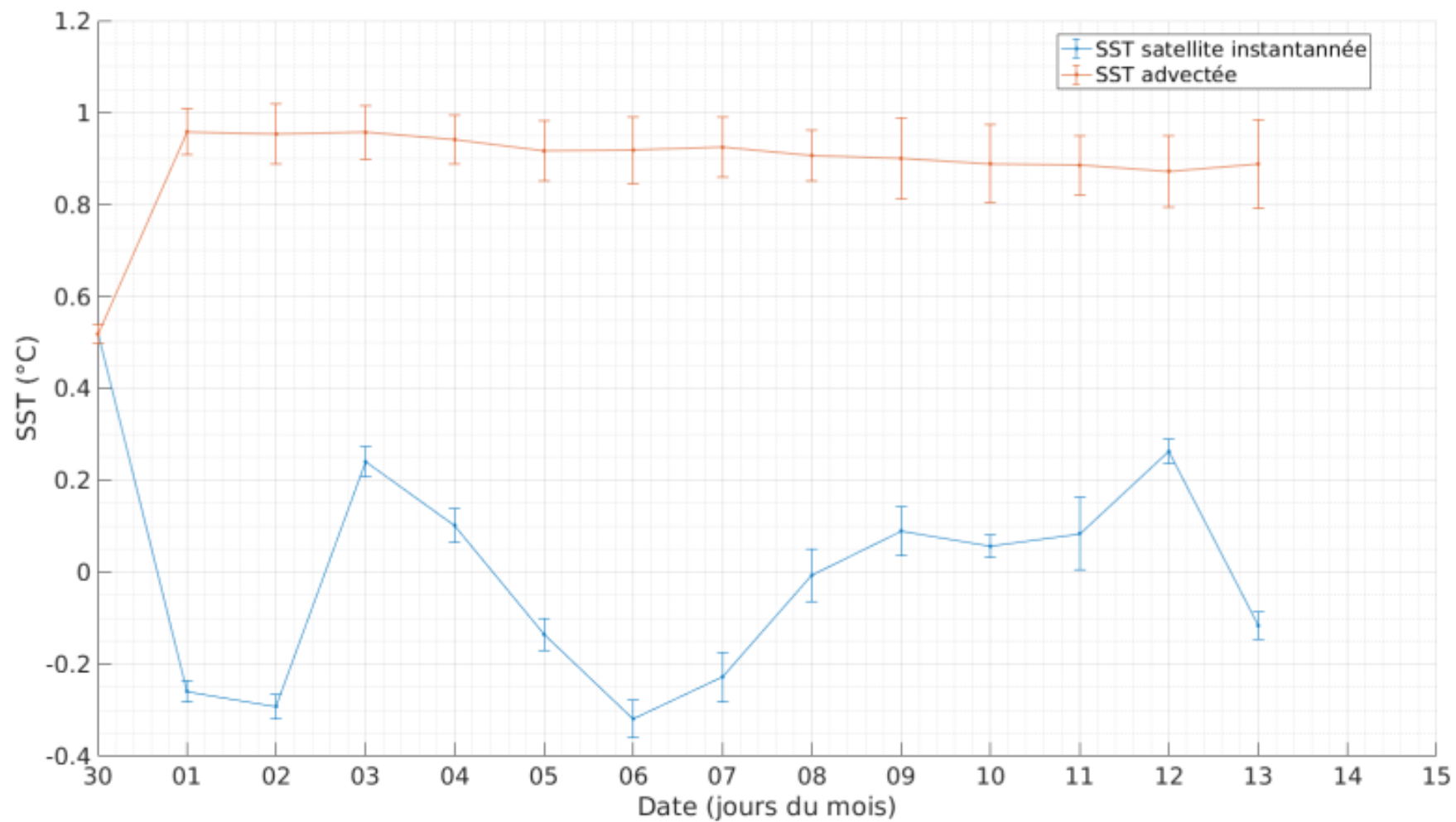
	Paramètre	Syne	Pico1	Pico2	Pico3	PicoHFLR	Rnano	Snano	Micro	Crypto
Hippodrome	T_tsg	0,02400	0,02280	0,22340	0,02190	0,00690	0,21770	0,20664	0,13428	0,01170
	S	0,62395	0,58380	0,71526	0,03630	0,00966	0,38490	0,00172	0,51130	0,04485
	Chl	0,31890	0,22200	0,34660	0,00970	0,00890	0,10540	0,05610	0,33910	0,00001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

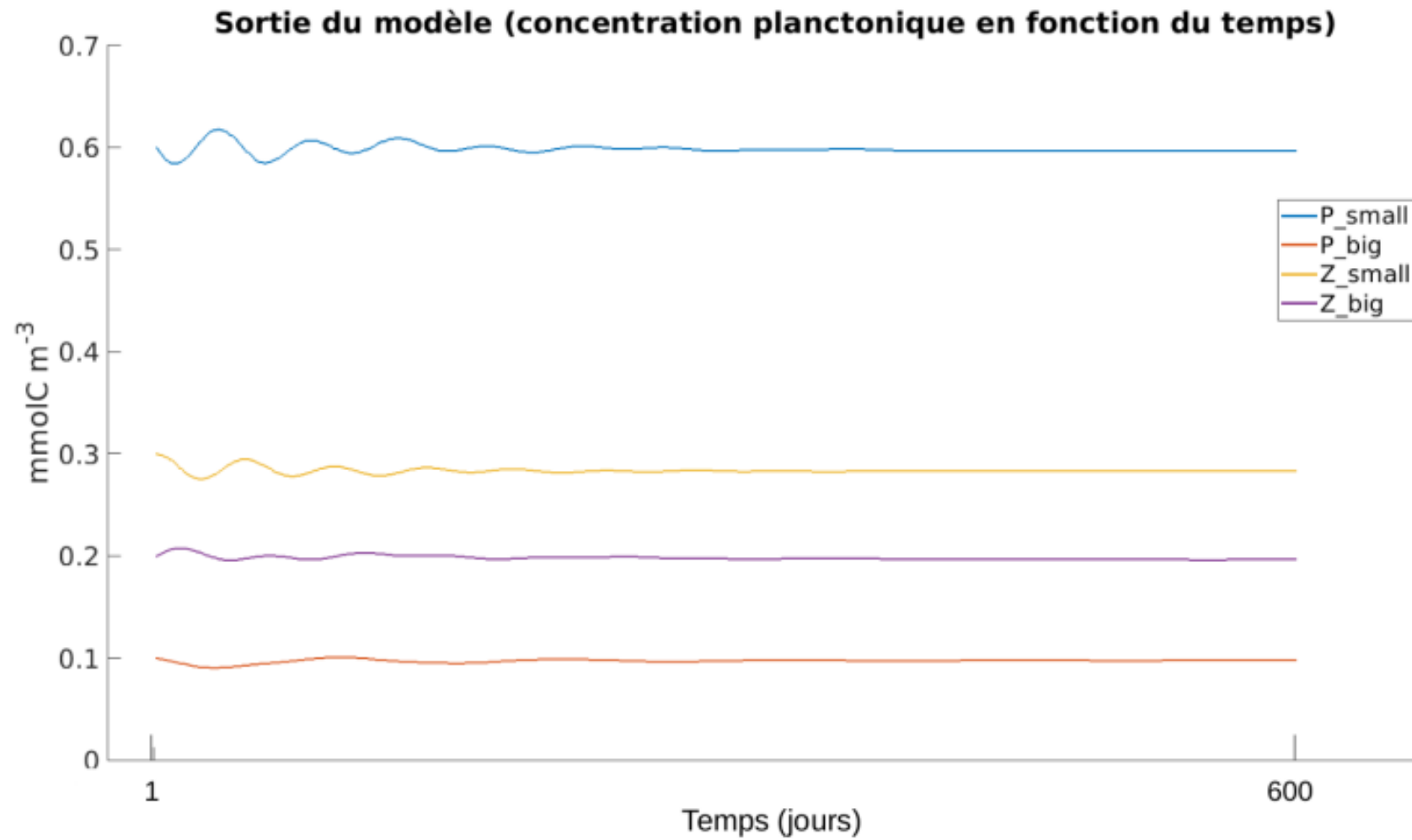
TABLEAU V – Récapitulatif des informations de biovolume, Q\_C et biomasse

	Biovolume ( $\mu\text{m}^3$ )	QC (fg C/cell)	Biomasse (mmolC/m <sup>3</sup> )	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 :



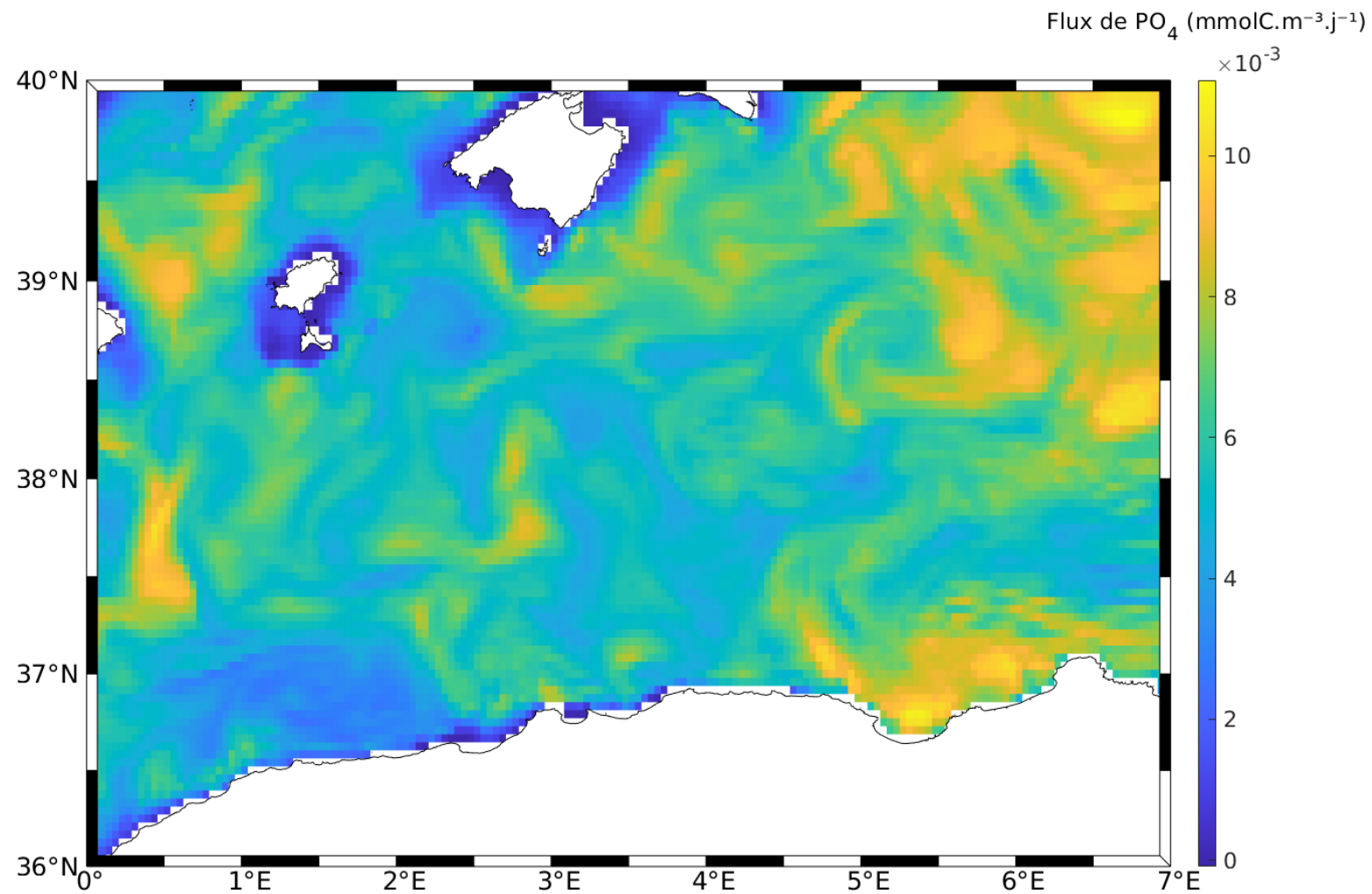
# Annexe 8 :

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

	R <sup>2</sup> Micro	R <sup>2</sup> 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



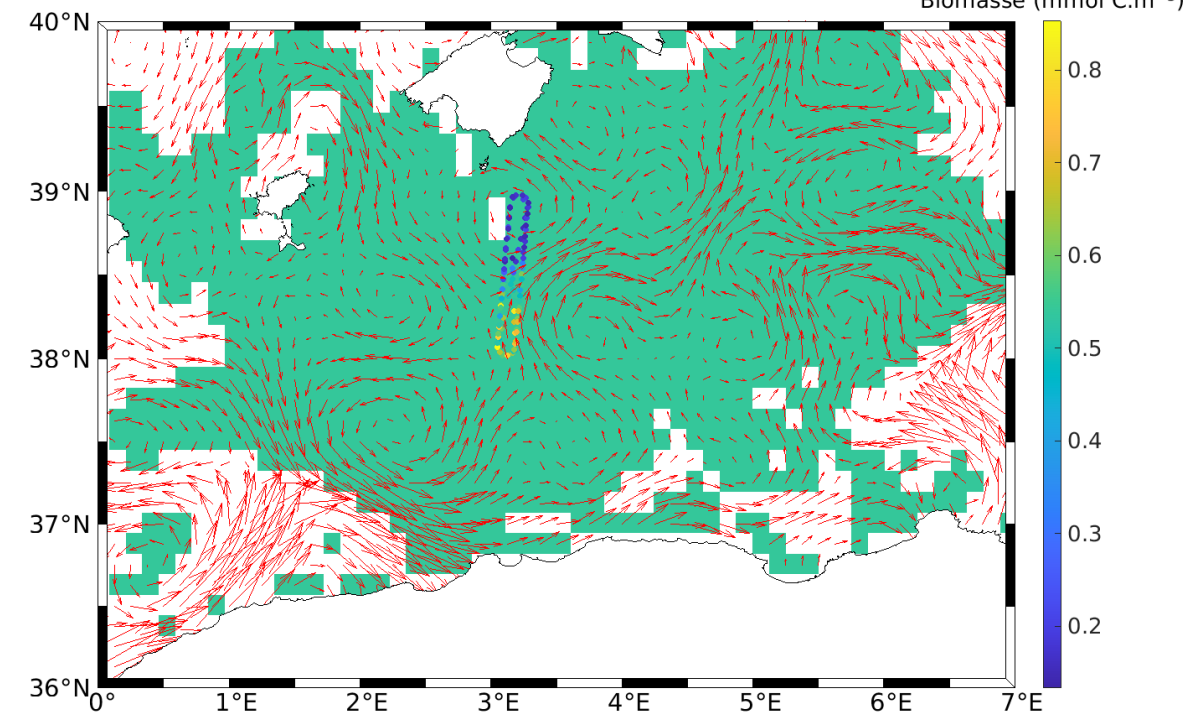
## Annexe 9 :



# Annexe 10 :

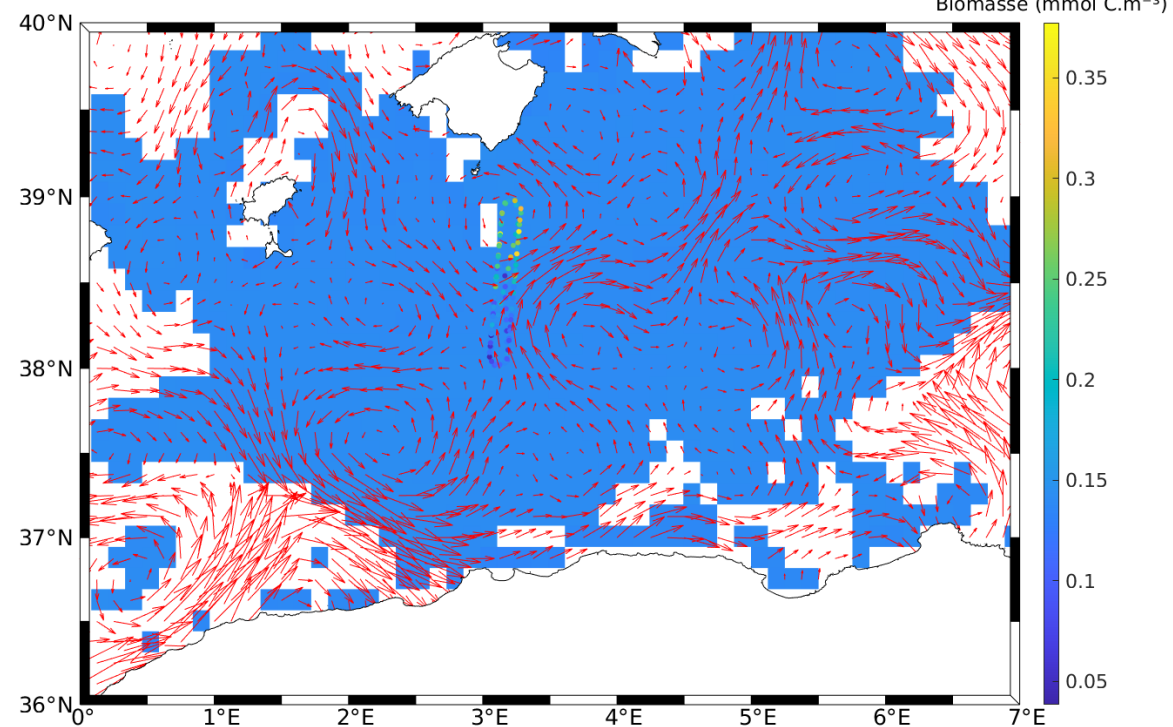
Pico

Biomasse (mmol C.m<sup>-3</sup>)

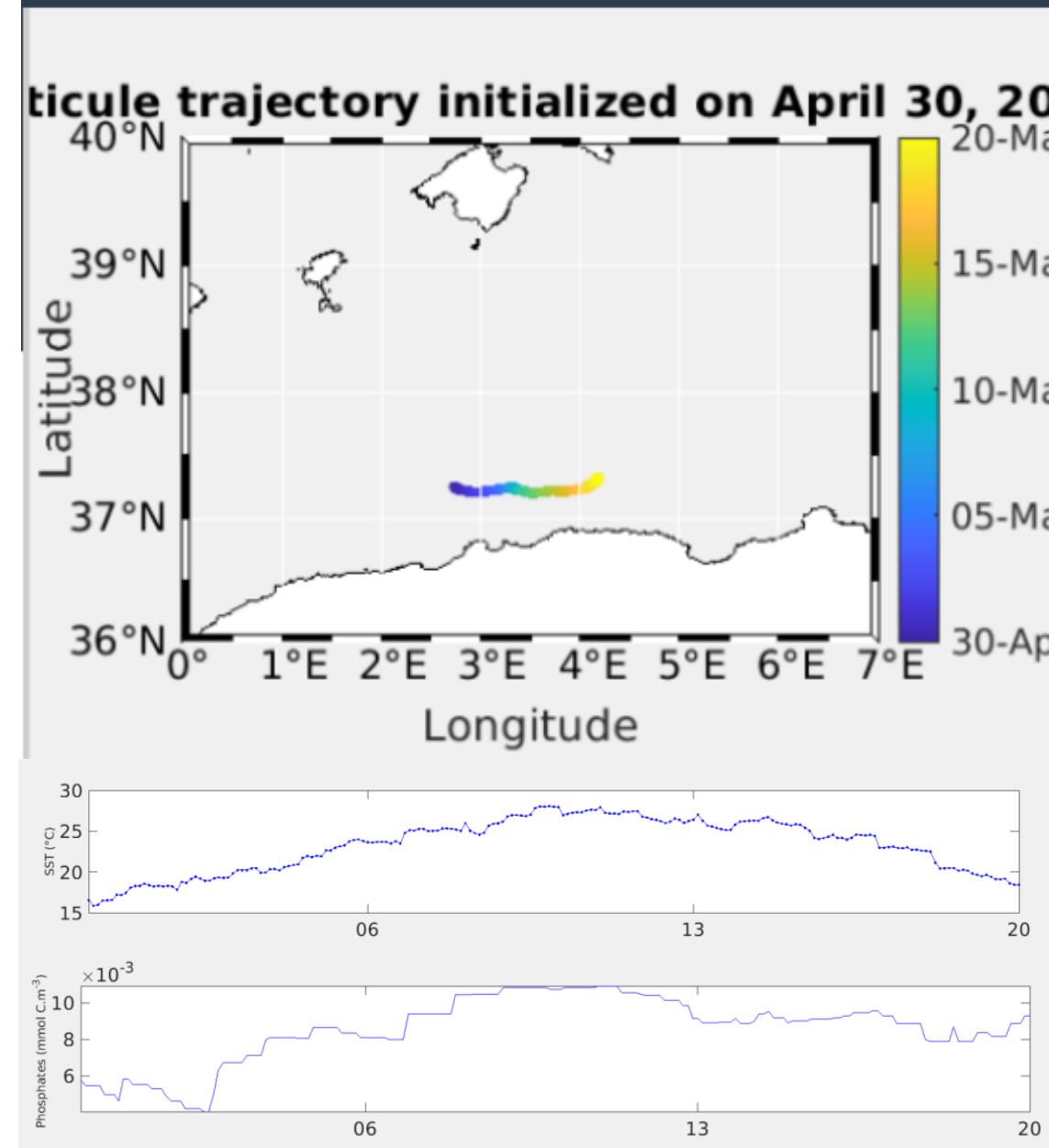
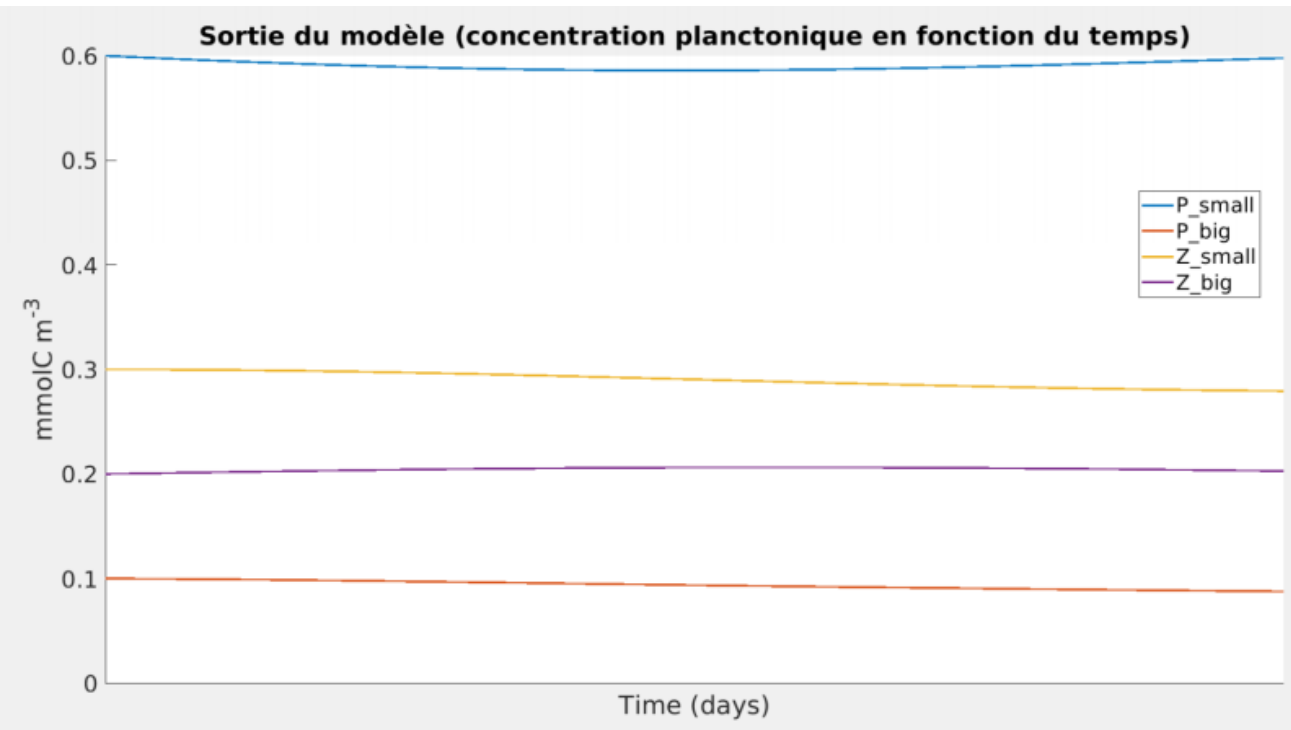


Micro

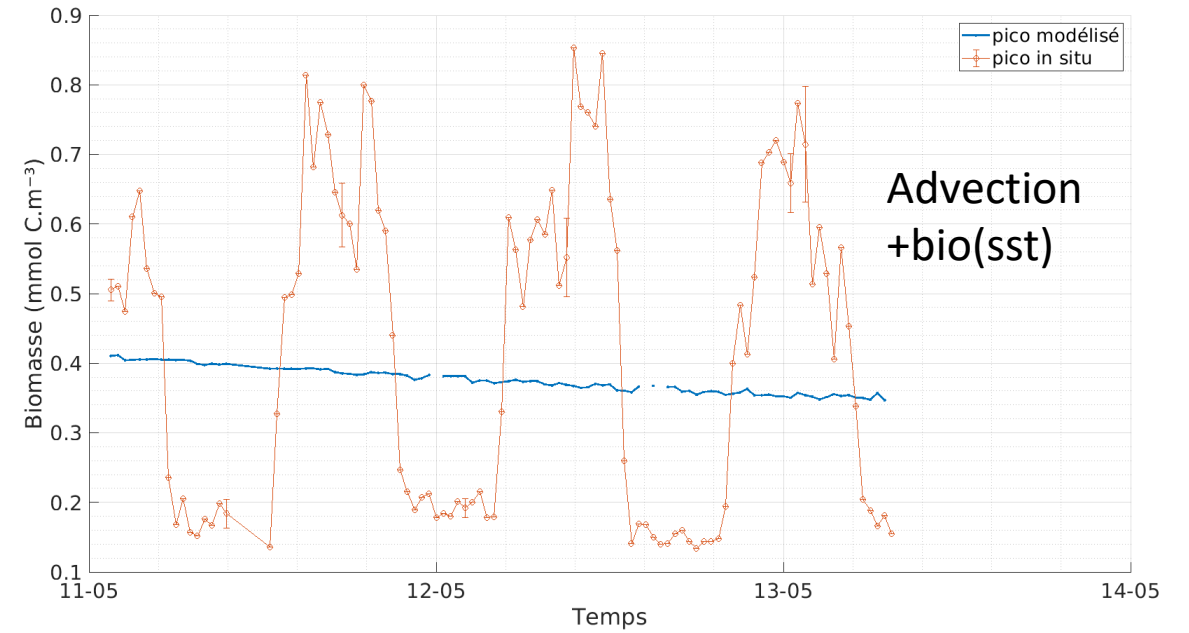
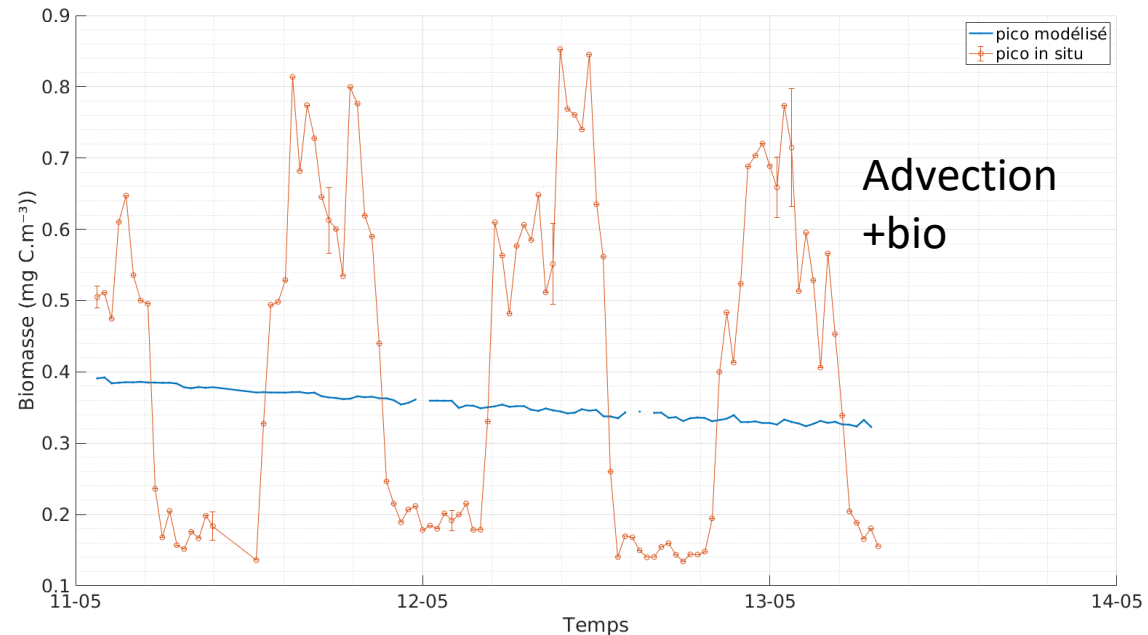
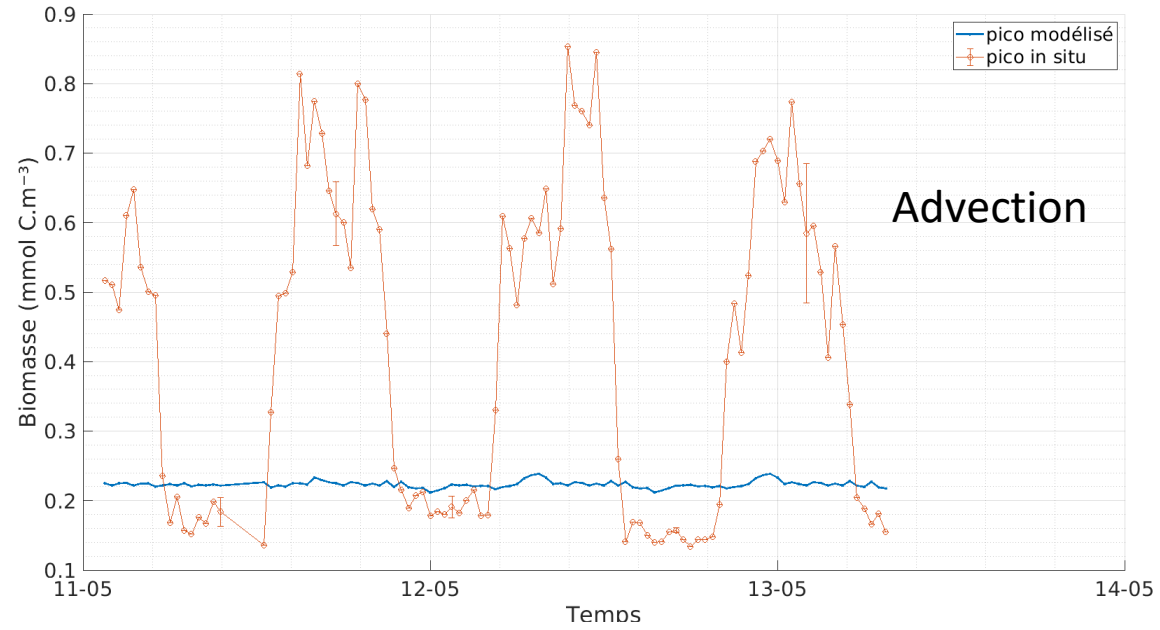
Biomasse (mmol C.m<sup>-3</sup>)



# Annexe 10 :



# Annexe 11 :



# Annexe 12 :

