Étude de l'influence de la circulation à (sous-)mésoéchelle sur la distribution spatiale des éléments biogéochimiques et biologiques à l'aide de mesures in situ et satellites

Louise Rousselet

Soutenance de thèse – 4 Décembre 2018

Rapporteurs:	Sabrina SPEICH	Ecole Normale Supérieure, LDM
	Xavier CAPET	Université Pierre et Marie Curie, LOCEAN
Examinateurs:	Pascale BOURUET-AUBERTOT	Université Pierre et Marie Curie, LOCEAN
	Ivan DEKEYSER	Université Aix-Marseille, MIO
Invité:	Christophe MAES	IRD, LOPS
Directeurs de thèse:	Andrea DOGLIOLI	Université Aix-Marseille, MIO
	Anne PETRENKO	Université Aix-Marseille, MIO

mio Mediterranean Institute of Oceanography

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

cnrs

IRD

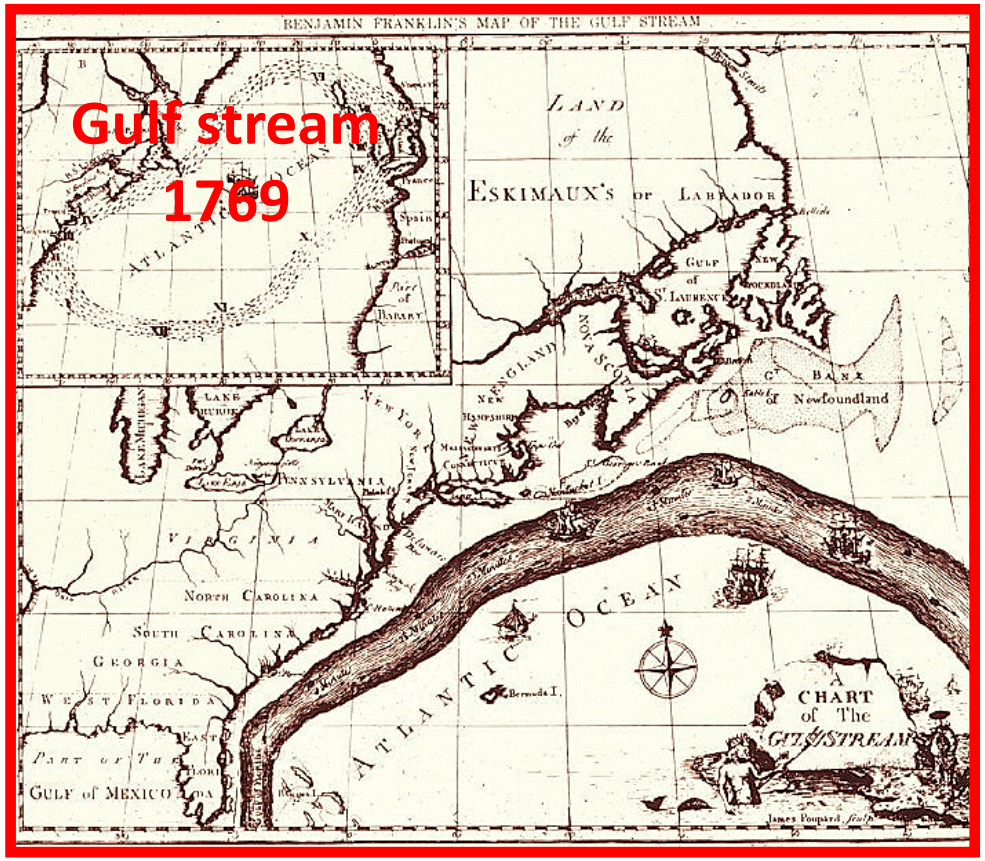
UNIVERSITÉ DE TOULON

Aix*Marseille université

Introduction : La variabilité océanique

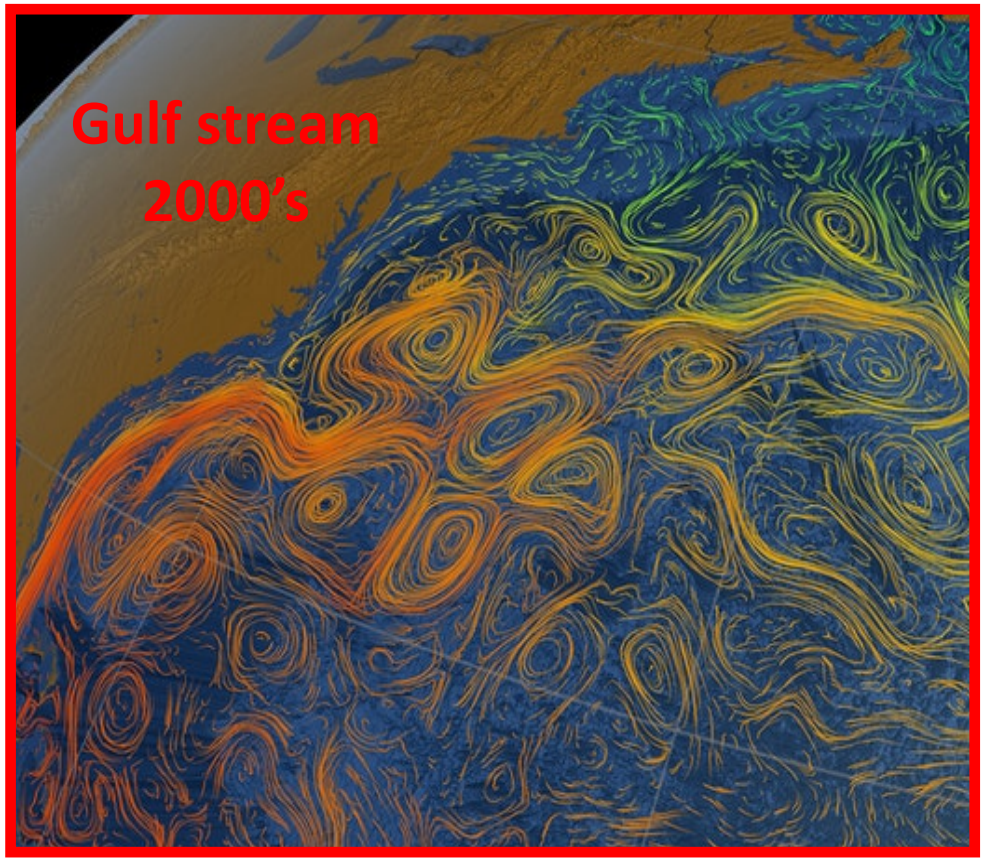
Aperçu historique

1ère carte des courants océaniques en **1665** *[Kircher]*



Carte du Gulf Stream en **1769** *[Franklin]*

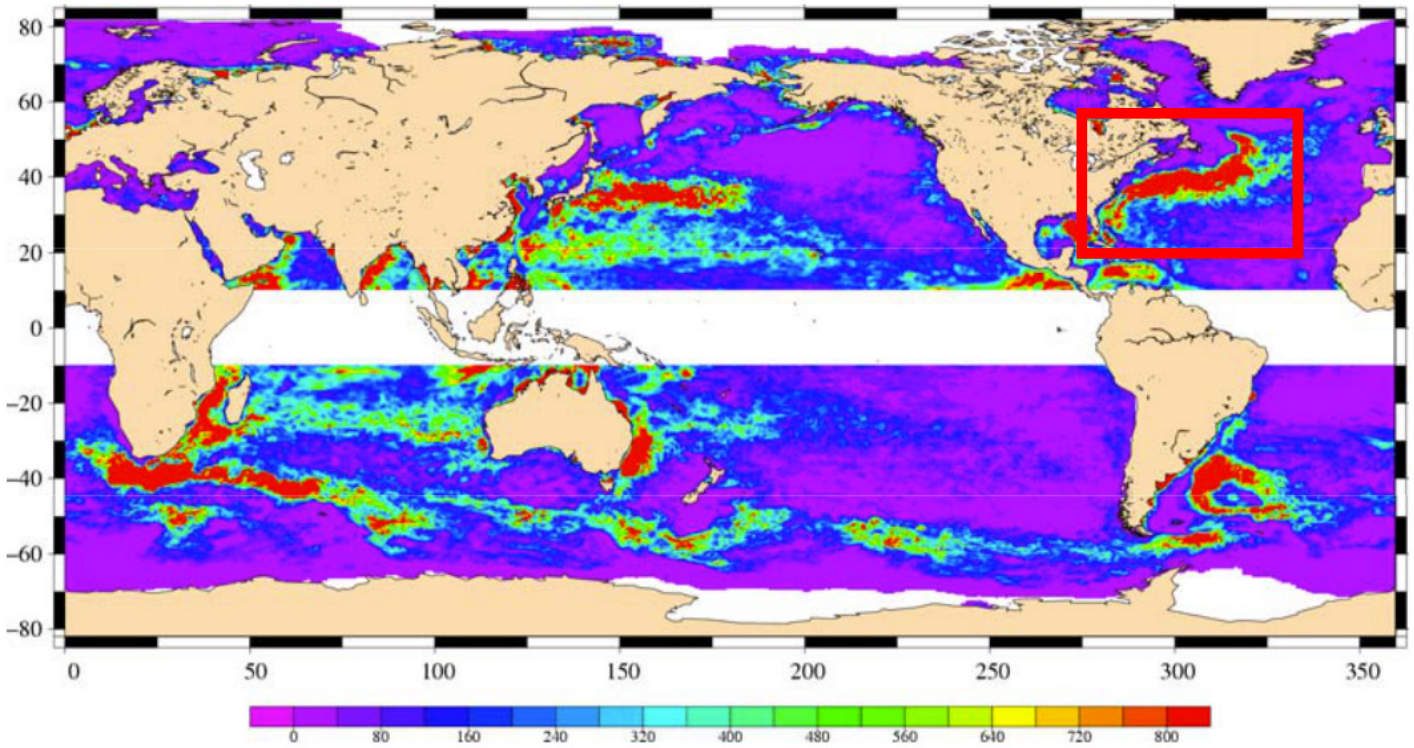
Vision actuelle



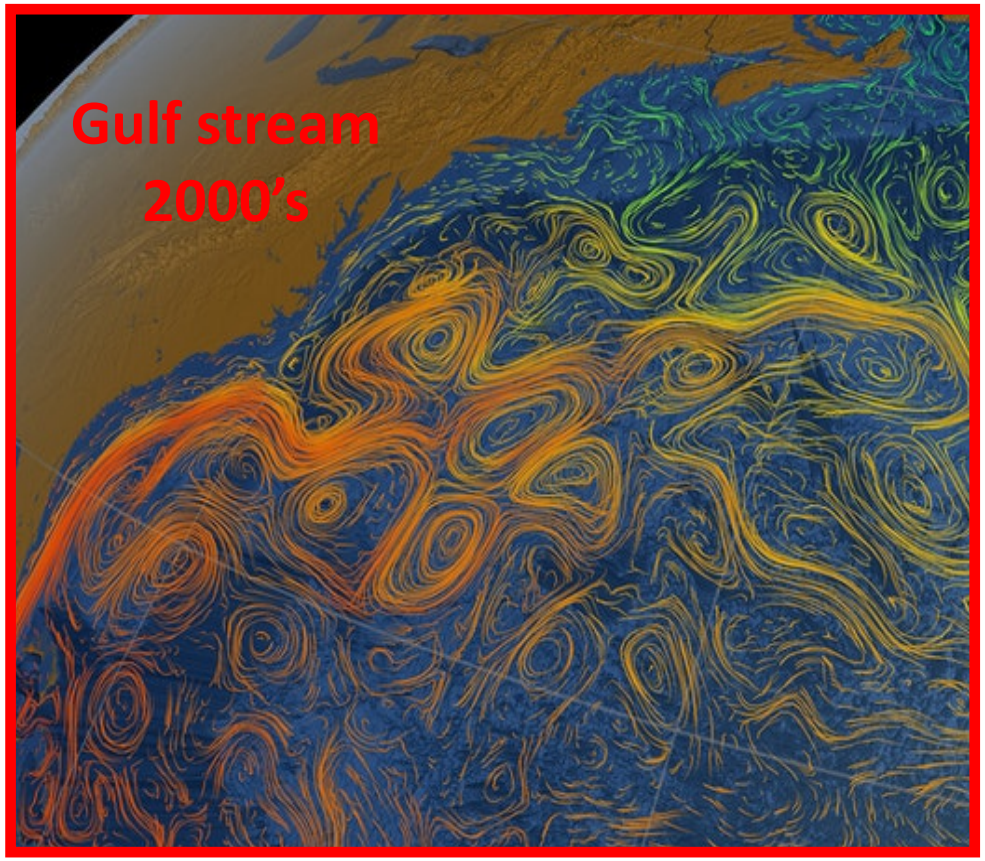
Courants et température du Gulf Stream
[Crédits NASA/SVS]

Introduction : La variabilité océanique

Vision actuelle

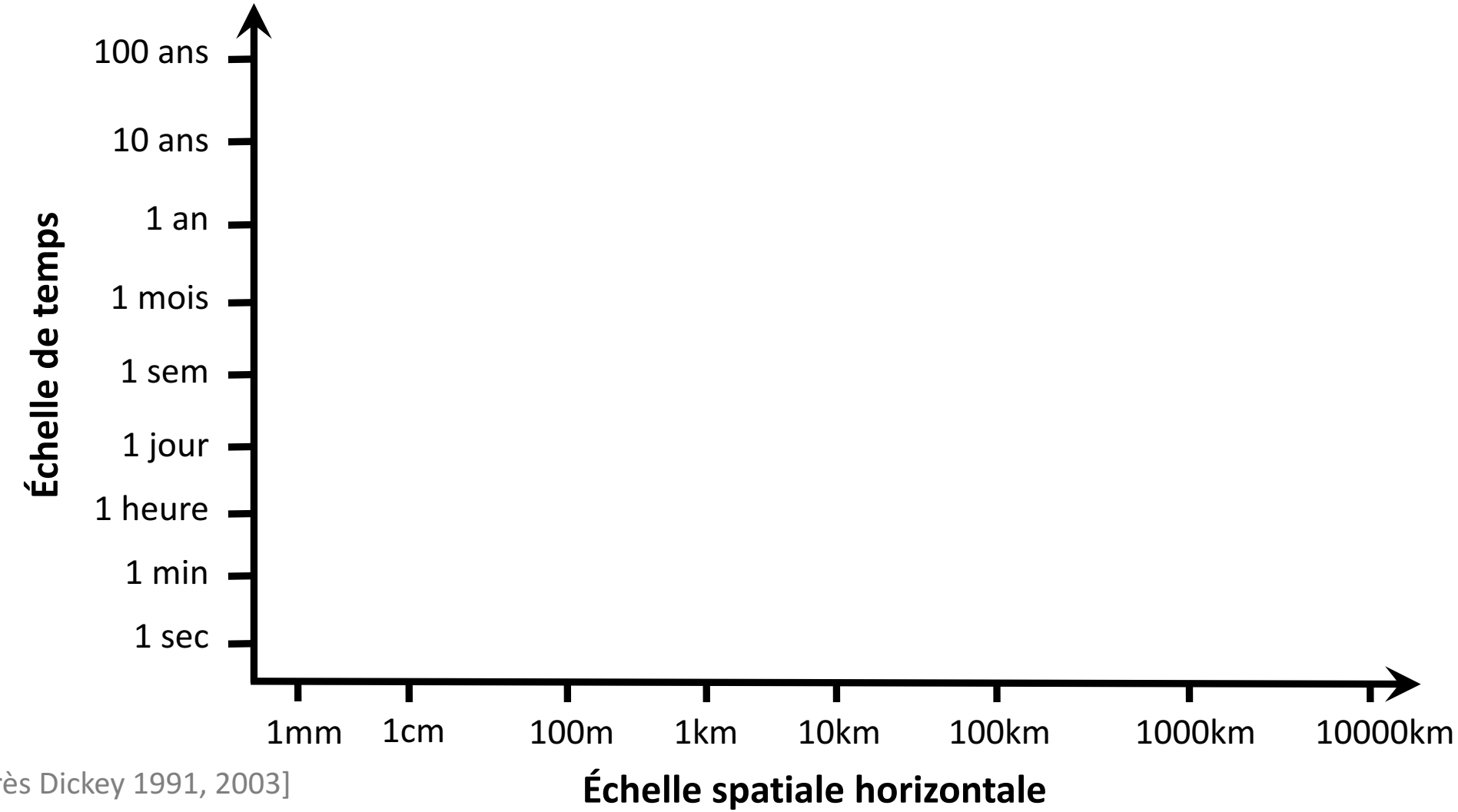


Energie cinétique tourbillonnaire moyenne
[Pascual et al., 2006]



Courants et température du Gulf Stream
[NASA/SVS]

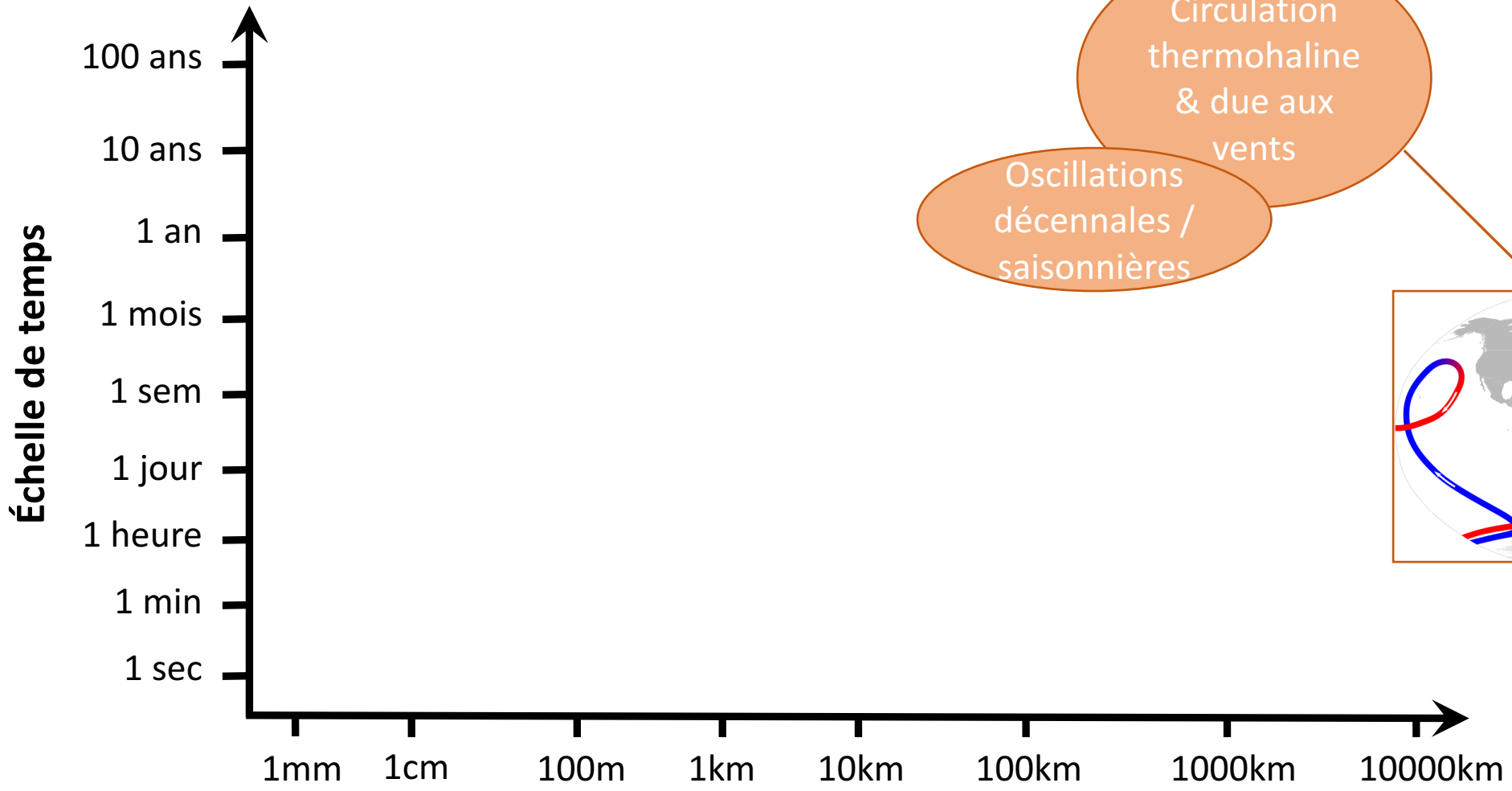
Les échelles de la circulation océanique



[D'après Dickey 1991, 2003]

Introduction : La variabilité océanique

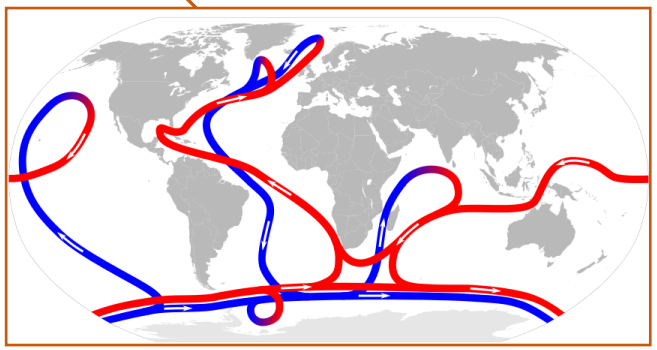
Les échelles de la circulation océanique



Grande échelle

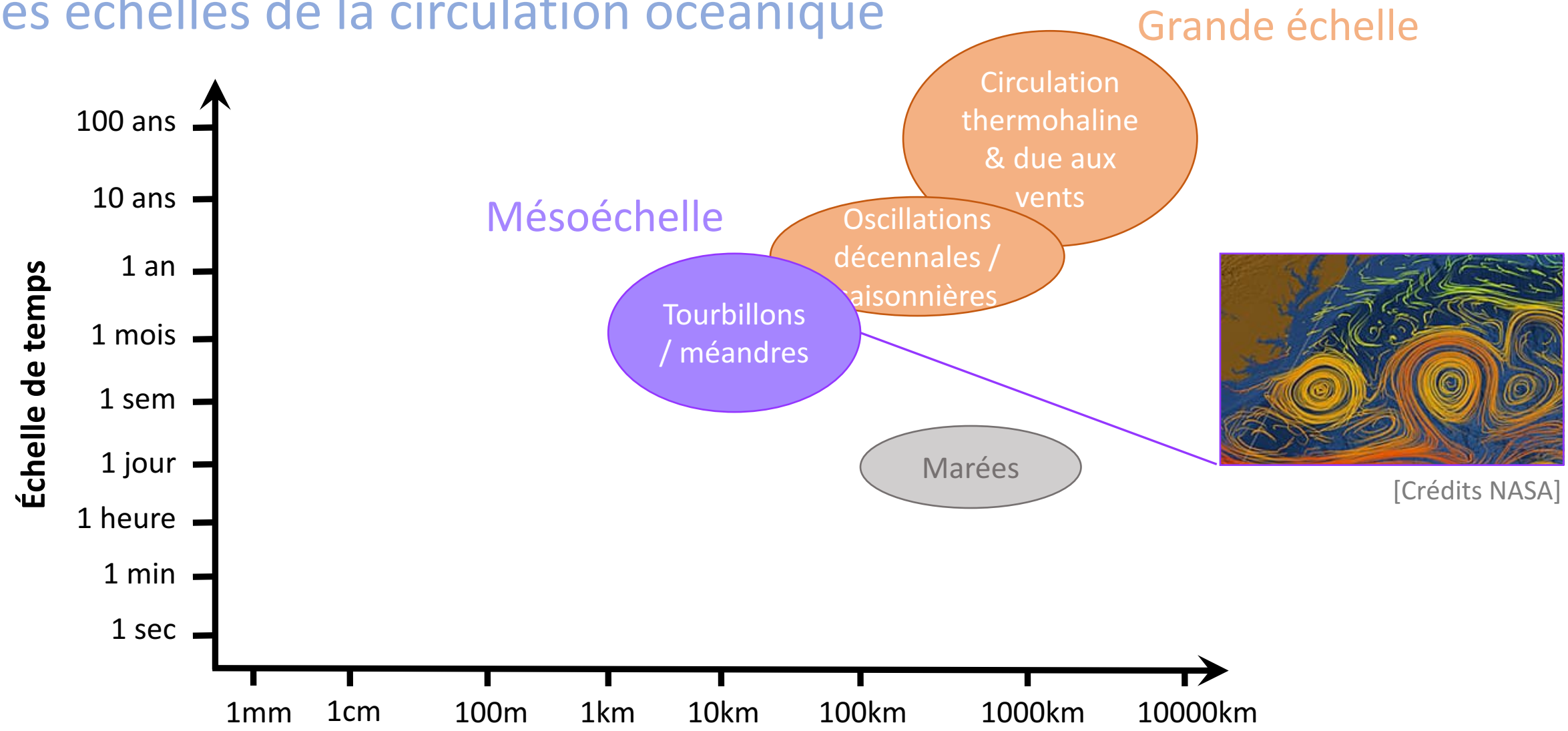
Circulation thermohaline & due aux vents

Oscillations décennales / saisonnières



[D'après Dickey 1991, 2003]

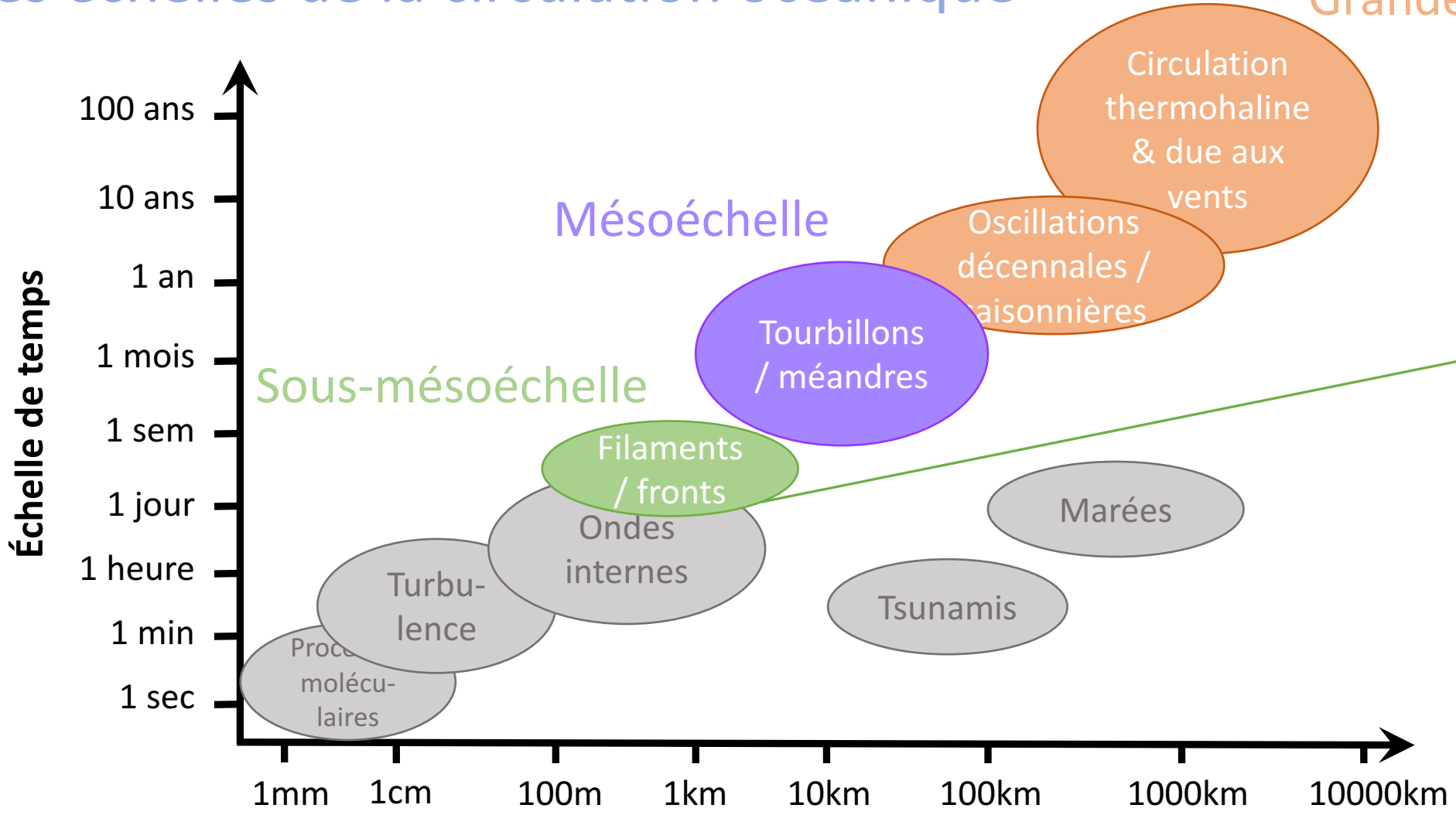
Les échelles de la circulation océanique

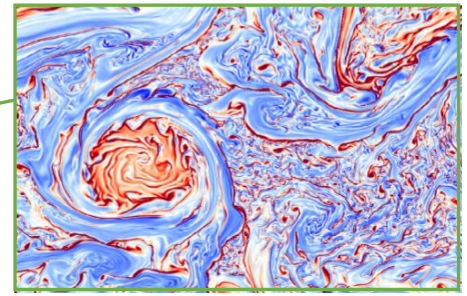


[Crédits NASA]

[D'après Dickey 1991, 2003]

Les échelles de la circulation océanique



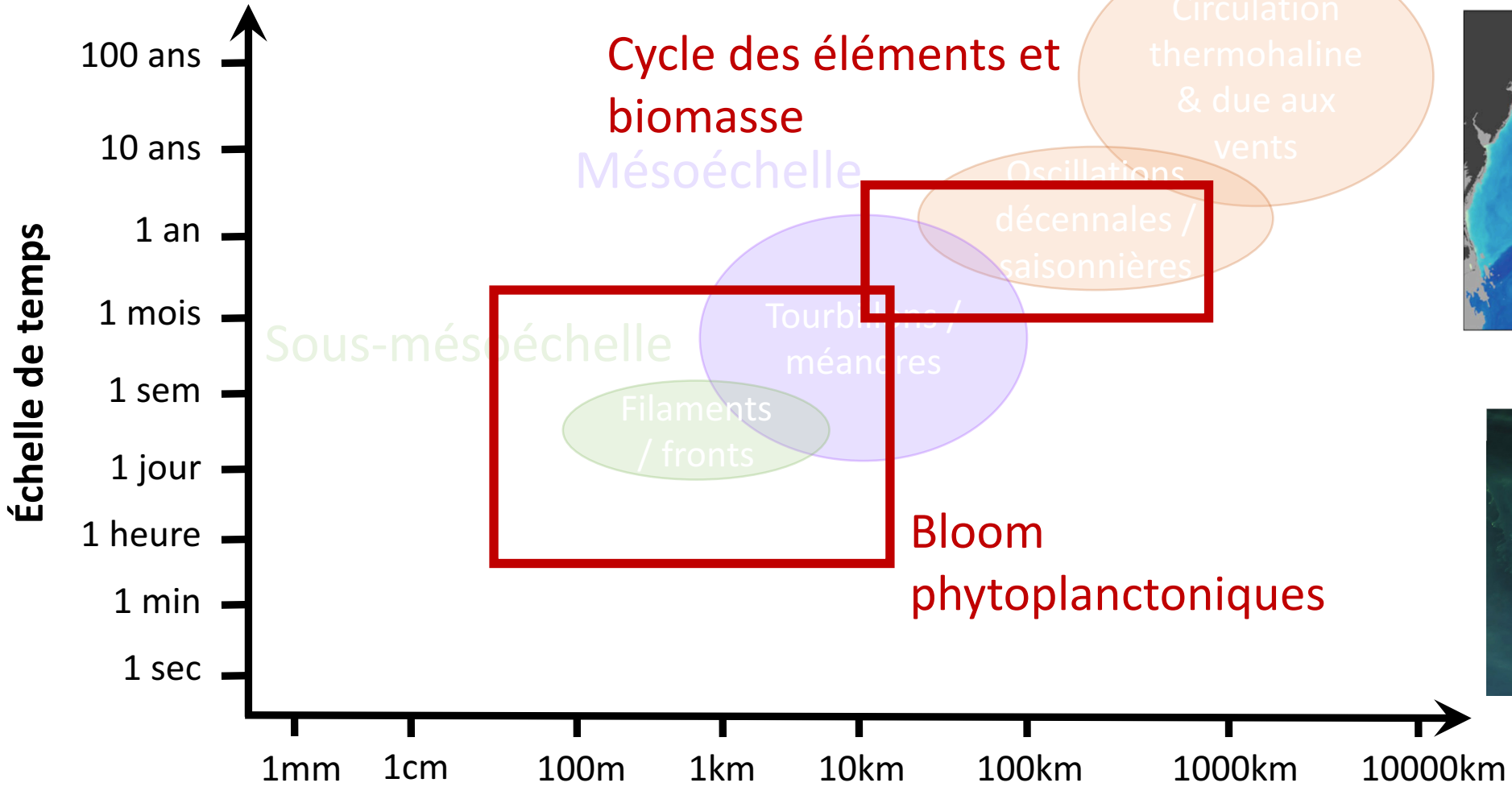


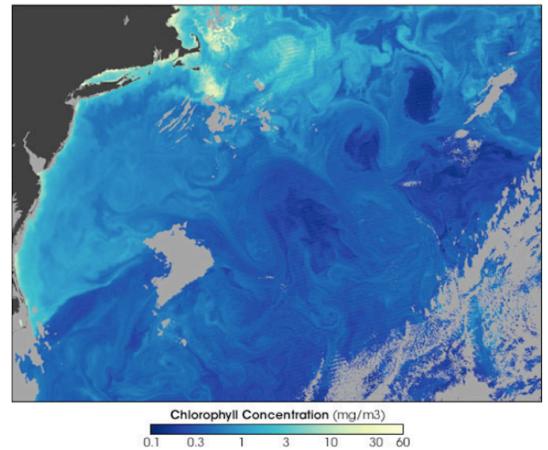
[McWilliams, 2016]

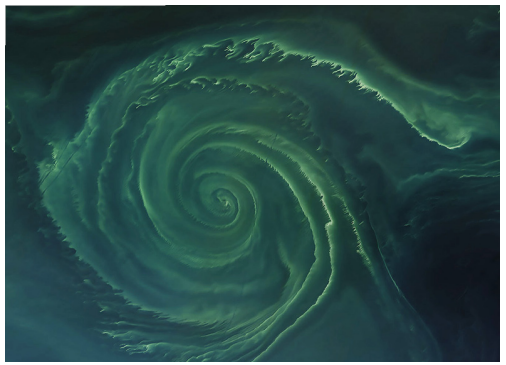
[D'après Dickey 1991, 2003]

Introduction : La variabilité océanique

Influences sur la biogéochimie/biologie







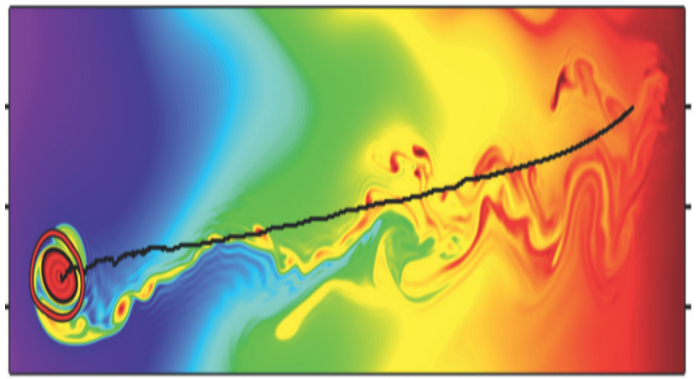
[Crédits NASA]

[D'après Dickey 1991, 2003]

Les mécanismes affectant la distribution des éléments

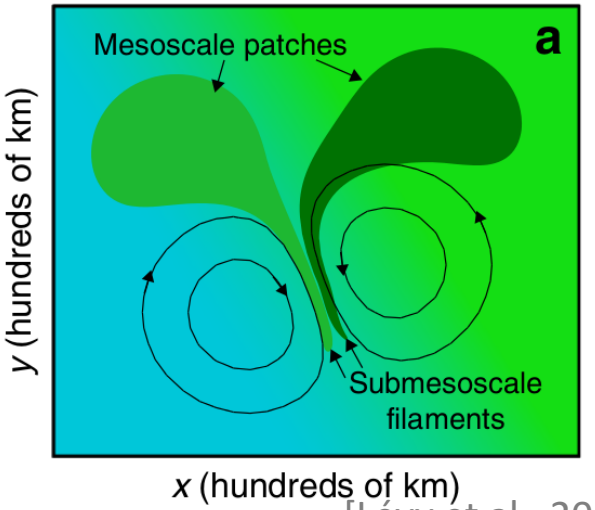
Transport (direct) et **Modulation de l'activité biologique** (indirect)

Transport par les tourbillons



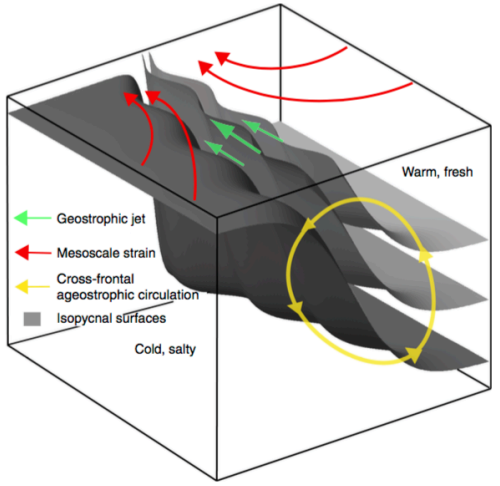
[Early et al., 2011]

Advection / Etirements



[Lévy et al., 2018]

Mouvement verticaux $\boldsymbol{\theta}(10\ m\ j^{-1})$

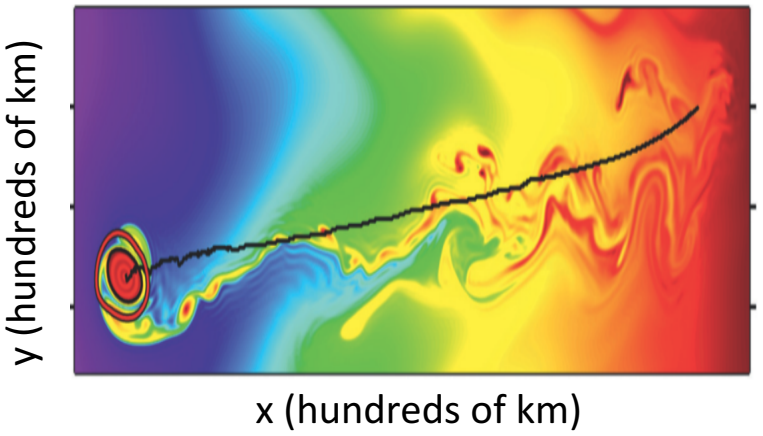


[Lévy et al., 2018]

Les mécanismes affectant la distribution des éléments

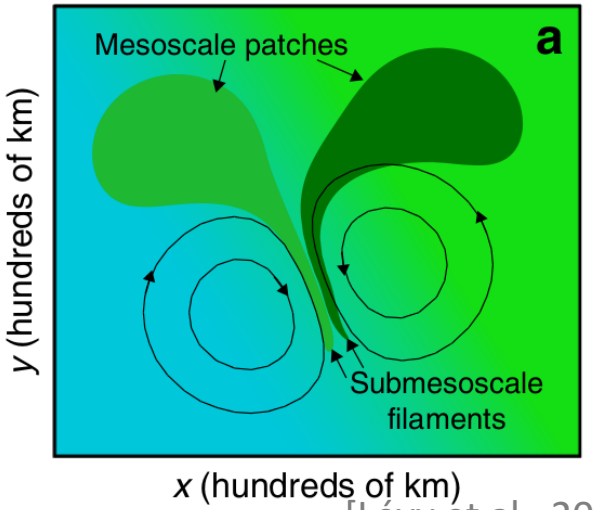
Transport (direct) et **Modulation de l'activité biologique** (indirect)

Transport par les tourbillons



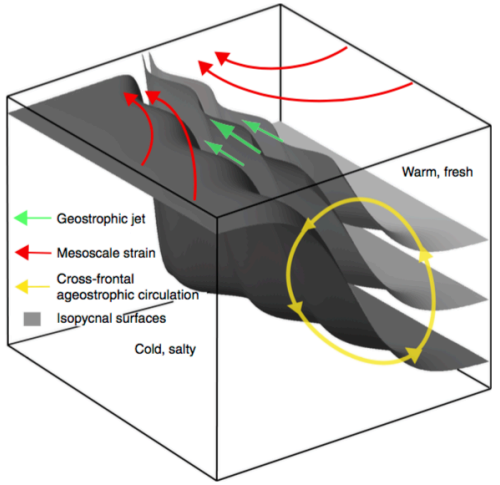
[Early et al., 2011]

Advection / Etirements



[Lévy et al., 2018]

Mouvement verticaux $\boldsymbol{\theta}(10\ m\ j^{-1})$



[Lévy et al., 2018]

« La taille et le caractère éphémère de ces structures représentent une véritable barrière à leur observation »

« Les courants sous-mésoéchelles sont continuellement en formation, mouvement et dissipation […], ce qui les rend particulièrement difficiles à échantillonner et modéliser »

[D'après McWilliams, 2016 et Lévy et al., 2018]

Introduction : Objectifs et stratégies

- **Étude de la variabilité océanique de grande à sous-mésoéchelle**
- **Identifier son influence sur la biogéochimie / biologie**

} **données *in situ***

Introduction : Objectifs et stratégies

- **Étude de la variabilité océanique de grande à sousmésoéchelle**
- **Identifier son influence sur la biogéochimie / biologie**

} **données *in situ***

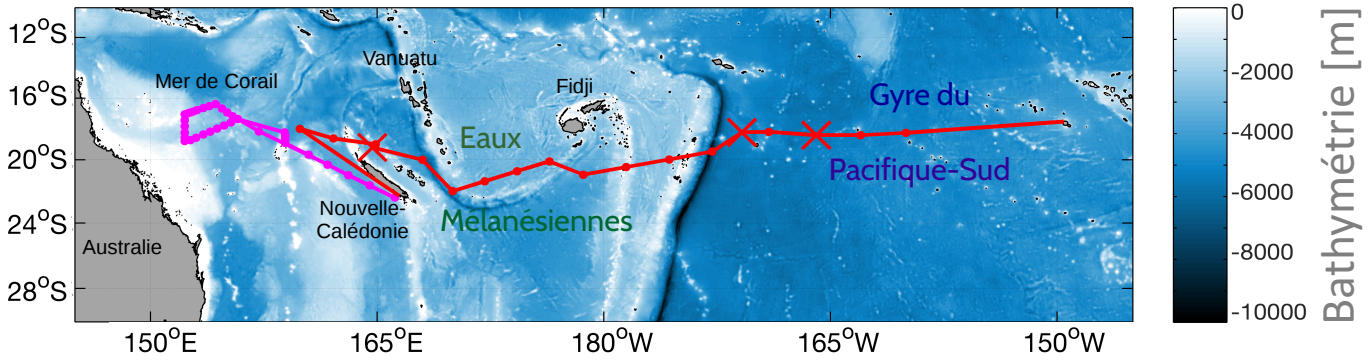
➢ Observations physiques/biogéochimiques/biologiques au cours de 3 campagnes océanographiques

➢ Contextualisation des observations grâce à des données satellites

➢ Identification de la variabilité océanique grâce à des analyses numériques Lagrangiennes

Zones d'étude et campagnes

Pacifique Tropical Sud-Ouest



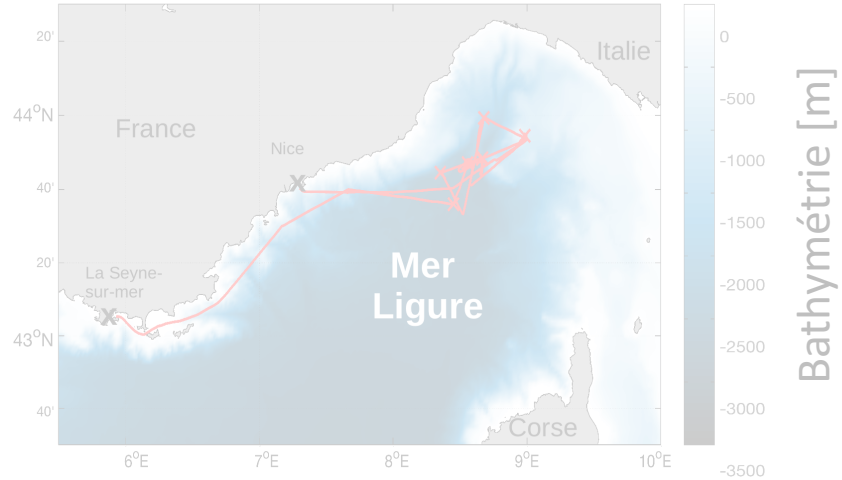
- Topographie complexe
- Instabilités et interactions courants-îles ⟶ forte activité mésoéchelle

- Campagne OUTPACE (160°E – 150°O) [Moutin & Bonnet, 2015]
  - 18 Fév – 3 Avr 2015
  - Eaux Mélanésiennes assez riches
  - Eaux du gyre plutôt pauvres

  } Gradient oligotrophique

- Campagne Bifurcation (Mer de Corail) [Maes, 2012]
  - 1 – 15 Sept 2012

Mer Ligure (Méditerranée occidentale)



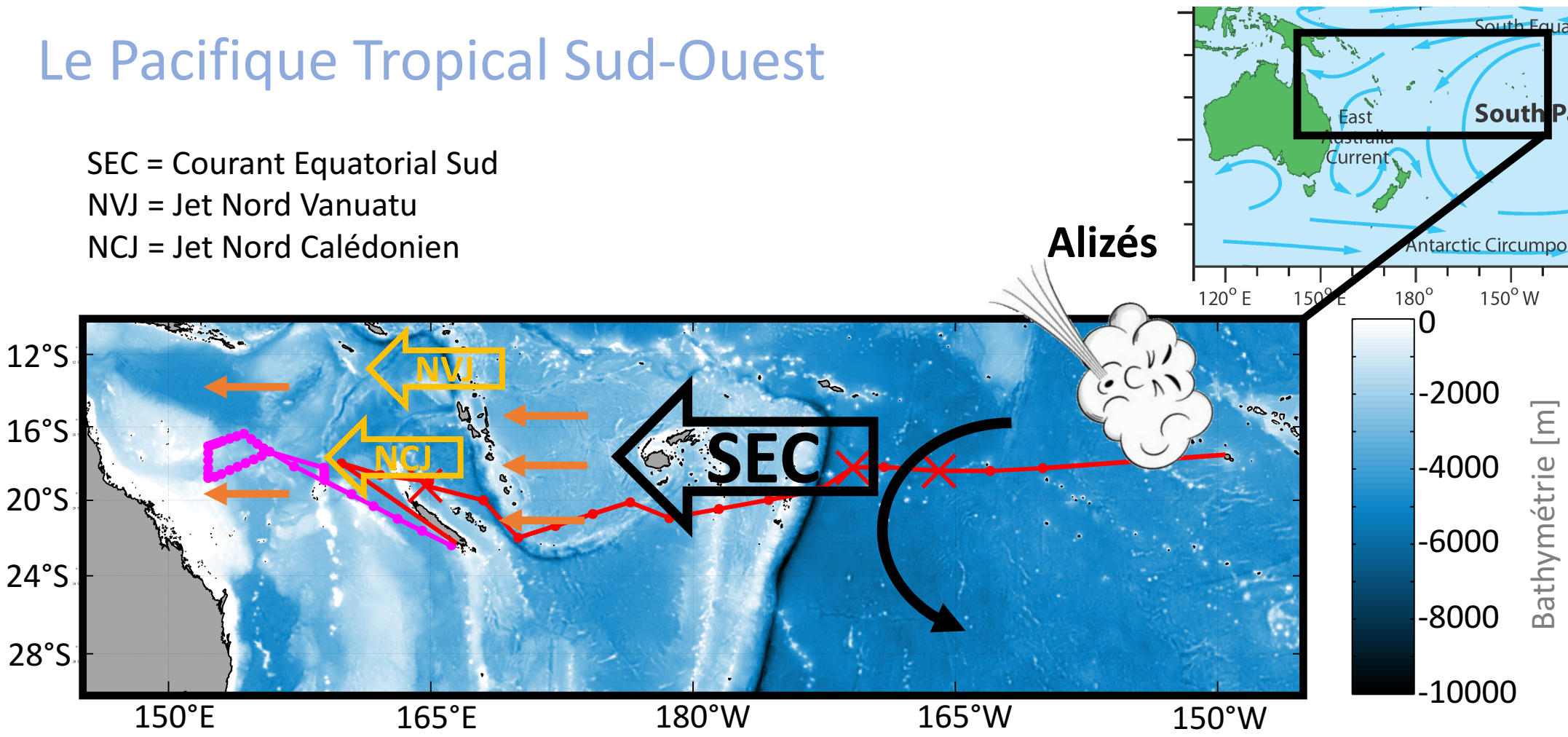
- Région oligotrophique
- Blooms au printemps et en automne
- Sanctuaire pour mammifères marins

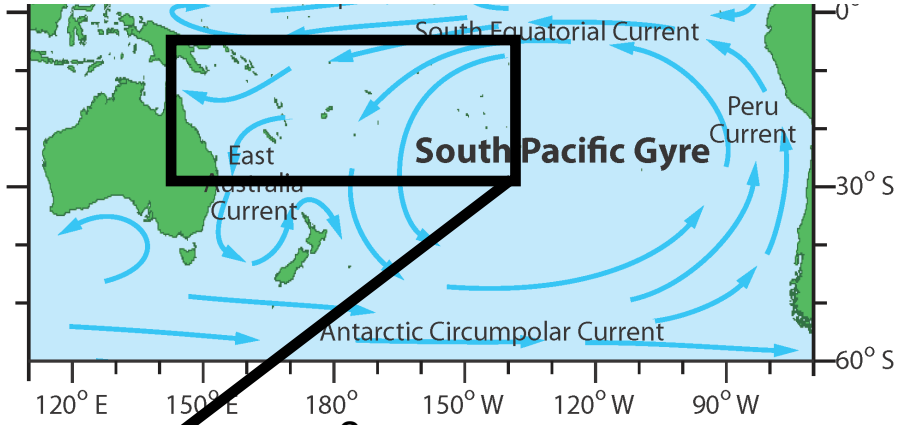
- Campagne OSCAHR [Doglioli, 2015]
  - 29 Oct – 6 Nov 2015
  - Stratégie adaptative pour cibler une structure cyclonique

Zone d'étude I

Le Pacifique Tropical Sud-Ouest

SEC = Courant Equatorial Sud
NVJ = Jet Nord Vanuatu
NCJ = Jet Nord Calédonien

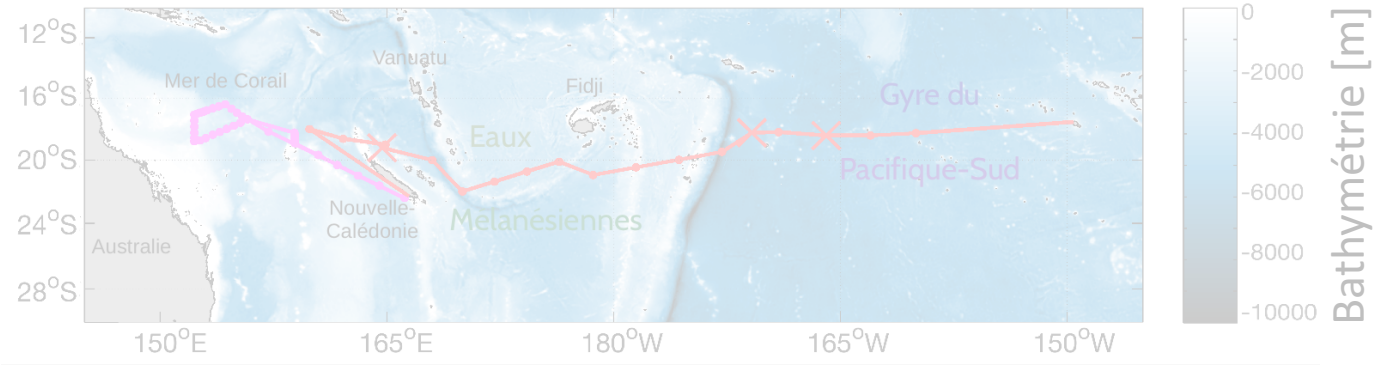




- Transport global vers l'Ouest *[Tomczak et Godfrey, 2013; Kessleret Cravatte, 2013]*
- Zone de forte variabilité *[Qiu et al., 2004]*

Zones d'étude et campagnes

Pacifique Tropical Sud-Ouest



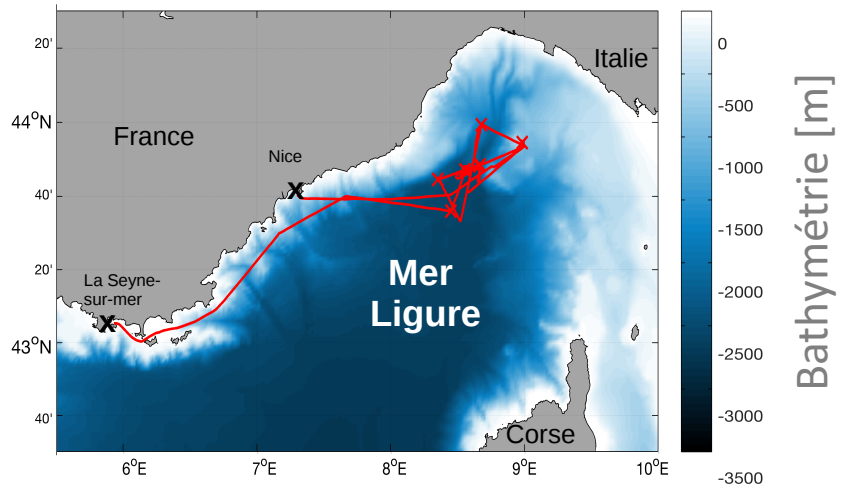
- Topographie complexe
- Instabilités et interactions courants-îles ⟶ forte activité mésoéchelle

- Campagne OUTPACE (160°E – 150°O) [Moutin & Bonnet, 2015]
  - 18 Fév – 3 Avr 2015
  - Eaux Mélanésiennes assez riches
  - Eaux du gyre plutôt pauvres

  } Gradient oligotrophique

- Campagne Bifurcation (Mer de Corail) [Maes, 2012]
  - 1 – 15 Sept 2012

Mer Ligure (Méditerranée occidentale)

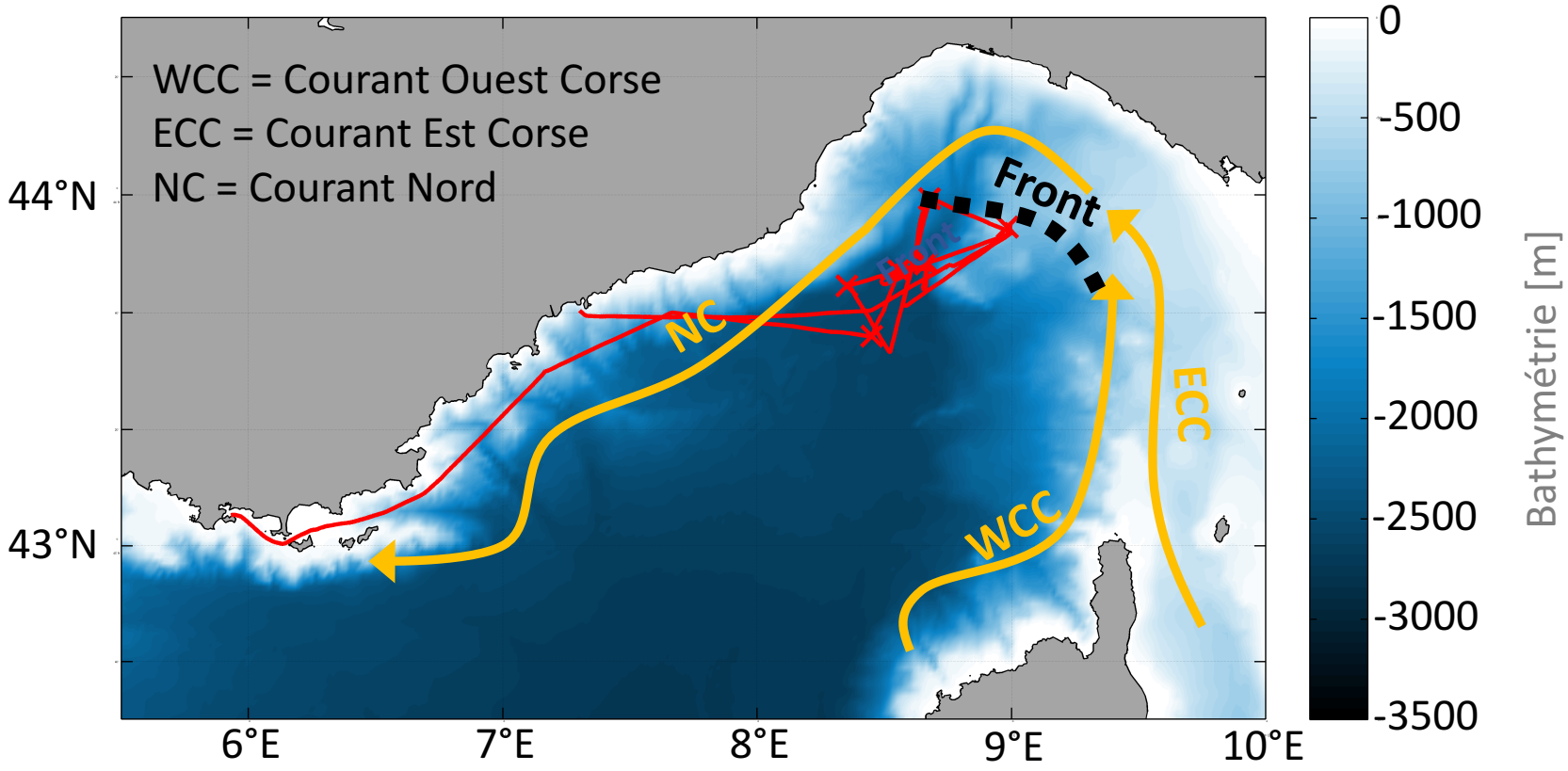


- Région oligotrophique
- Blooms au printemps et en automne
- Sanctuaire pour mammifères marins

- Campagne OSCAHR [Doglioli, 2015]
  - 29 Oct – 6 Nov 2015
  - Stratégie adaptative pour cibler une structure cyclonique

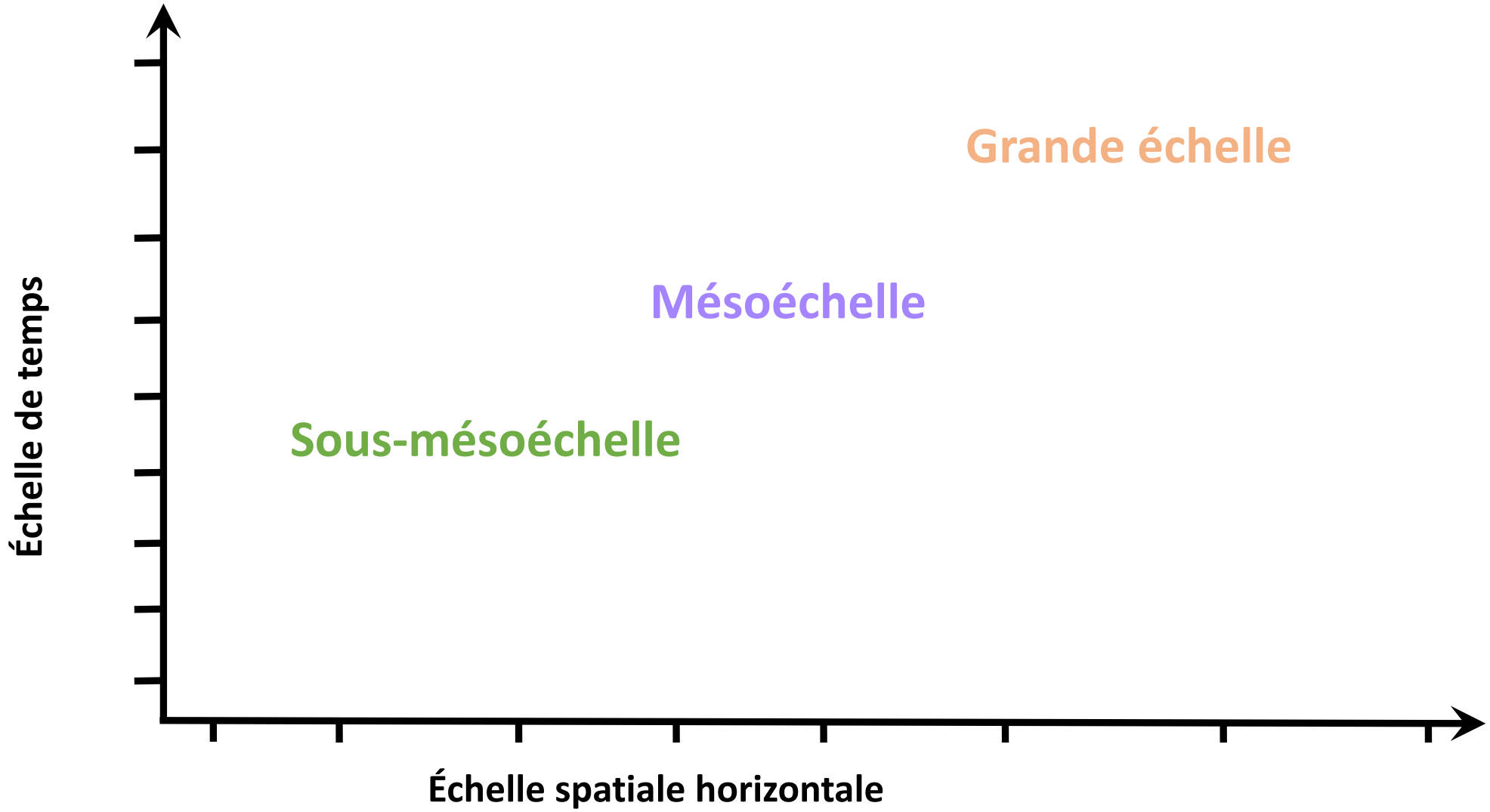
Zone d'étude II

La mer Ligure



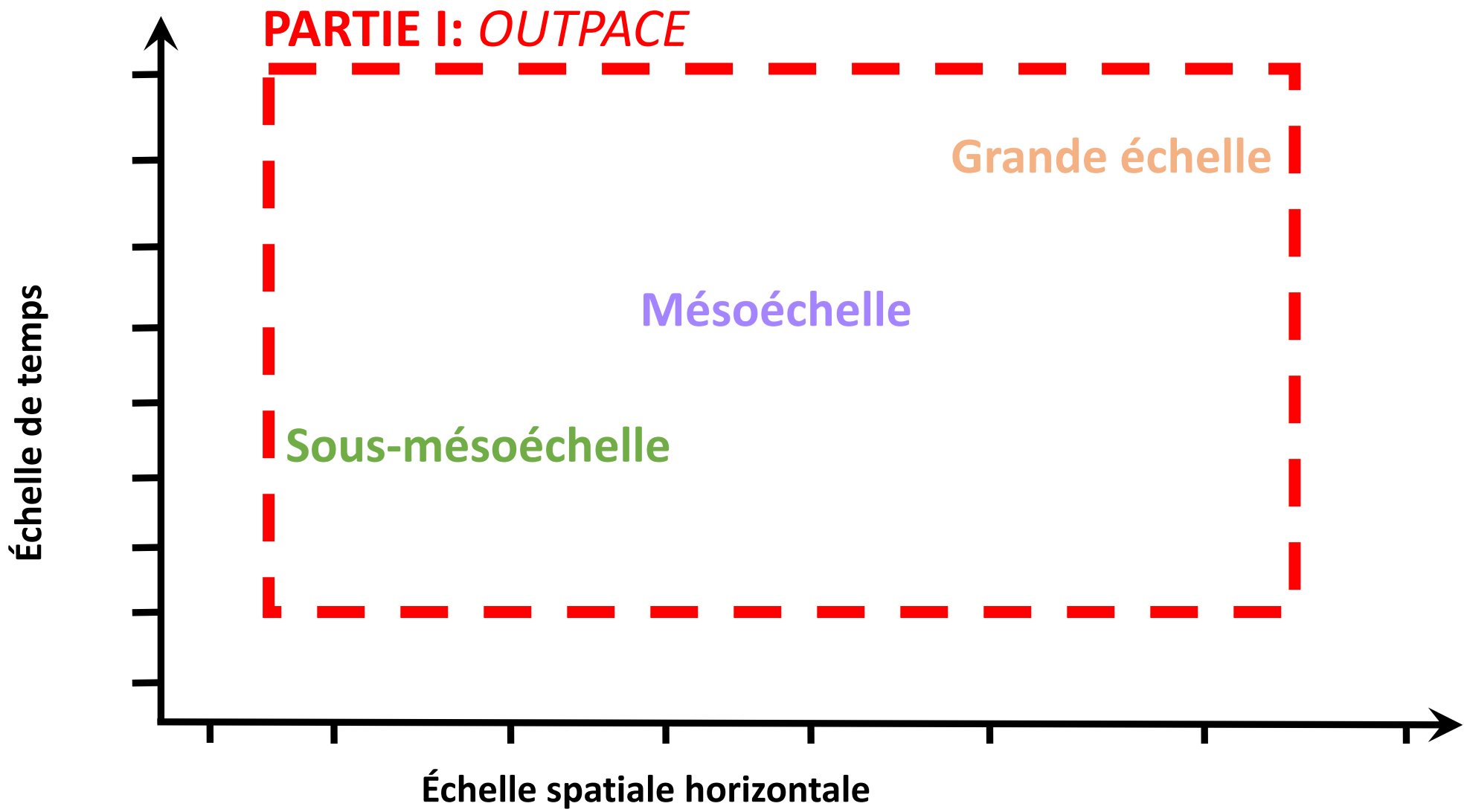
- Circulation cyclonique quasi-permanente
- Système frontal qui sépare eaux côtières et hauturières *[Goffart et al., 1995]*

Plan



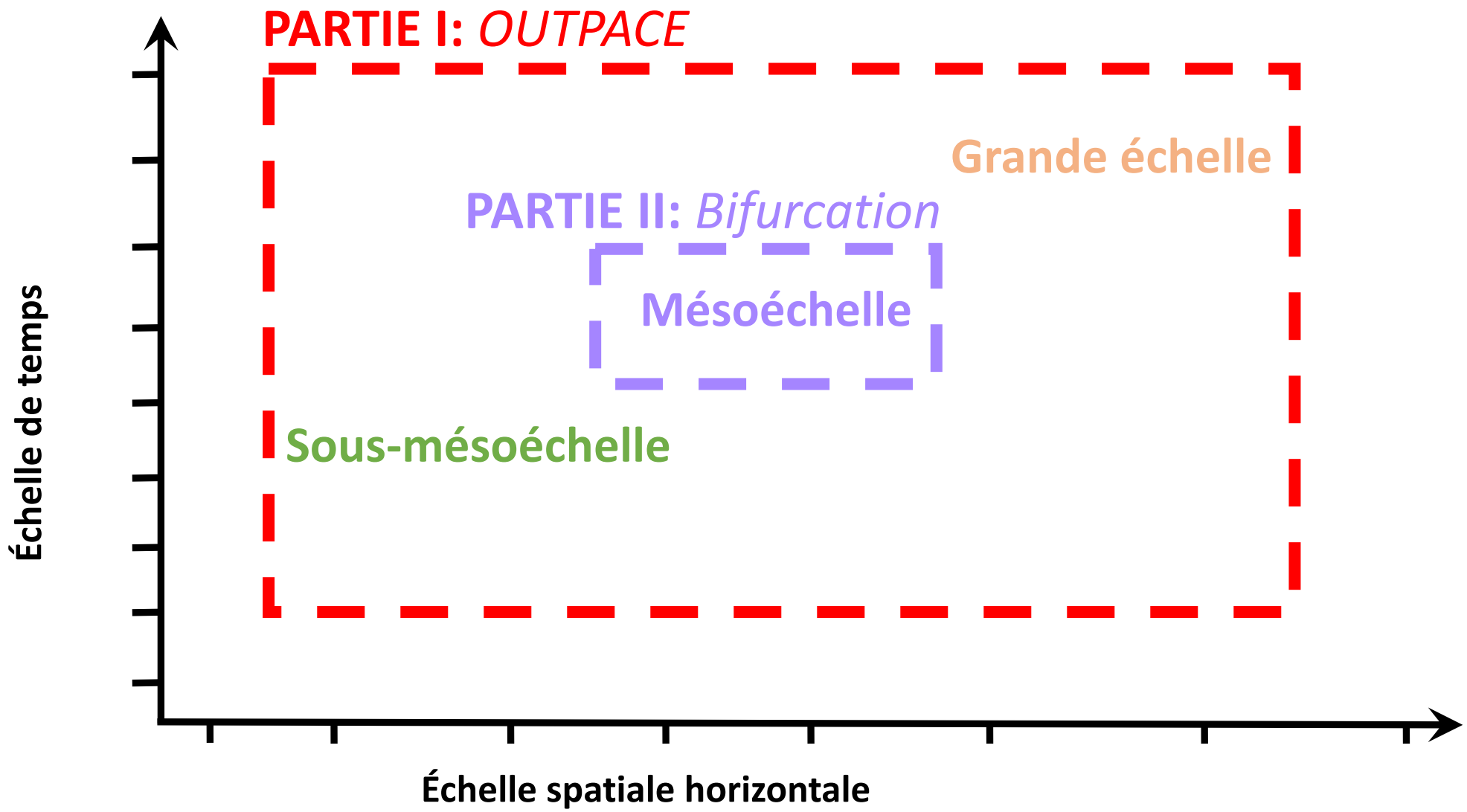
[D'après Dickey 1991, 2003]

Plan



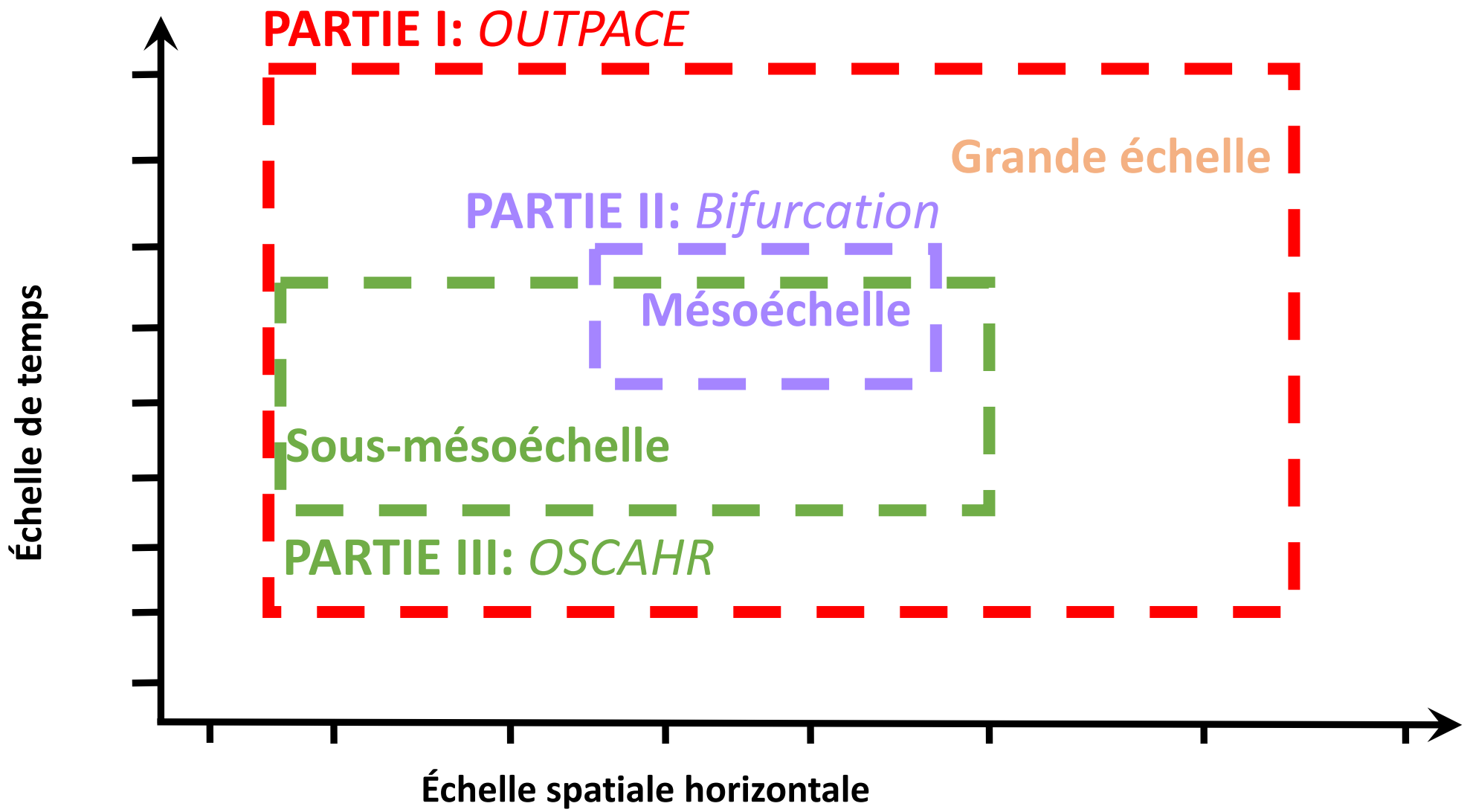
[D'après Dickey 1991, 2003]

Plan



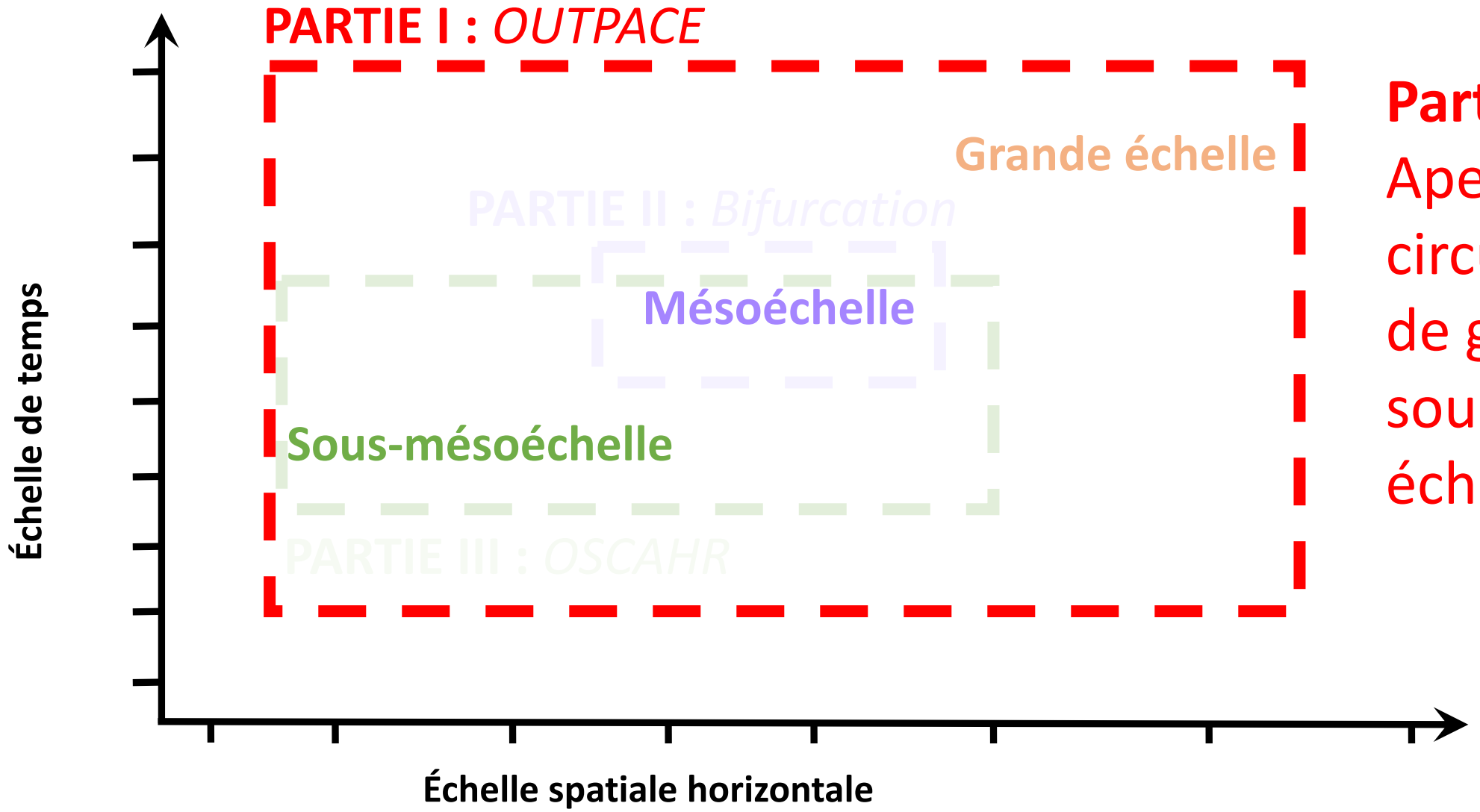
[D'après Dickey 1991, 2003]

Plan



[D'après Dickey 1991, 2003]

Plan



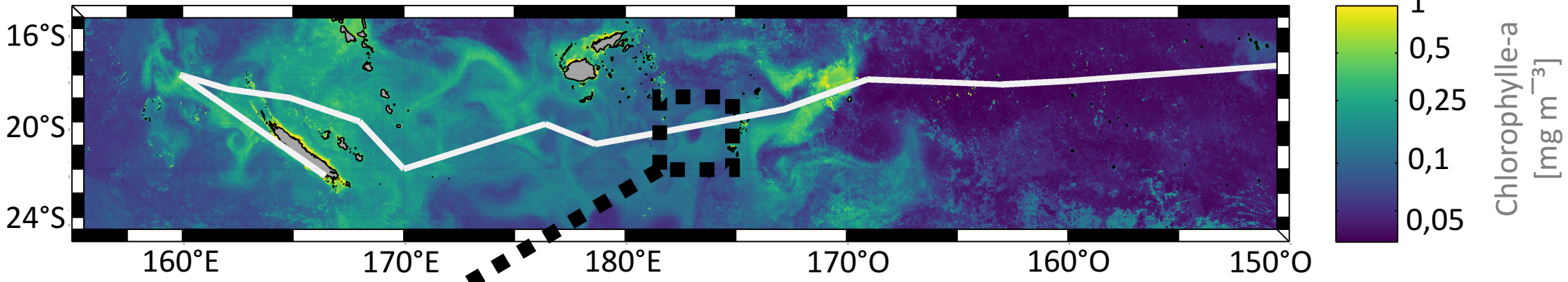
Partie I :
Aperçu des circulations de grande à sous-méso-échelle

[D'après Dickey 1991, 2003]

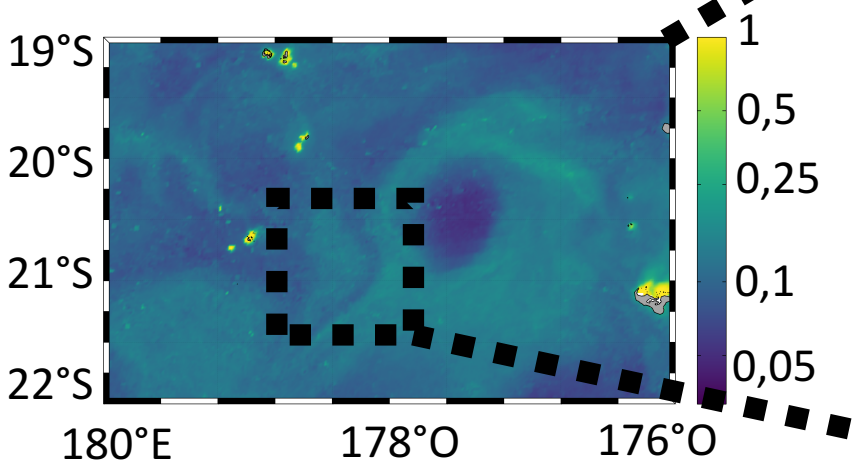
Partie I : Grande → sous-mésoéchelle

Un aperçu par satellite…

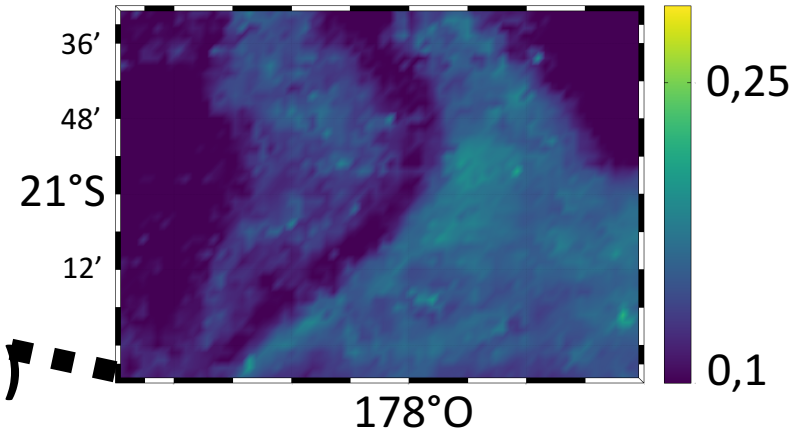
Grande (>100 km)



Mésoéchelle (~10-100 km)



… et sous-mésoéchelle (1-10 km)



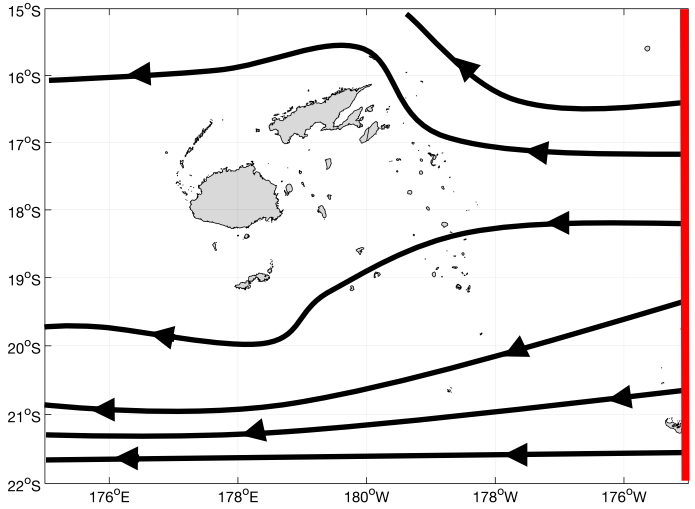
Méthodes

Zone d'étude sur 9000 km → **courants de surface** (1/8° + géostrophie + Ekman + cyclogéostrophie)

[Pujol & Taburet, CLS]

Diagnostics Lagrangiens (transport de particules numériques):

Grande échelle | **Mésoéchelle** | **Sous-mésoéchelle**



Fonction de courant (ARIANE)

[Blanke et al., 1999]

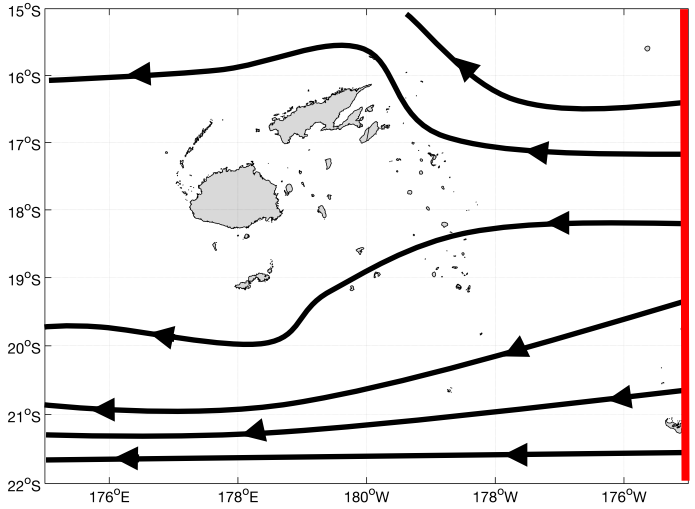
Méthodes

Zone d'étude sur 9000 km → **courants de surface** (1/8° + géostrophie + Ekman + cyclogéostrophie)

[Pujol & Taburet, CLS]

Diagnostics Lagrangiens (transport de particules numériques):

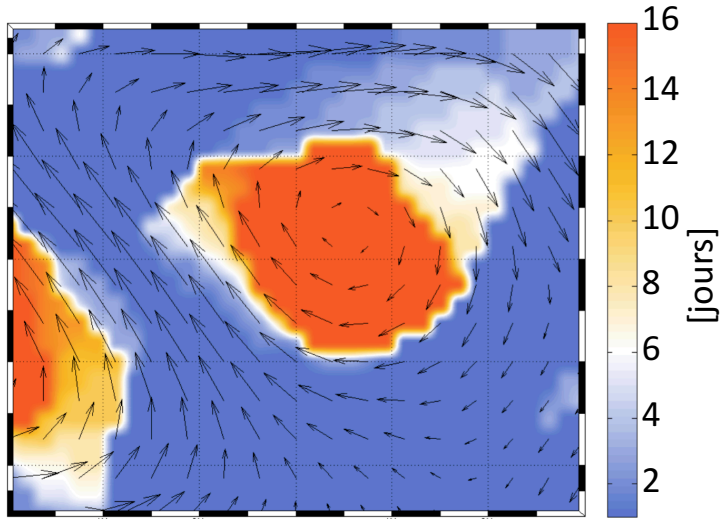
Grande échelle



Fonction de courant (ARIANE)

[Blanke et al., 1999]

Mésoéchelle



Paramètre de rétention

[d'Ovidio et al., 2013]

Sous-mésoéchelle

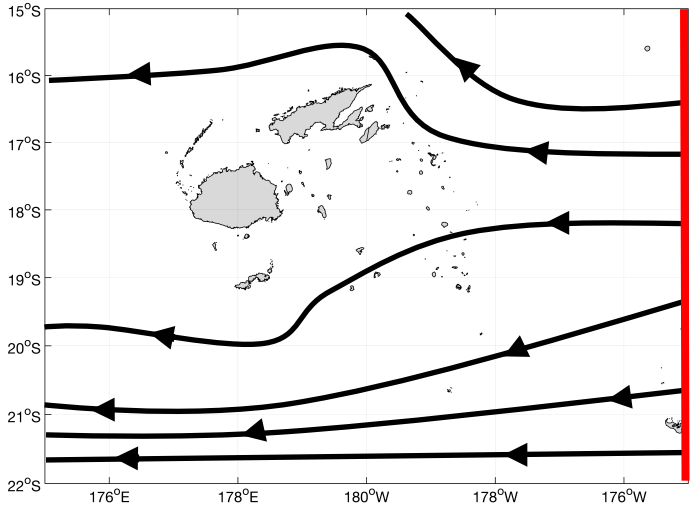
Méthodes

Zone d'étude sur 9000 km → **courants de surface** (1/8° + géostrophie + Ekman + cyclogéostrophie)

[Pujol & Taburet, CLS]

Diagnostics Lagrangiens (transport de particules numériques):

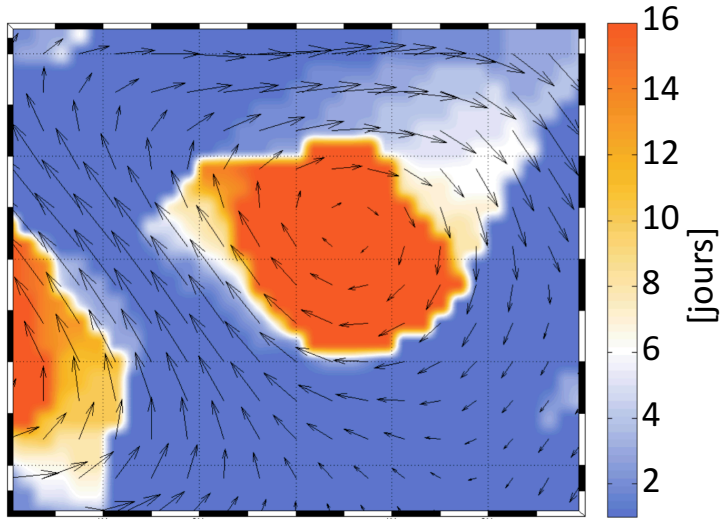
Grande échelle



Fonction de courant (ARIANE)

[Blanke et al., 1999]

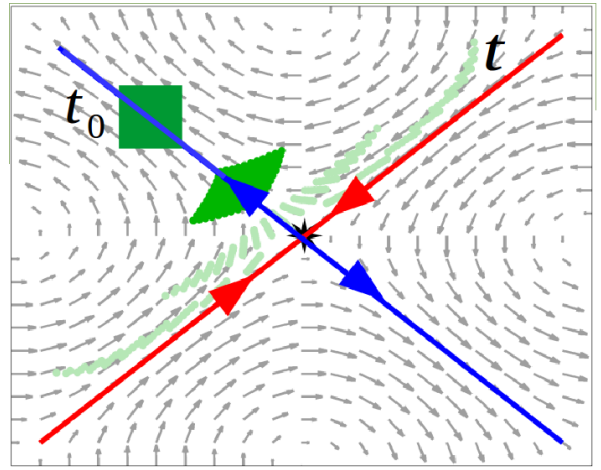
Mésoéchelle



Paramètre de rétention

[d'Ovidio et al., 2013]

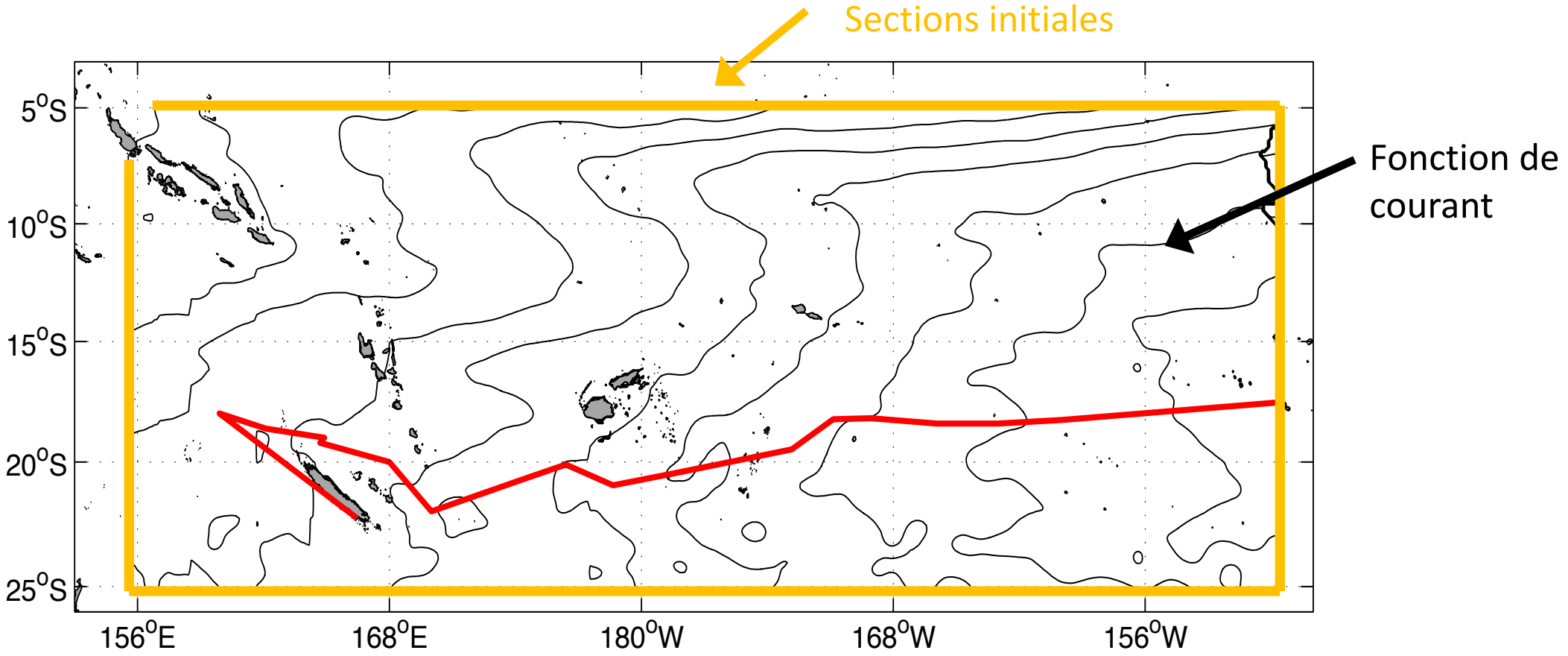
Sous-mésoéchelle



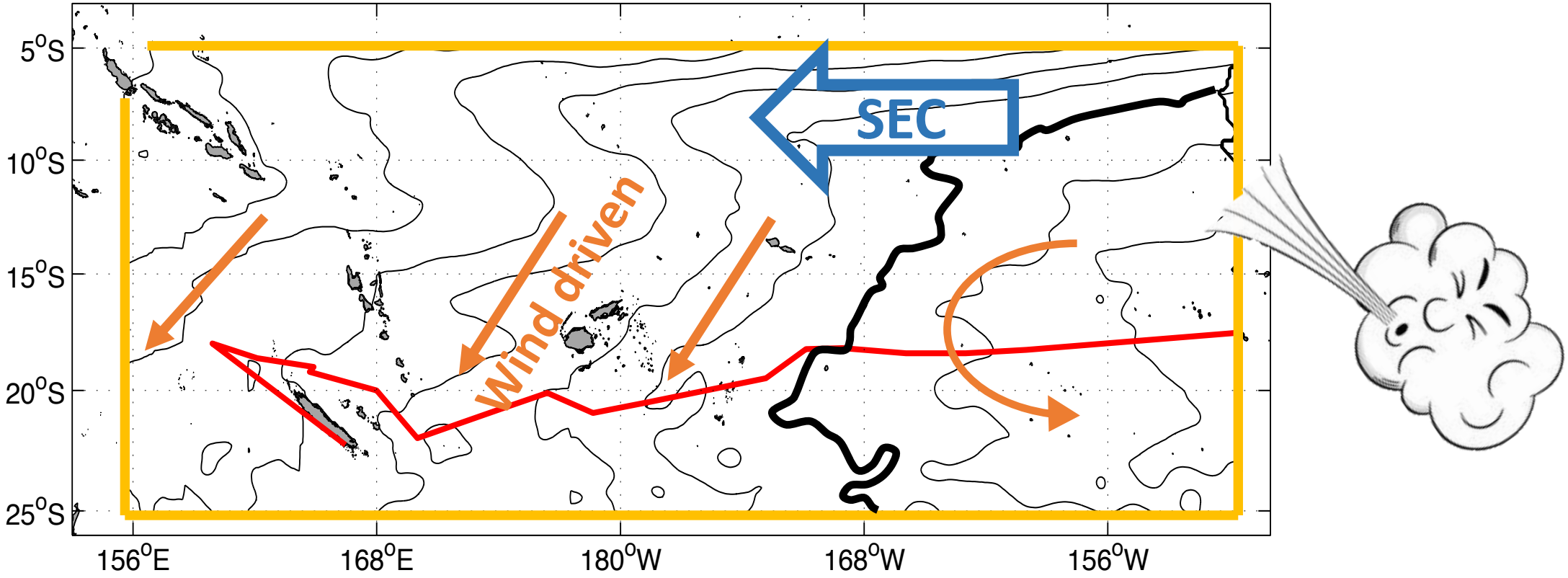
Barrière physique (FSLE)

[d'Ovidio et al., 2013]

Transport grande échelle

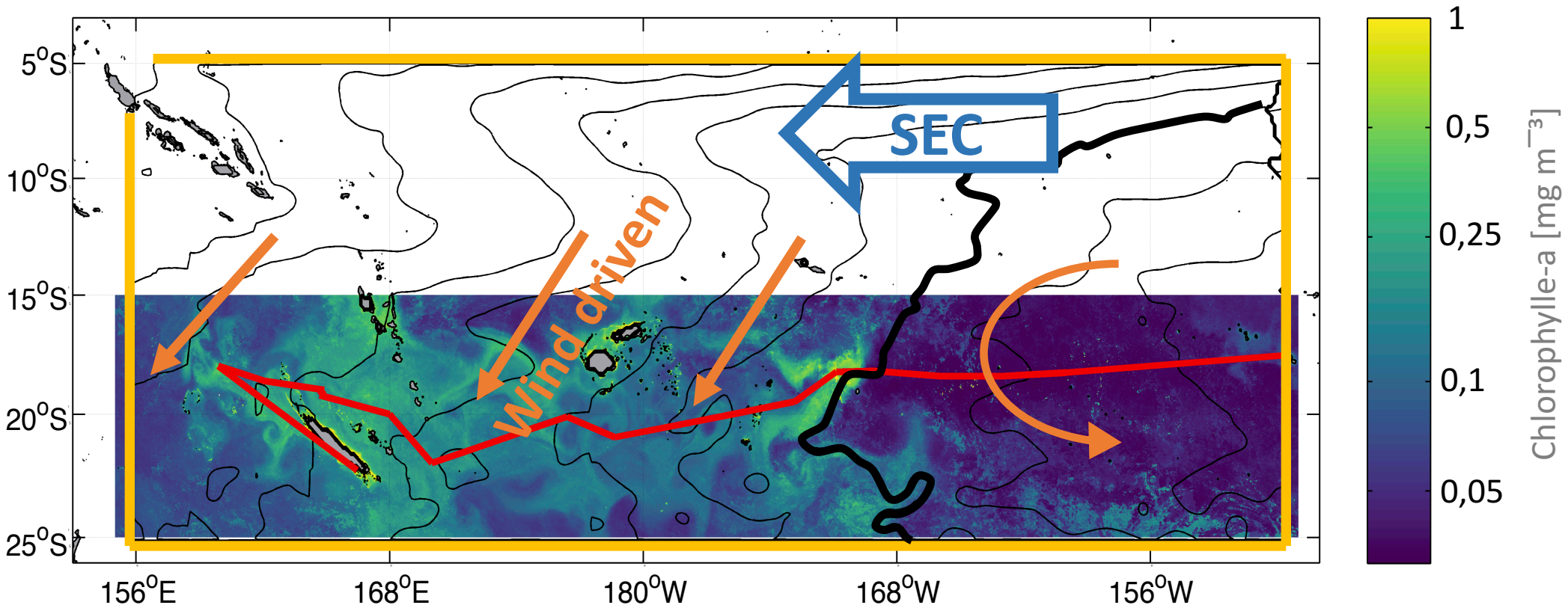


Transport grande échelle



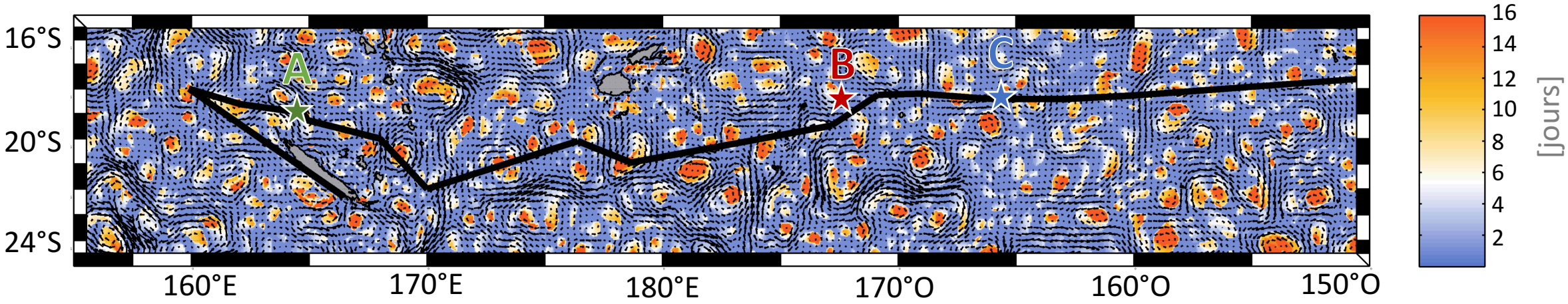
- Transport grande échelle vers le **Sud-Ouest**

Transport grande échelle



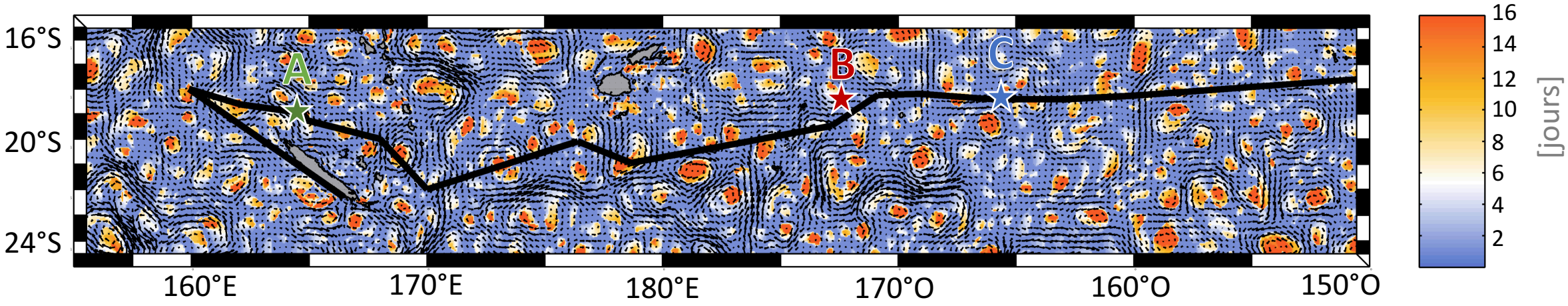
- Transport grande échelle vers le **Sud-Ouest**
- Transport grande échelle ⟷ **séparation eaux Mélanésiennes et gyre**

Transport mésoéchelle

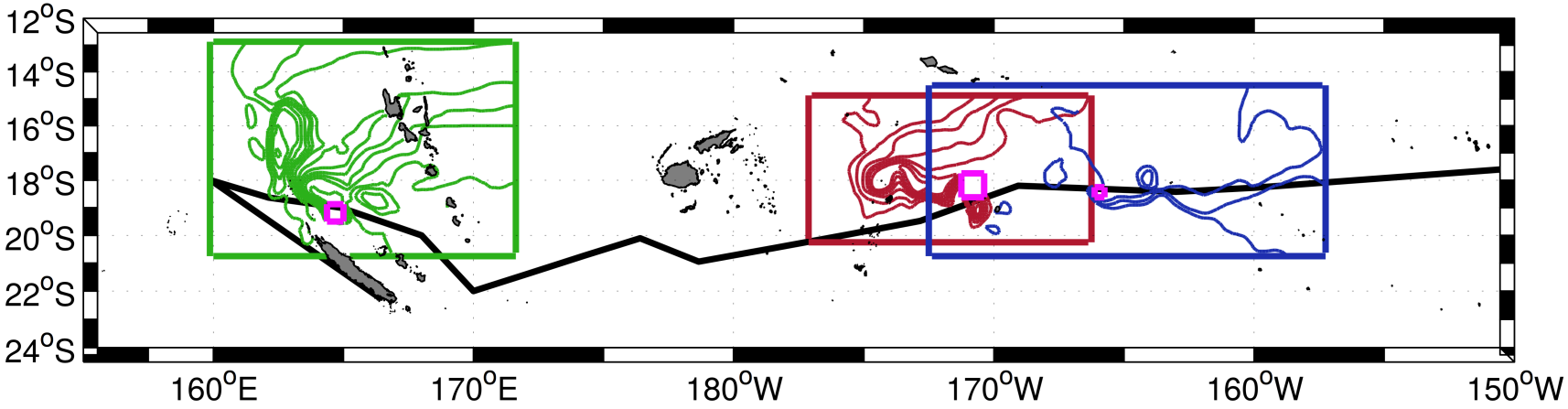


- Structures mésoéchelles cohérentes <u>mais</u> échantillonnage biogéochimique épars

Transport mésoéchelle



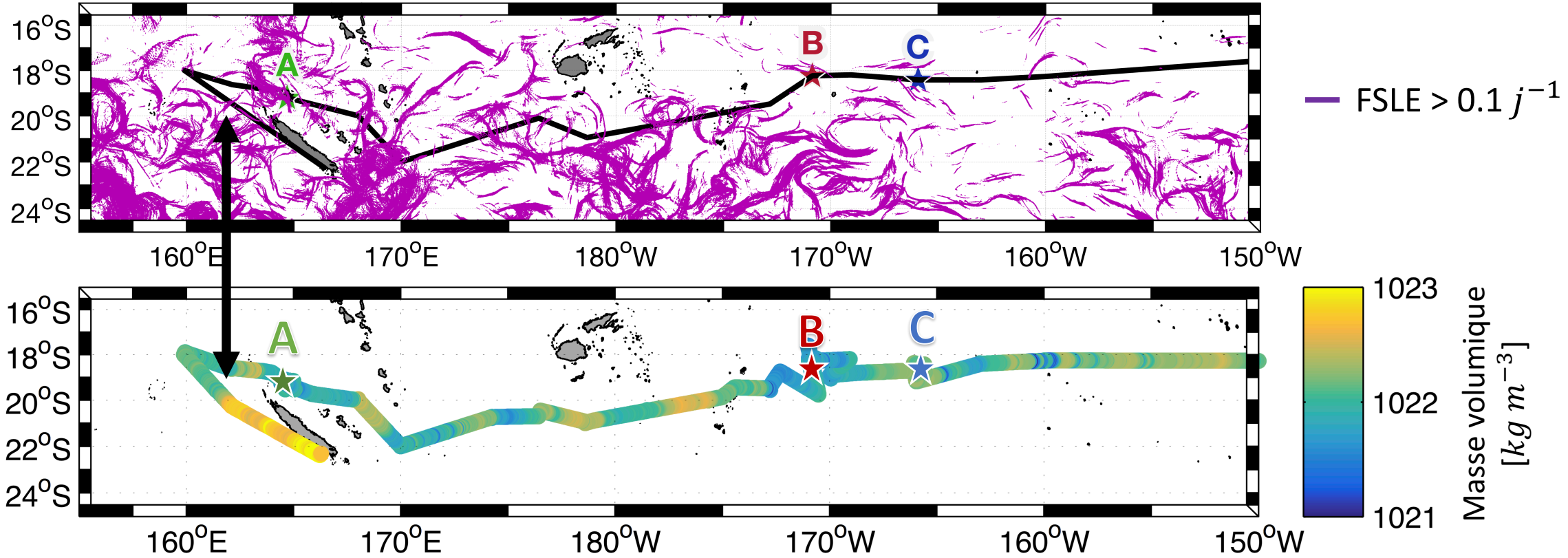
- Structures mésoéchelles cohérentes <u>mais</u> échantillonnage biogéochimique éparse



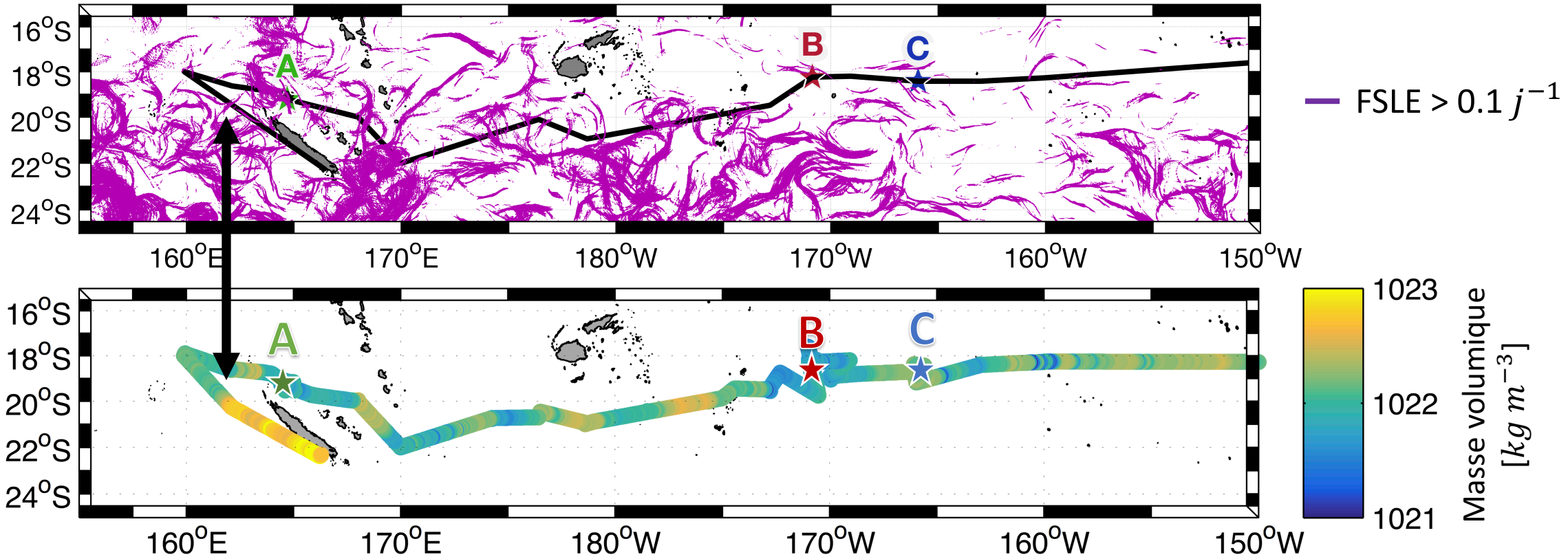
- Trajectoires mésoéchelles **contre-intuitives** → influence sur l'initiation d'un bloom

[de Verneil, Rousselet et al., 2017b]

Structures sous-mésoéchelles



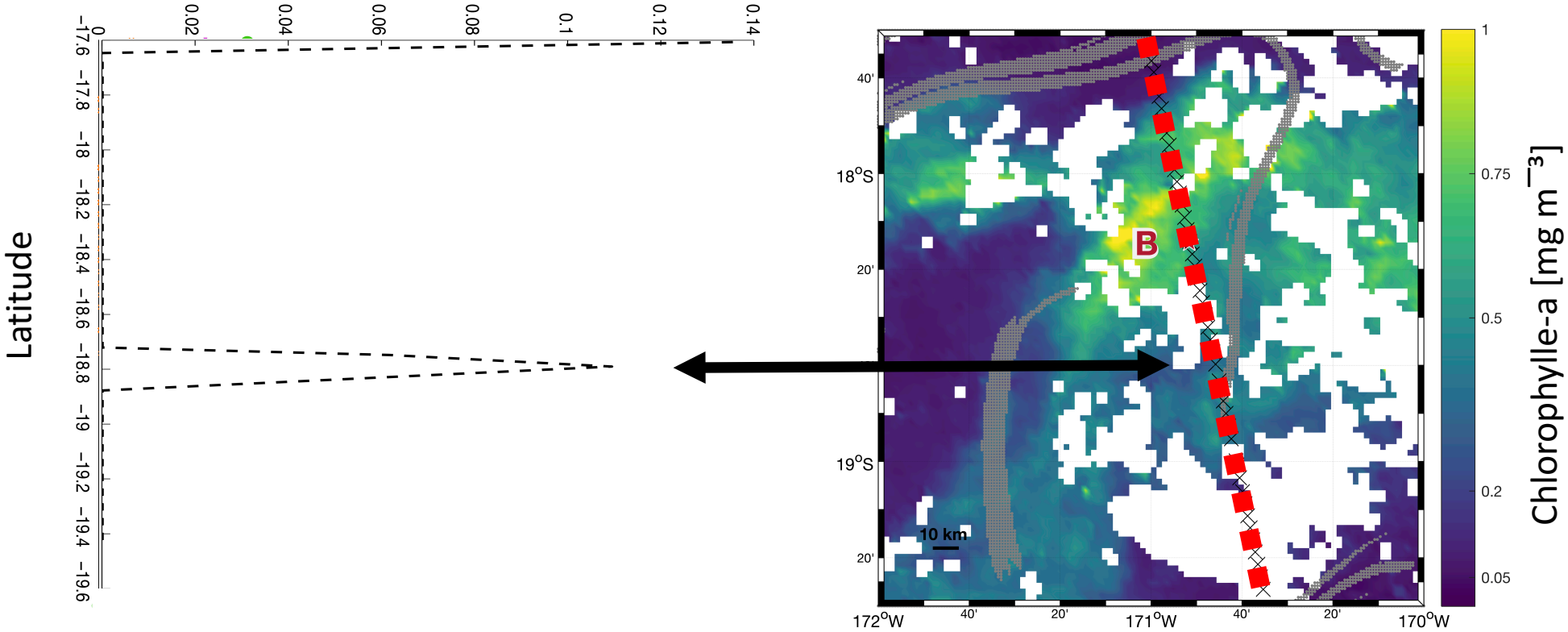
Structures sous-mésoéchelles



- Analyse statistique: **25 %** des «forts gradients» en masse volumique correspondent à la présence d'un front

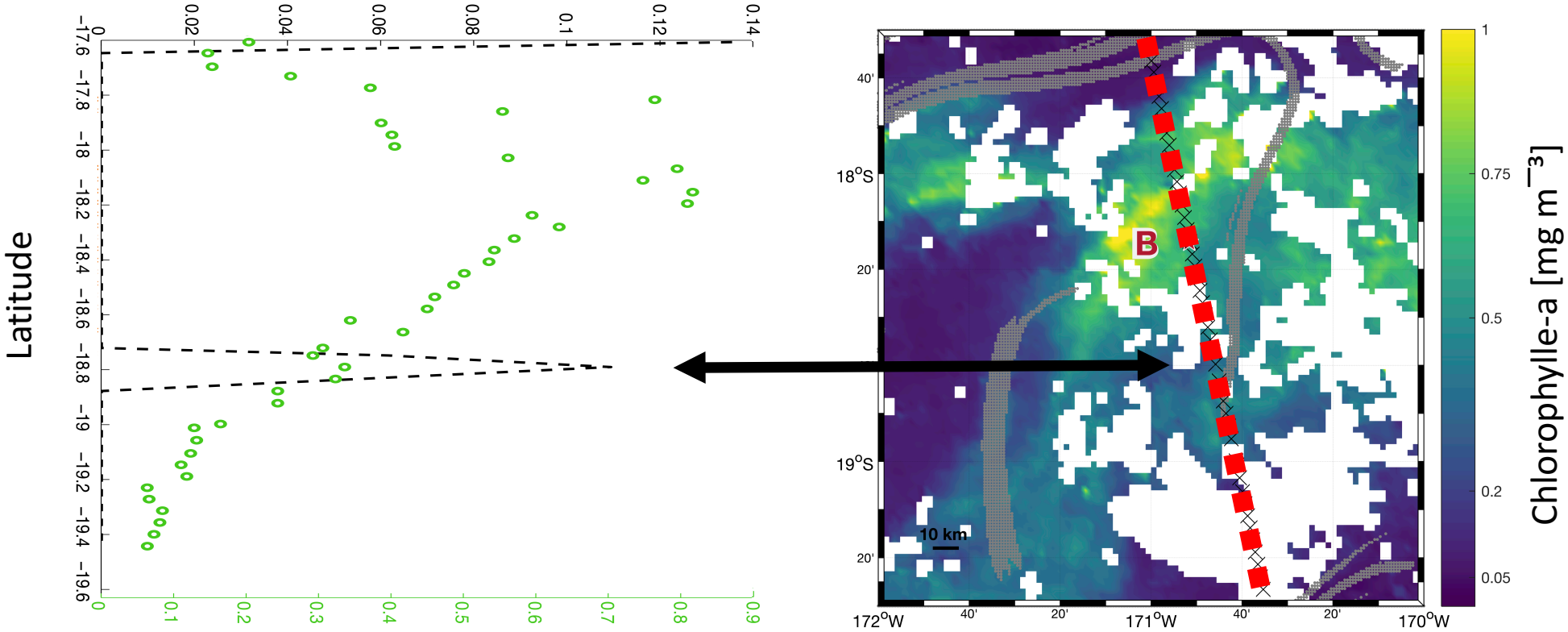
Distribution sous-mésoéchelle du phytoplancton

Barrières physiques [FSLE, j^{-1}]



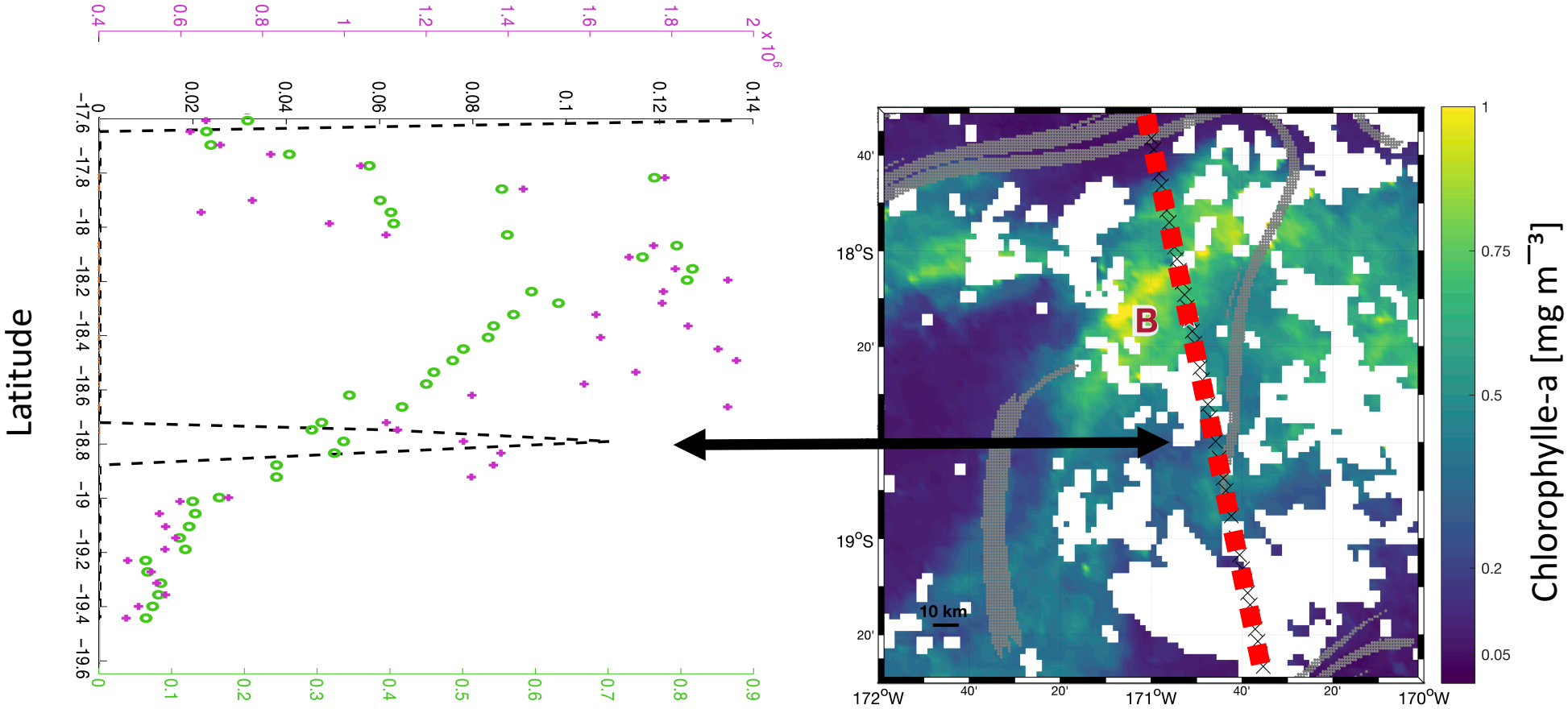
Distribution sous-mésoéchelle du phytoplancton

Barrières physiques [FSLE, j^{-1}] et échantillonnage haute-fréquence en surface de [**chlorophylle-a**, $mg\ m^{-3}$],



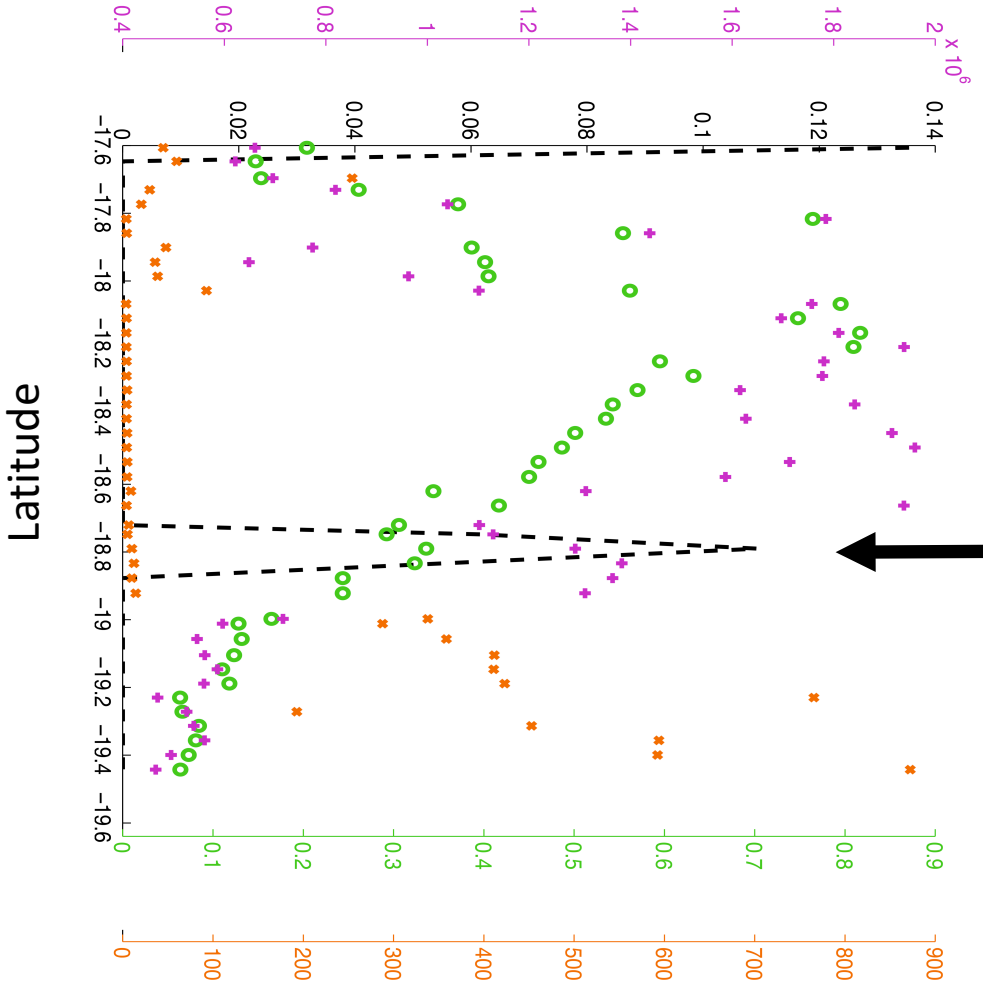
Distribution sous-mésoéchelle du phytoplancton

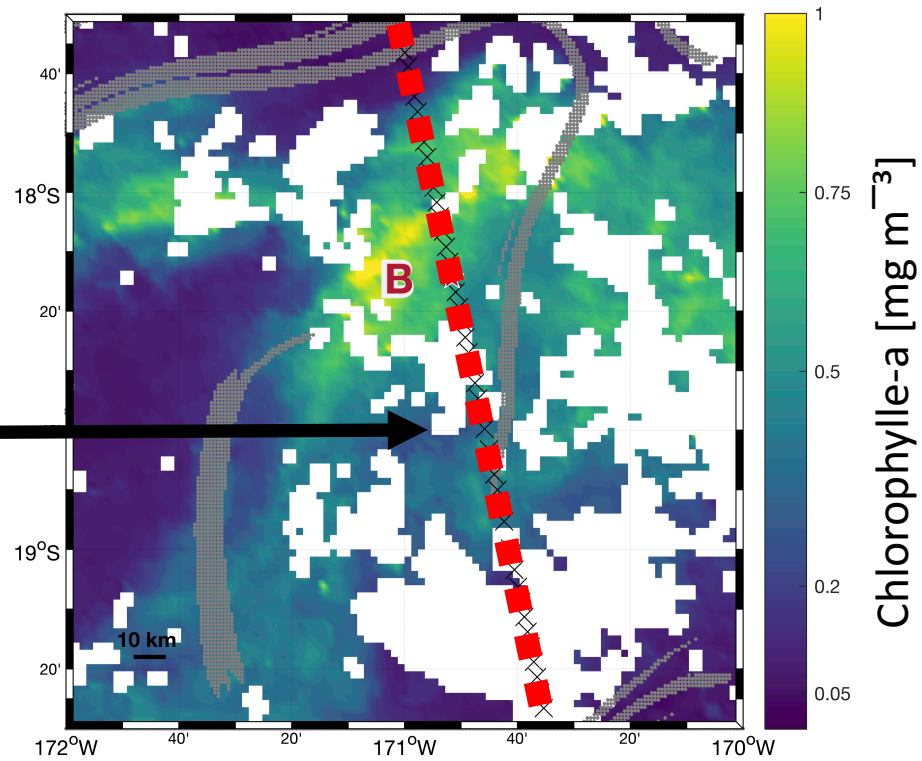
Barrières physiques [FSLE, j^{-1}] et échantillonnage haute-fréquence en surface de [**chlorophylle-a**, $mg\ m^{-3}$], **abondance du phytoplancton** [$nb\ cell$],



Distribution sous-mésoéchelle du phytoplancton

Barrières physiques [FSLE, j^{-1}] et échantillonnage haute-fréquence en surface de [**chlorophylle-a**, $mg\ m^{-3}$], **abondance du phytoplancton** [$nb\ cell$], temps de renouvellement du Phosphate Inorganique Dissous [**DIP**, $heures$].





Deux régions contrastées biogéochimiquement et biologiquement, séparées par un front physique détecté par les FSLE.

Conclusions - Partie I

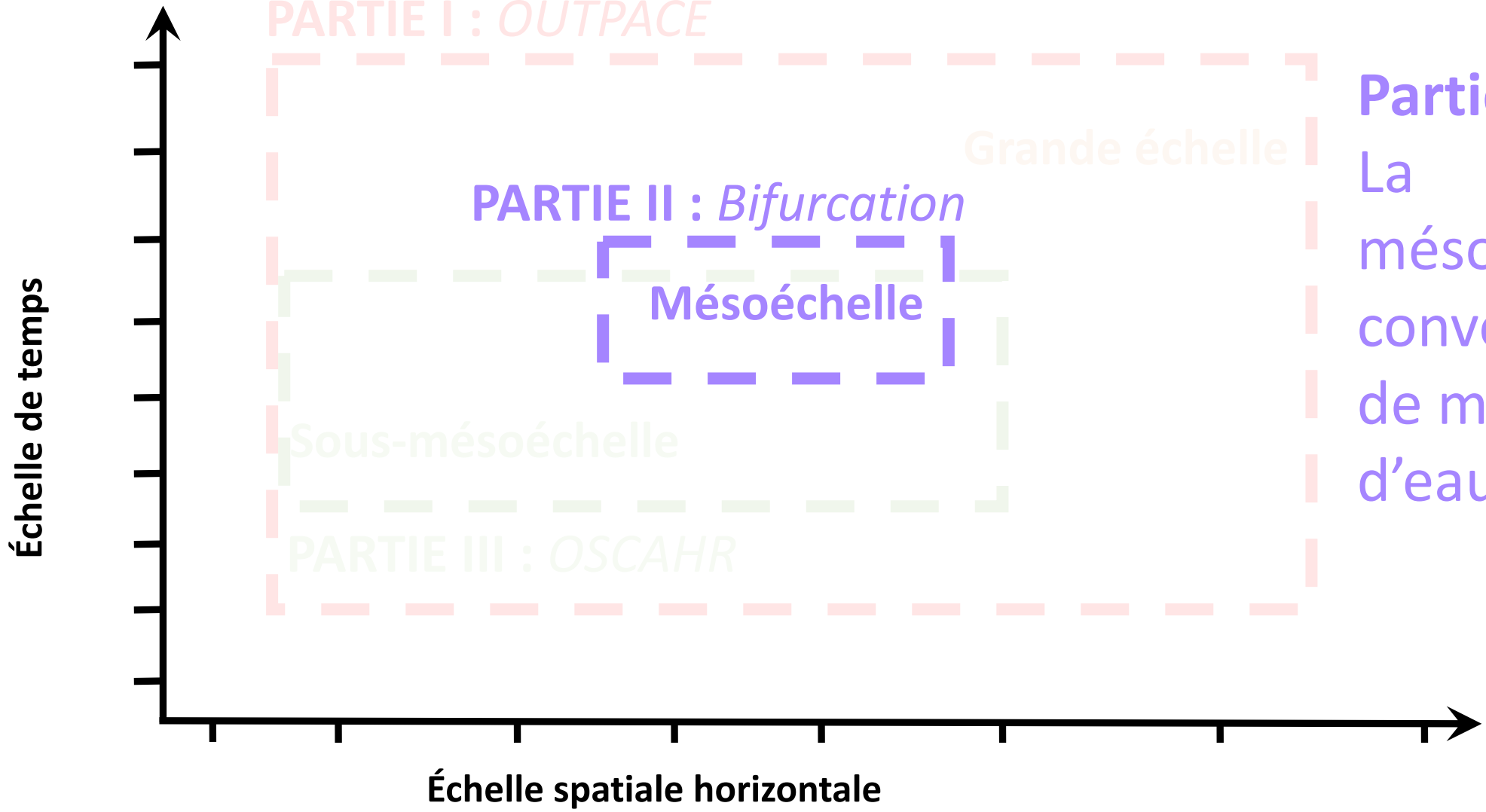
[Rousselet et al., 2018, *Biogeosciences*]

- Identification d'un **transport méridional** (vers le Sud-Ouest) dû au forçage du vent ➔ séparation entre les eaux du gyre et les eaux Mélanésiennes

- Importance des structures cohérentes ➔ **trajectoires particulières** (i.e. vers l'Est)

- Les **fronts** sous-mésoéchelles influencent la **dispersion des traceurs** (SST, SSS, densité…) et la **distribution du phytoplancton** en surface.

Plan

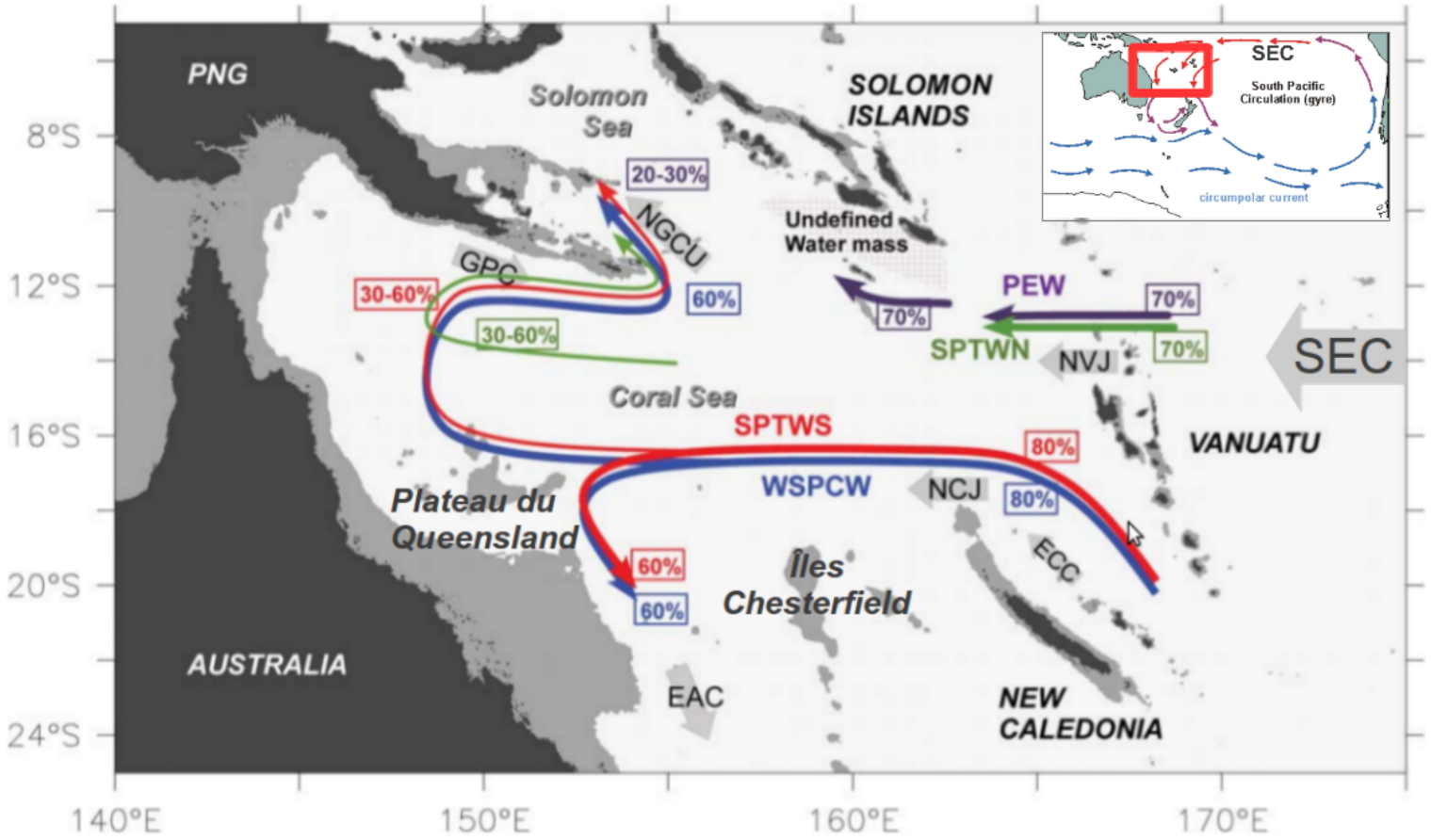


Partie II :
La mésoéchelle, convoyeuse de masses d'eau

[D'après Dickey 1991, 2003]

Partie II : Transport par la mésoéchelle

Autre jeu de données (*Bifurcation,* PI C. Maes) en mer de Corail

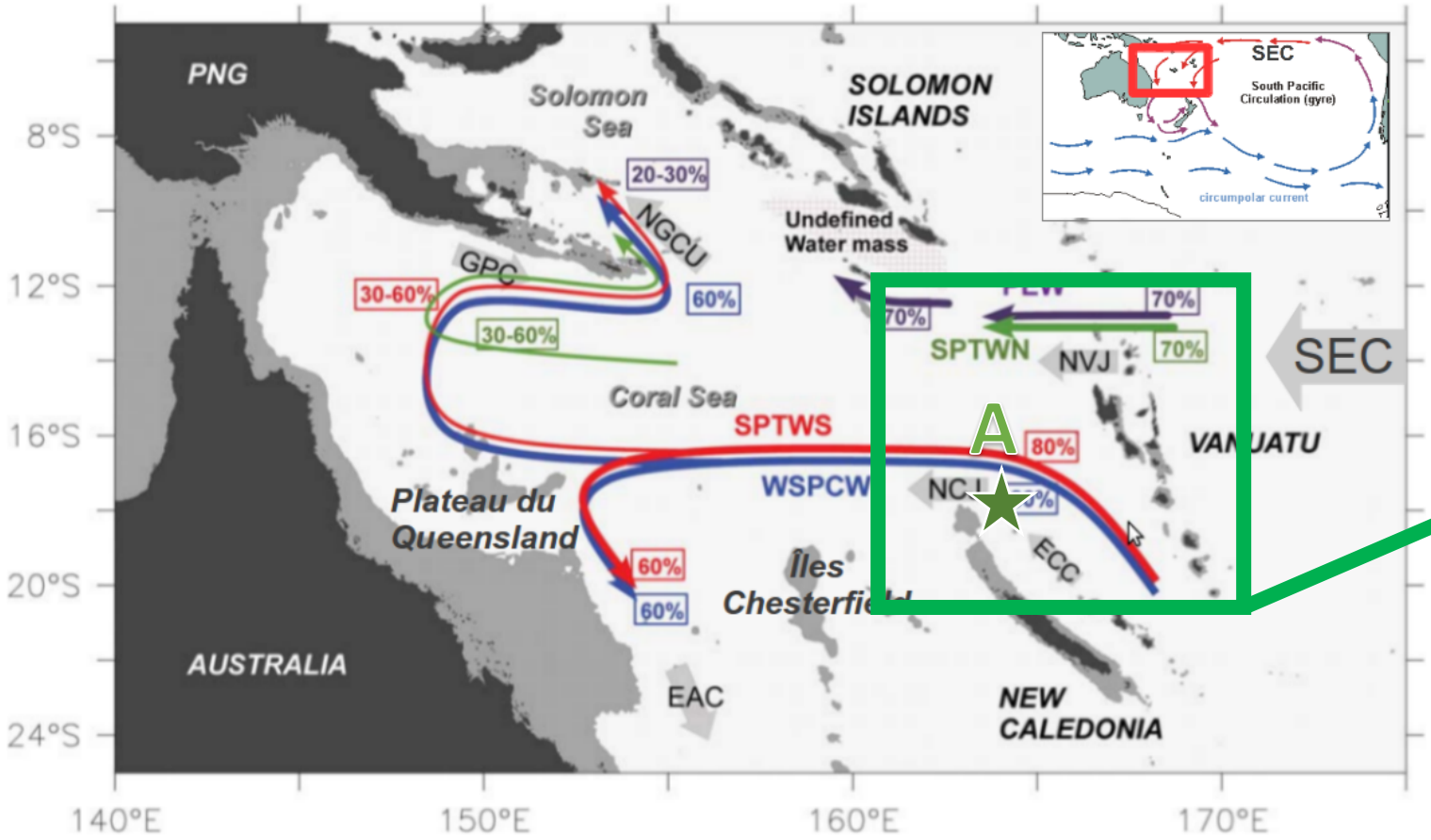


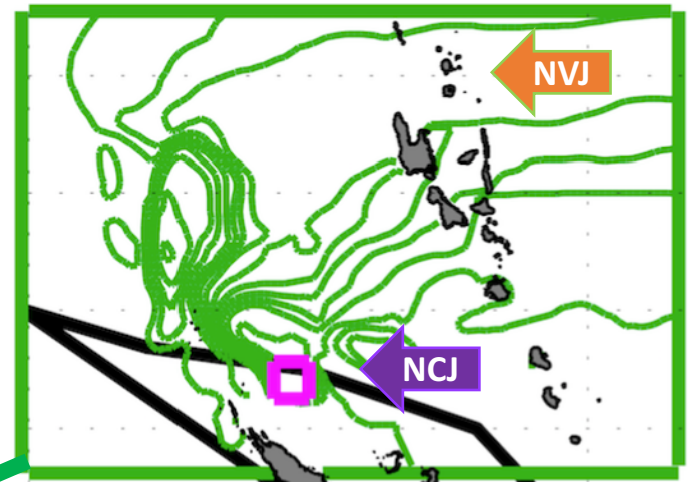
Principales masses d'eau de la thermocline en mer de Corail

[D'après Gasparin et al., 2014]

Partie II : Transport par la mésoéchelle

Autre jeu de données (*Bifurcation,* PI C. Maes) en mer de Corail → **Influence de la mésoéchelle ?**





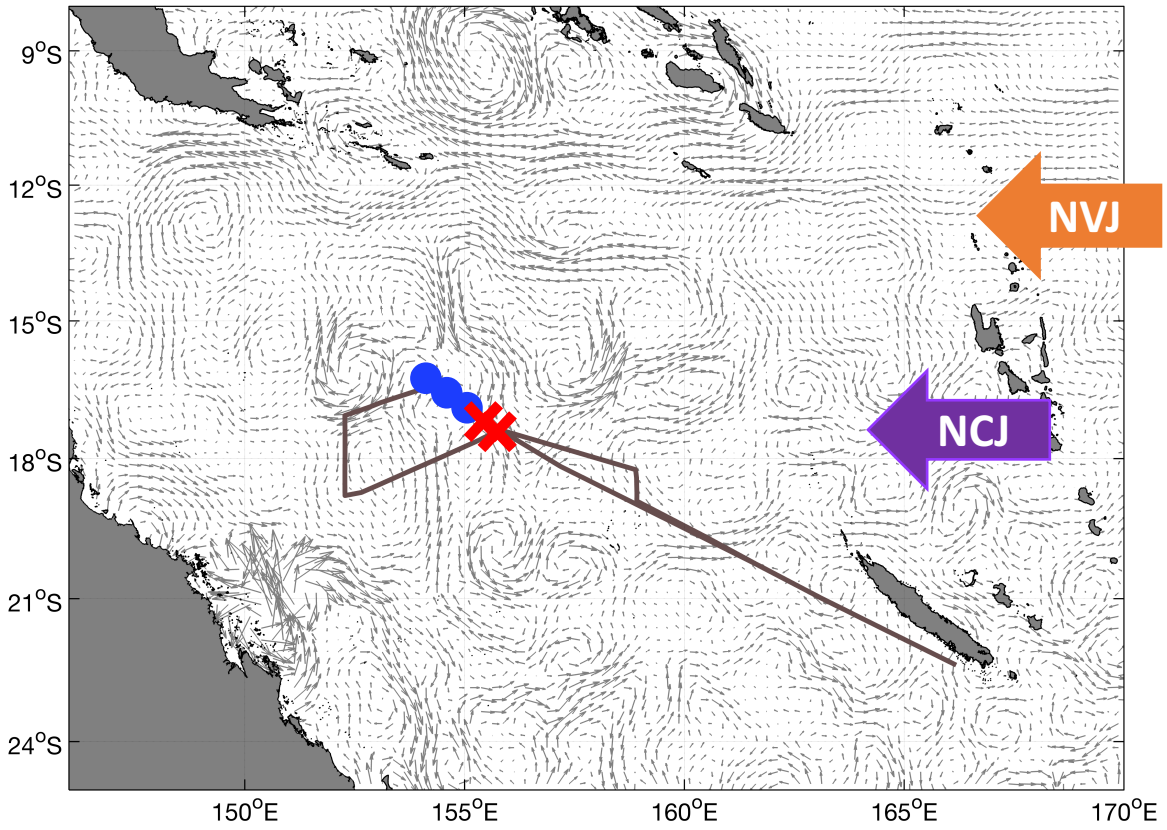
[Rousselet et al., 2018]

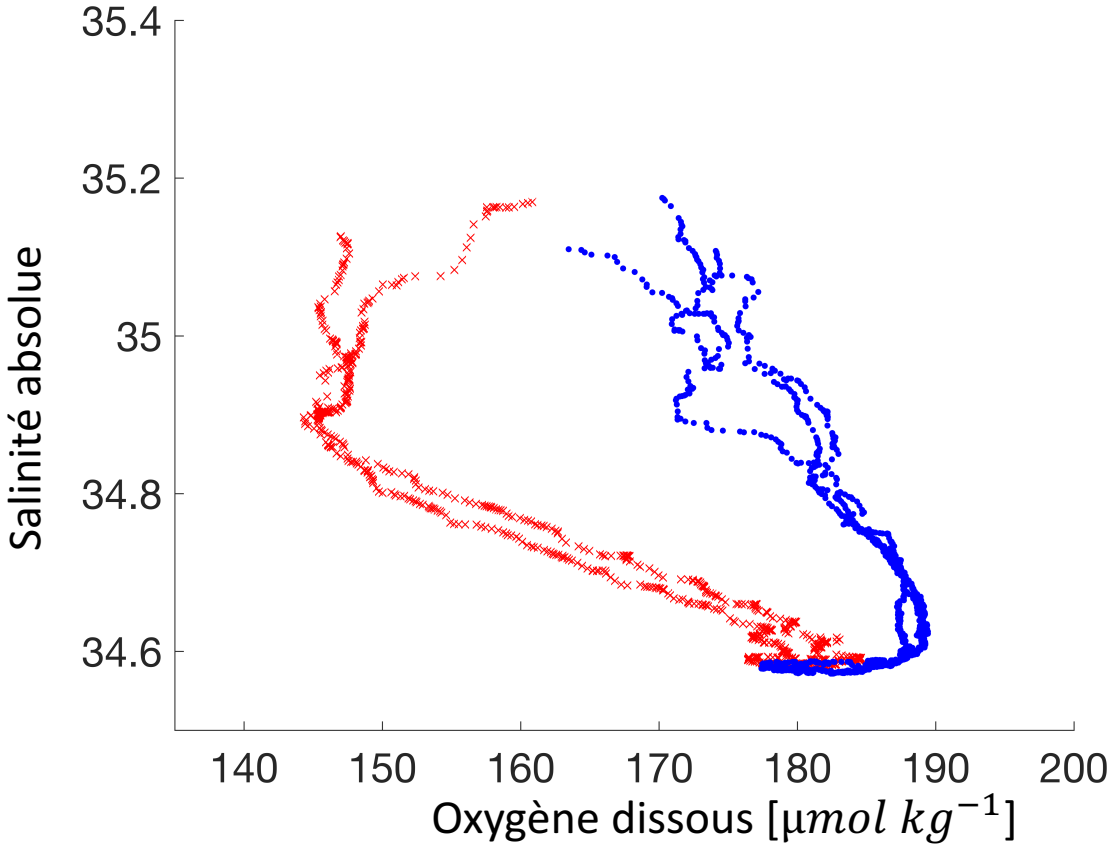
Principales masses d'eau de la thermocline en mer de Corail

[D'après Gasparin et al., 2014]

Analyse des masses d'eau

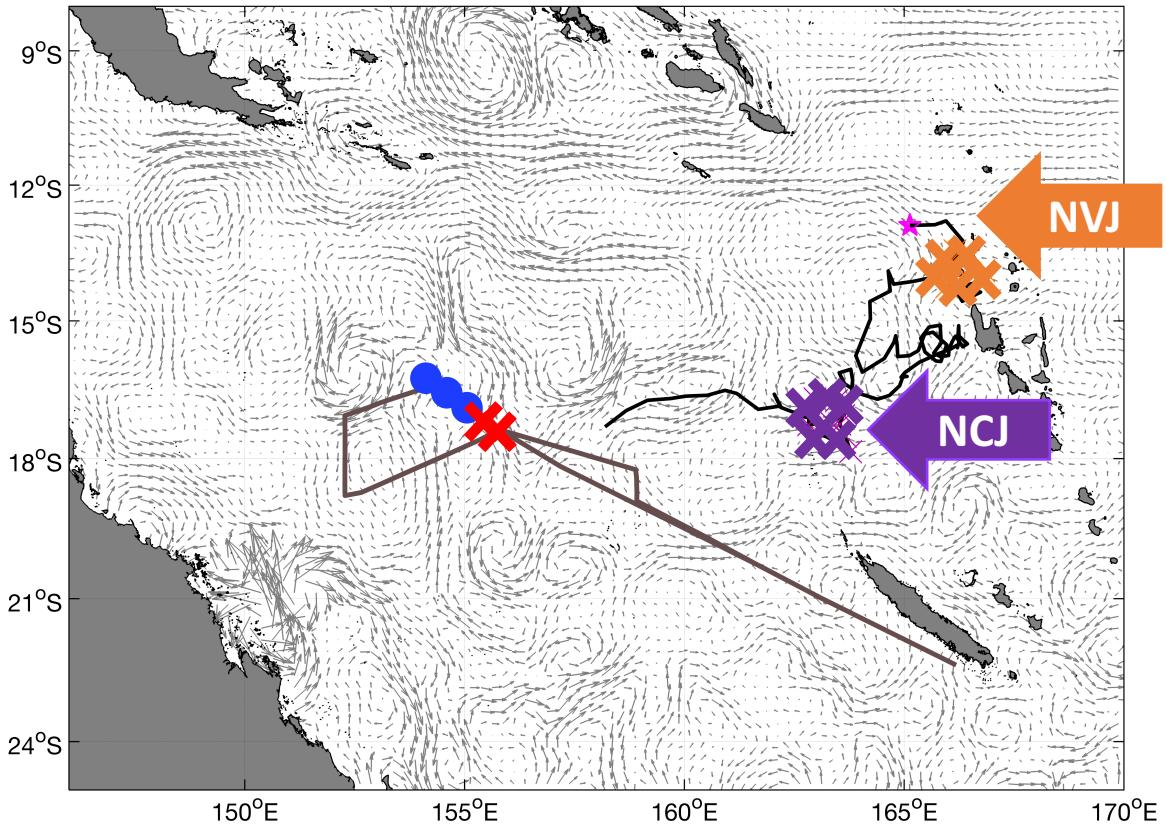
- Caractéristiques différentes au niveau de 2 stations (rouges)

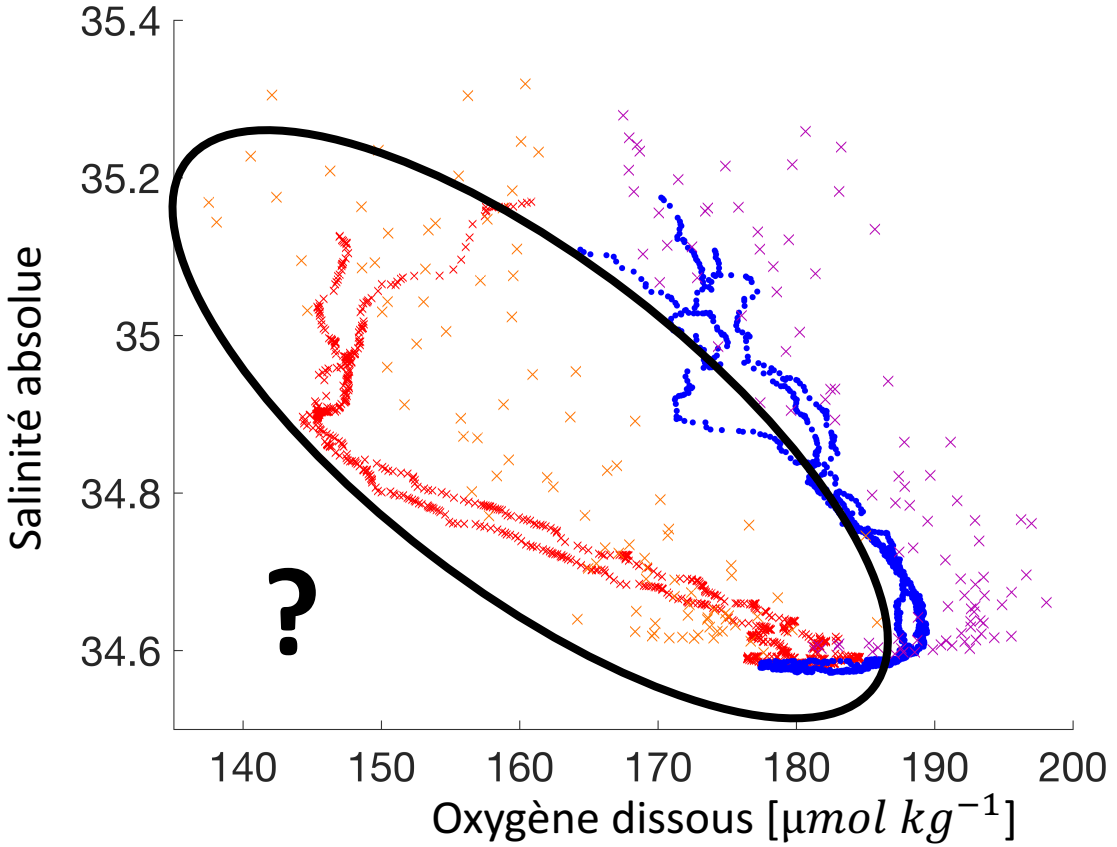




Analyse des masses d'eau

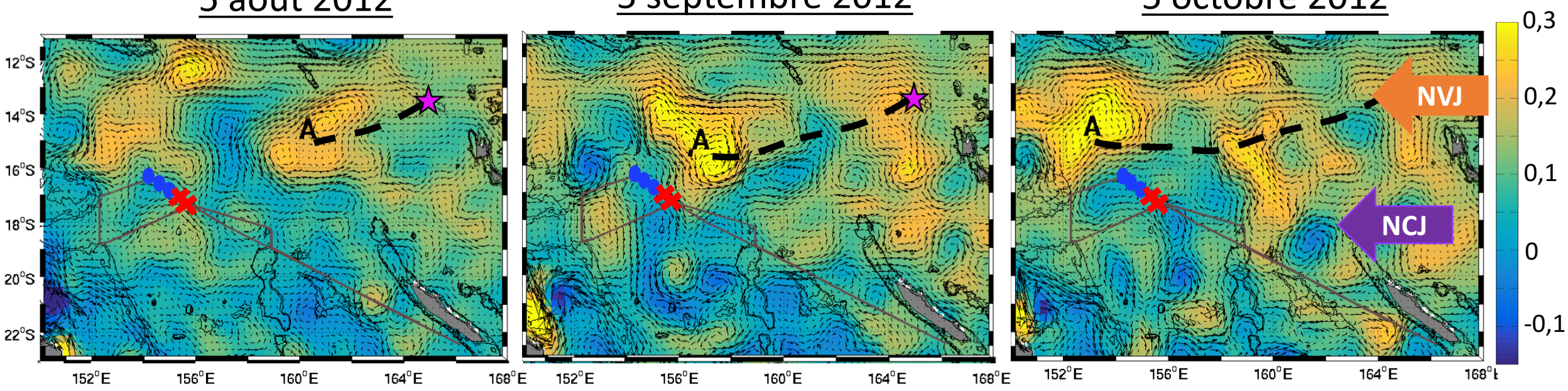
- Caractéristiques différentes au niveau de 2 stations (rouges)
- Profils Argo caractéristiques du **NVJ** et du **NCJ**





Partie II : Transport par la mésoéchelle

Origine de l'intrusion

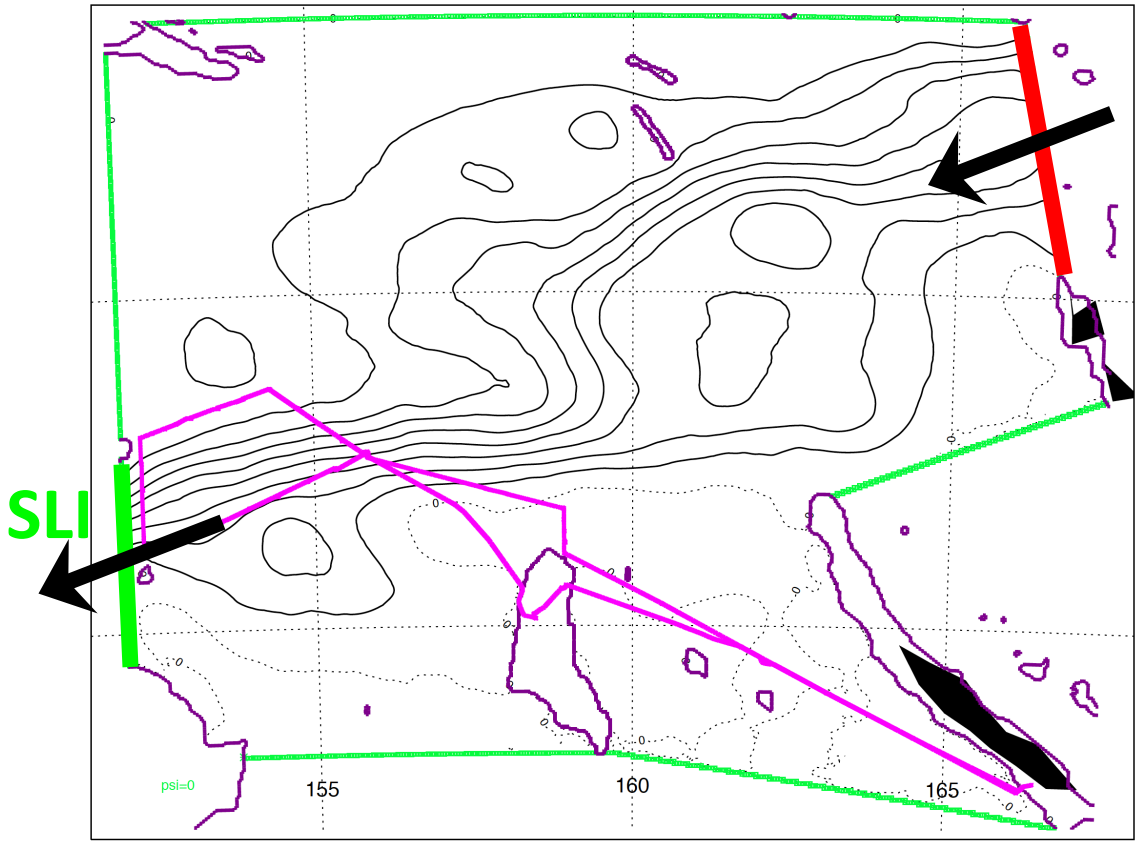


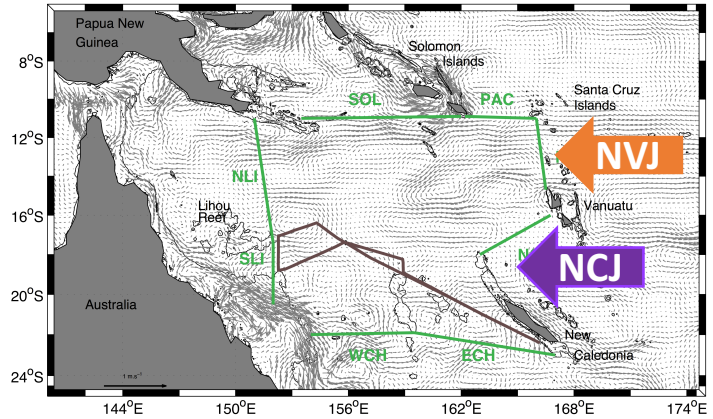
Anomalie de niveau de l'eau [m]

- **Hypothèse: Transport, via une structure mésoéchelle, des eaux du NVJ dans la zone de circulation du NCJ**

Analyse Lagrangienne

- Trajectoires des particules qui traversent la section NVJ puis SLI (2 ans)

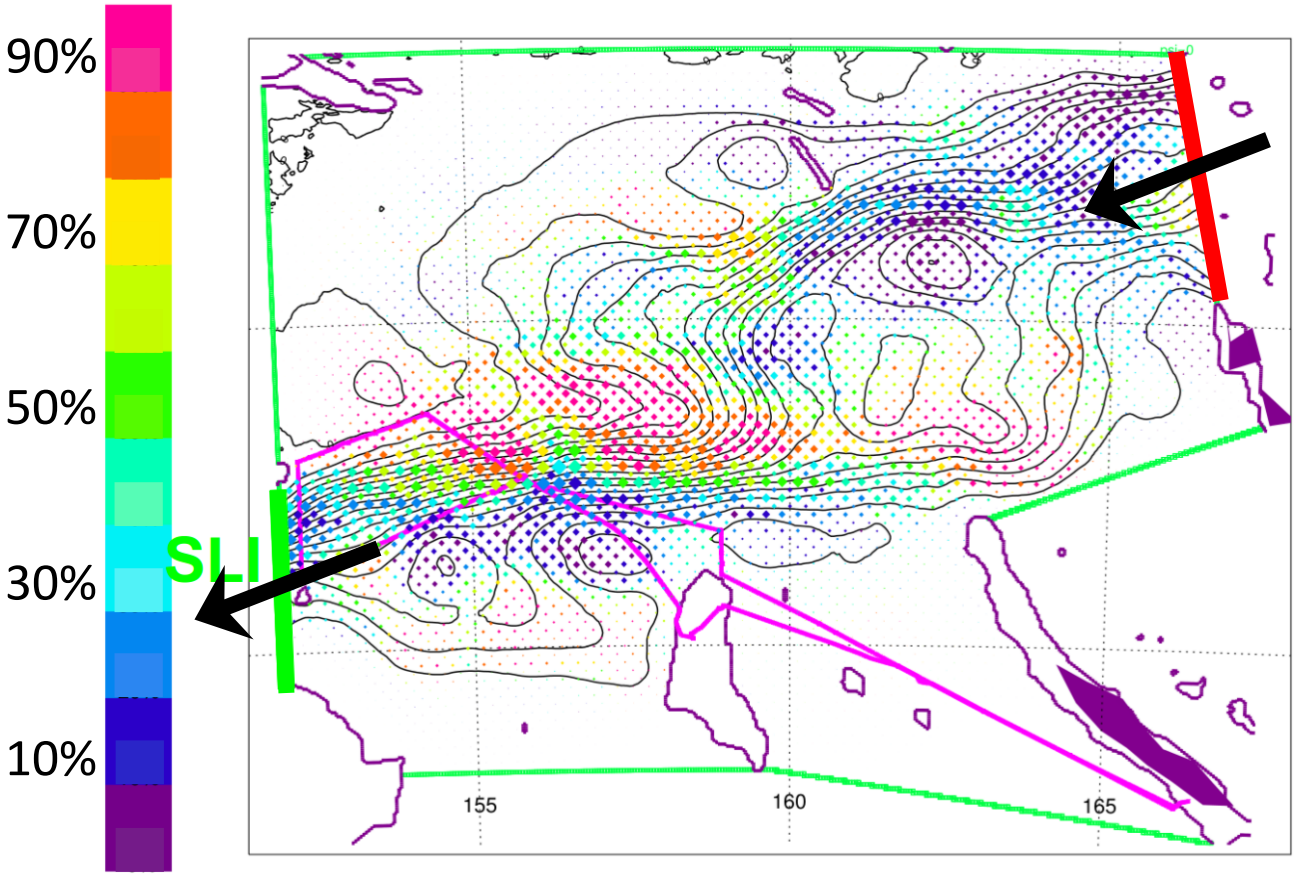


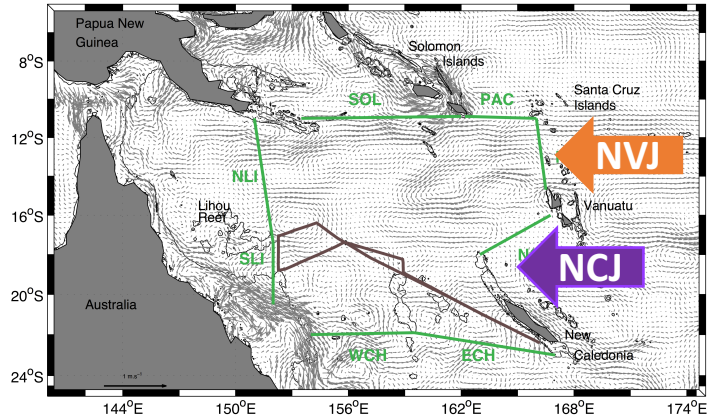


Partie II : Transport par la mésoéchelle

Analyse Lagrangienne

- Trajectoires des particules qui traversent la section NVJ puis SLI (2 ans)
- Contribution des anticyclones au transfert des particules

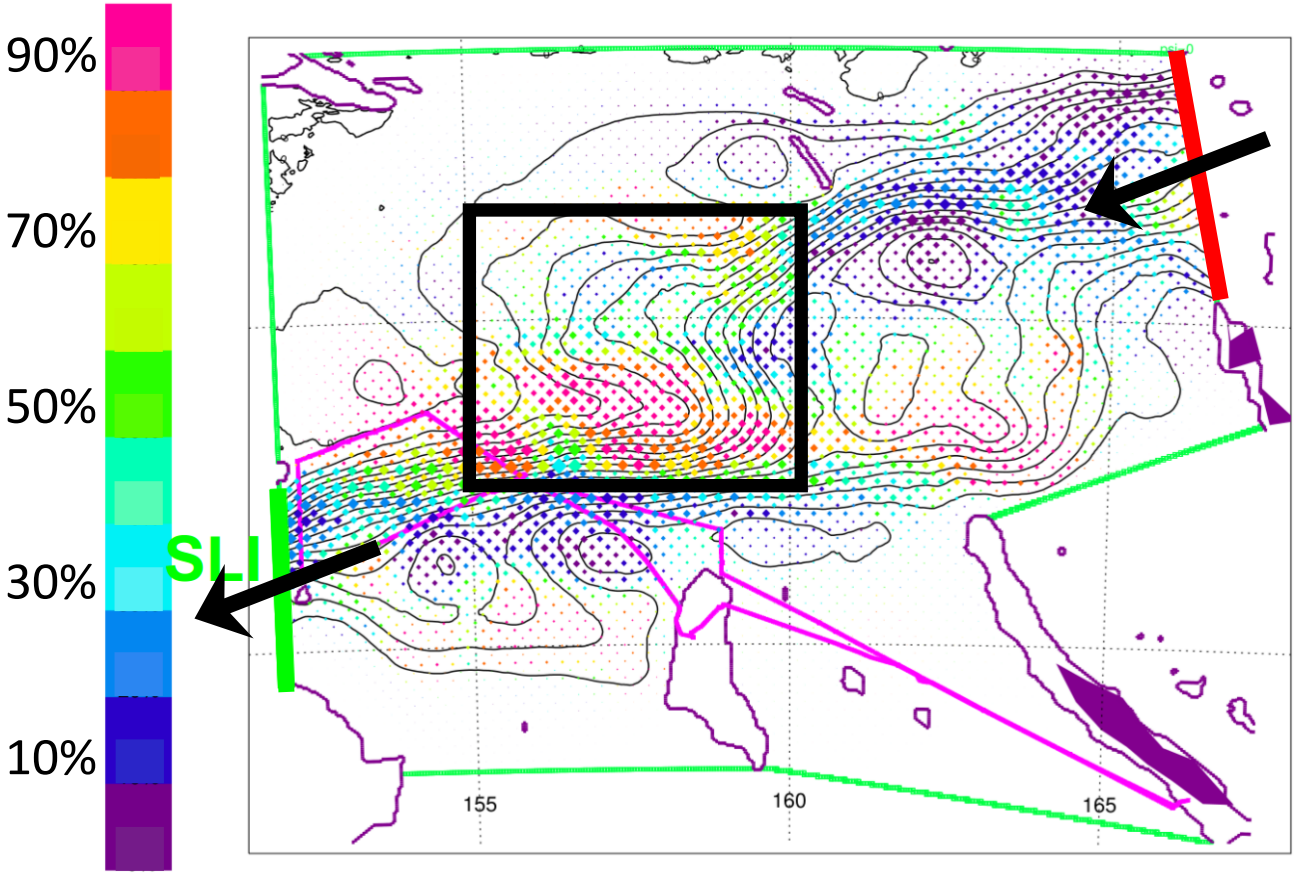


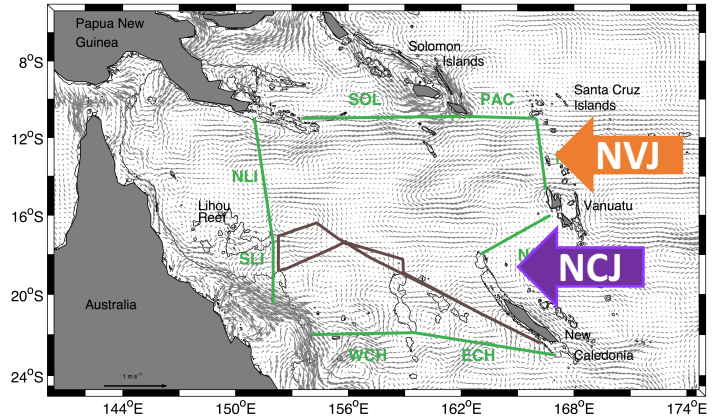


Partie II : Transport par la mésoéchelle

Analyse Lagrangienne

- Trajectoires des particules qui traversent la section NVJ puis SLI (2 ans)
- Contribution des anticyclones au transfert des particules





➢ 70-90 % du transport, dans la zone 155-160°E et 15-17°S ⟶ anticyclones

☑ Hypothèse: Transport, via les tourbillons, des eaux du NVJ vers la zone de circulation du NCJ

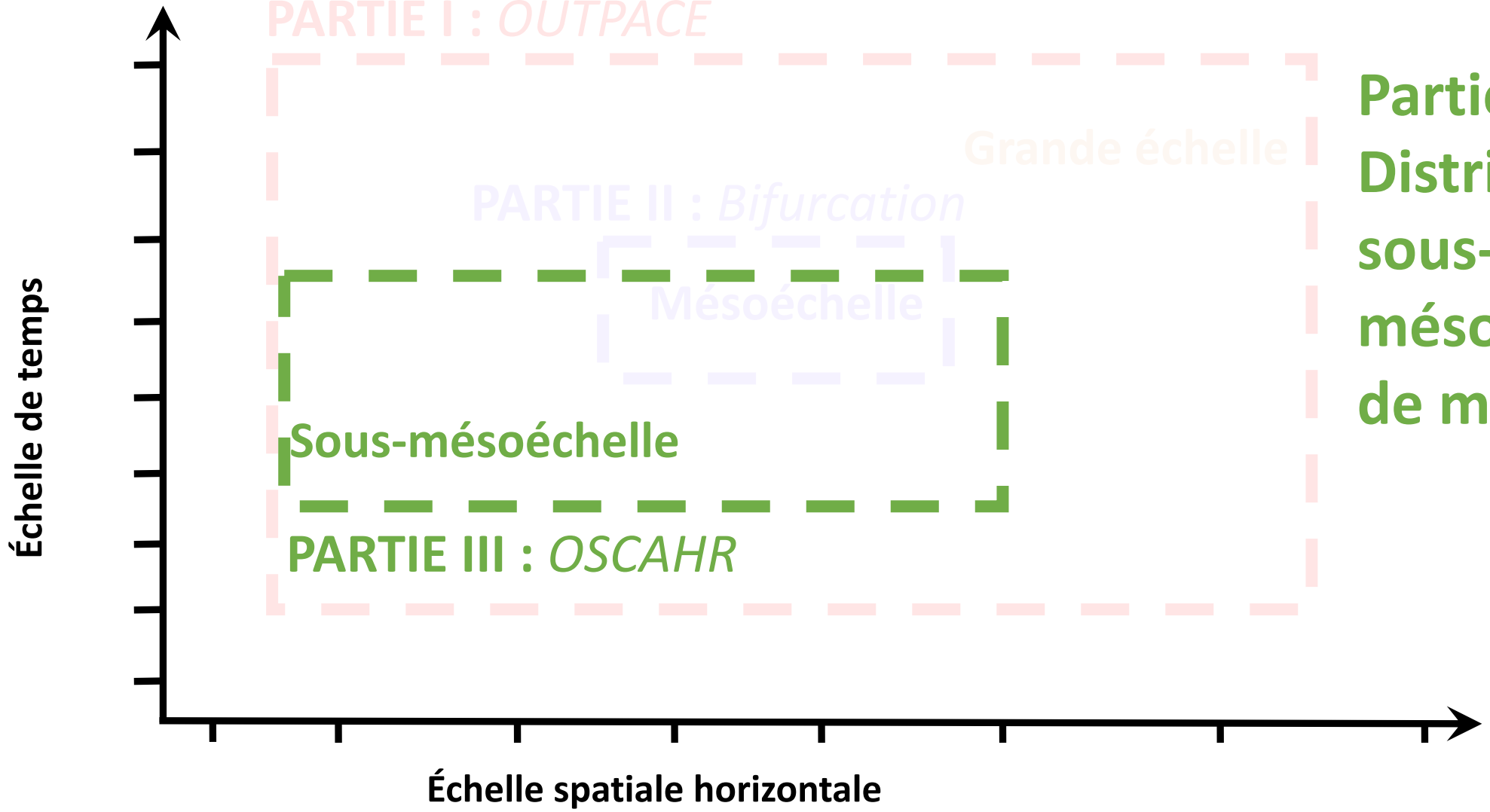
➢ **Identification d'un nouveau trajet des masses d'eau**

Conclusions - Partie II

[Rousselet et al., 2016, *JGR*]
Lettre site INSU

- Première **observation d'un transport**, via une structure anticyclonique, de masses d'eau de la thermocline entre le NVJ et le NCJ
- Identification d'un **transport modulé par la mésoéchelle** entre le NVJ et le NCJ
- Estimation de la **contribution des anticyclones** au transport entre les deux jets (**70-90 %**)

Plan

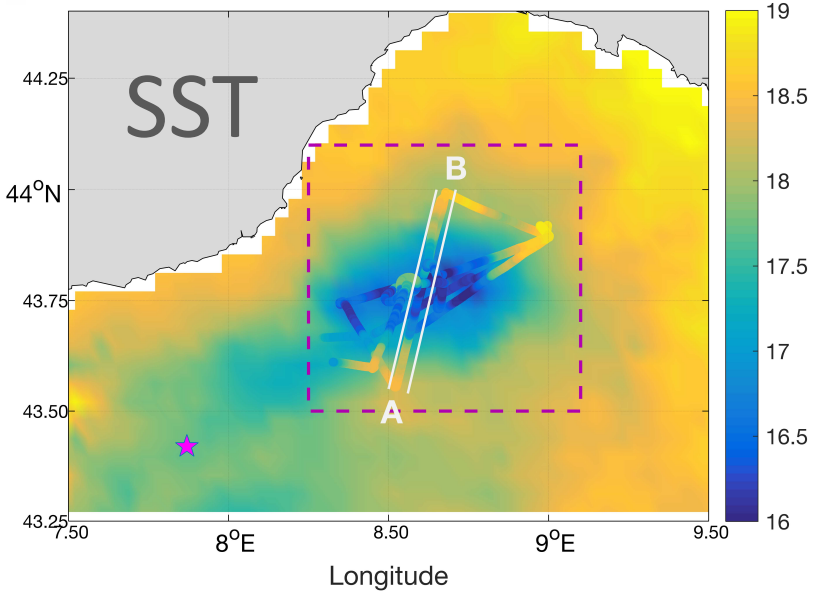


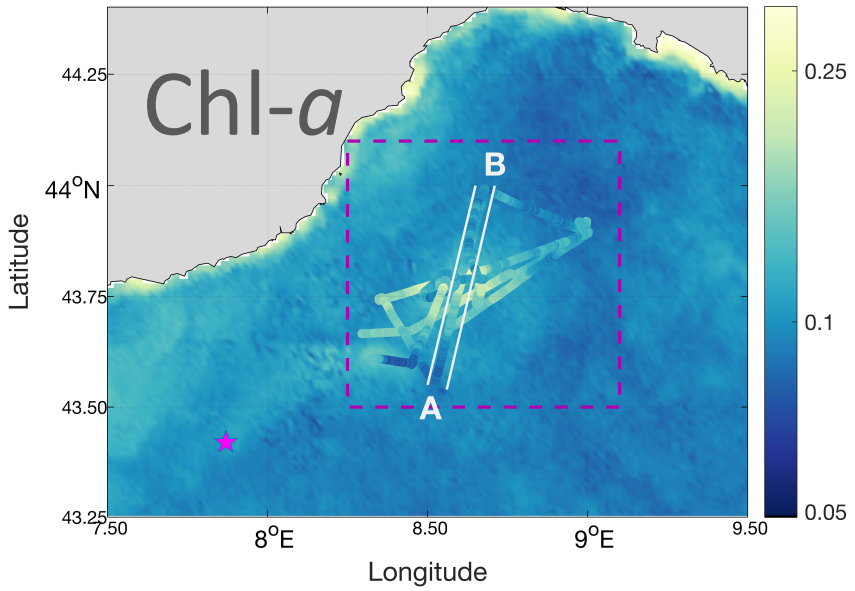
Partie III : Distribution sous-mésoéchelle de matière

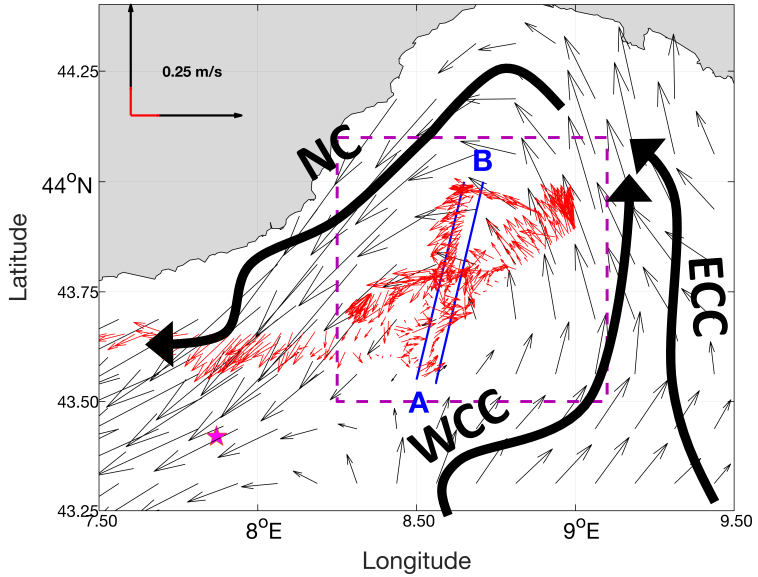
[D'après Dickey 1991, 2003]

Partie III : Distribution sous-mésoéchelle

Jeu de données (*OSCAHR,* PI A. Doglioli) en mer Ligure

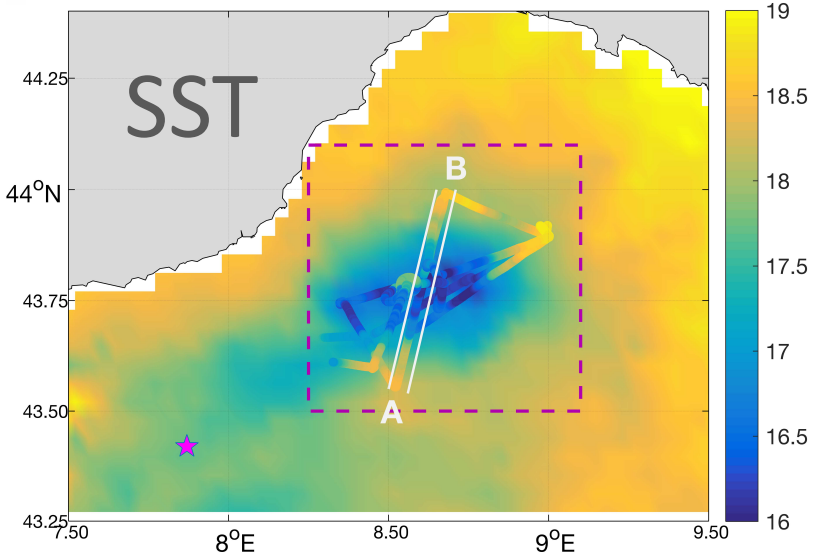


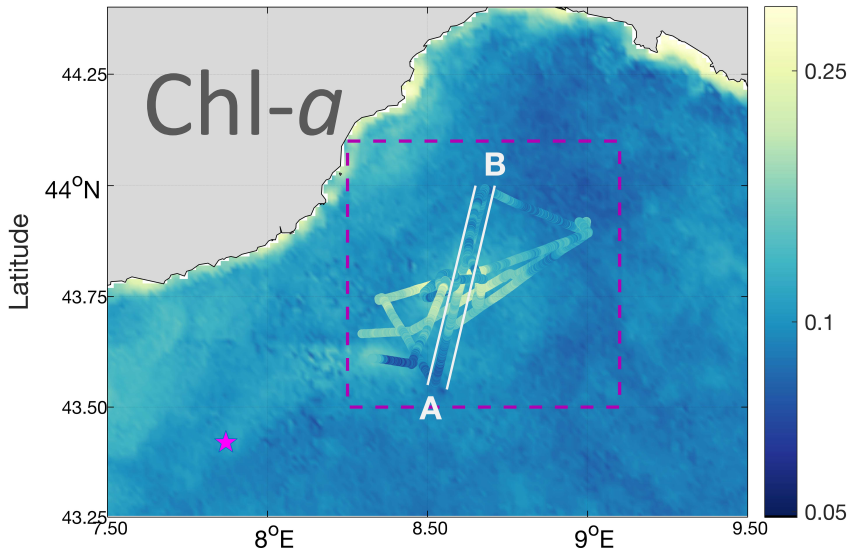


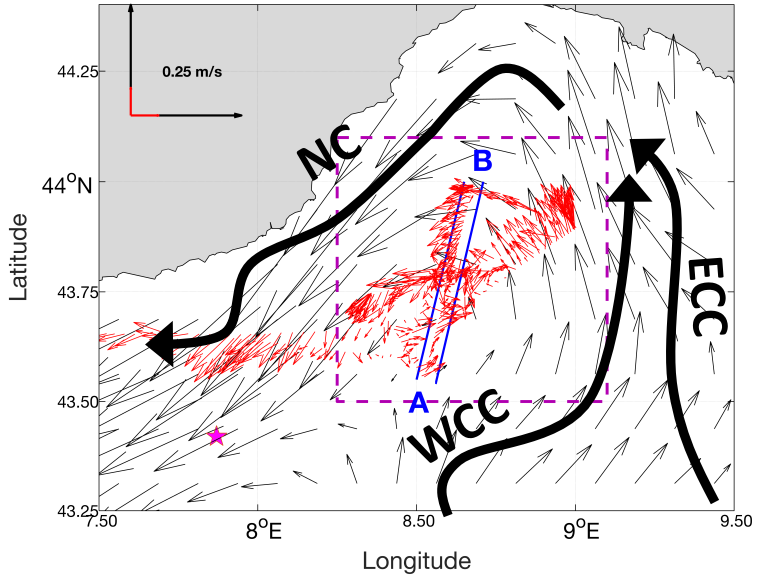


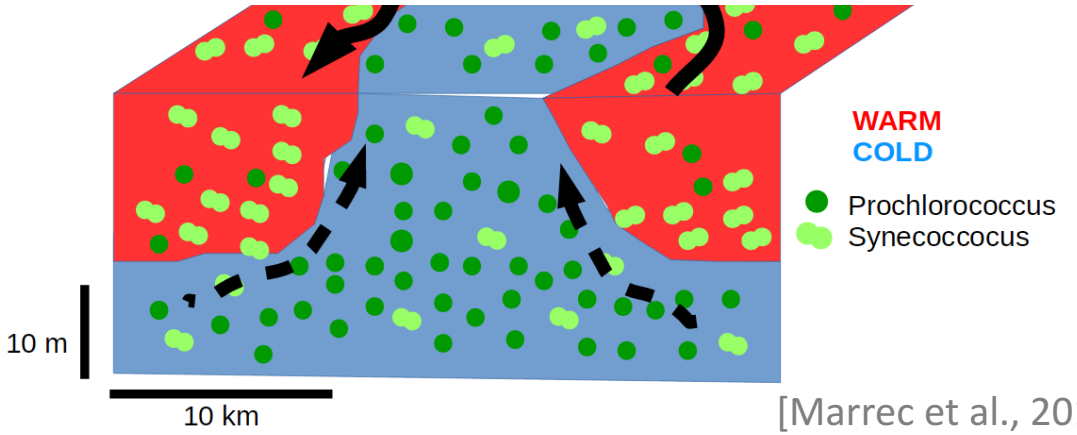
Partie III : Distribution sous-mésoéchelle

Jeu de données (*OSCAHR,* PI A. Doglioli) en mer Ligure









[Marrec et al., 2018]

- Hypothèse de Marrec et al., 2018: mouvements verticaux à l'intérieur de la structure → vitesses verticales ?

Calcul de vitesses verticales

Défi méthodologique : Nécessite des champs 3-D or données disponibles uniquement sur le trajet du bateau

Calcul de vitesses verticales

Défi méthodologique : Nécessite des champs 3-D or données disponibles uniquement sur le trajet du bateau

I. Cartes objectives pour reconstruire des champs 3-D de **masse volumique** et de **composantes horizontales (u,v)** de la vitesse à partir des données MVP et ADCP (sur la trajectoire du bateau).
II. Equation- ω pour estimer la composante verticale (w) de la vitesse:

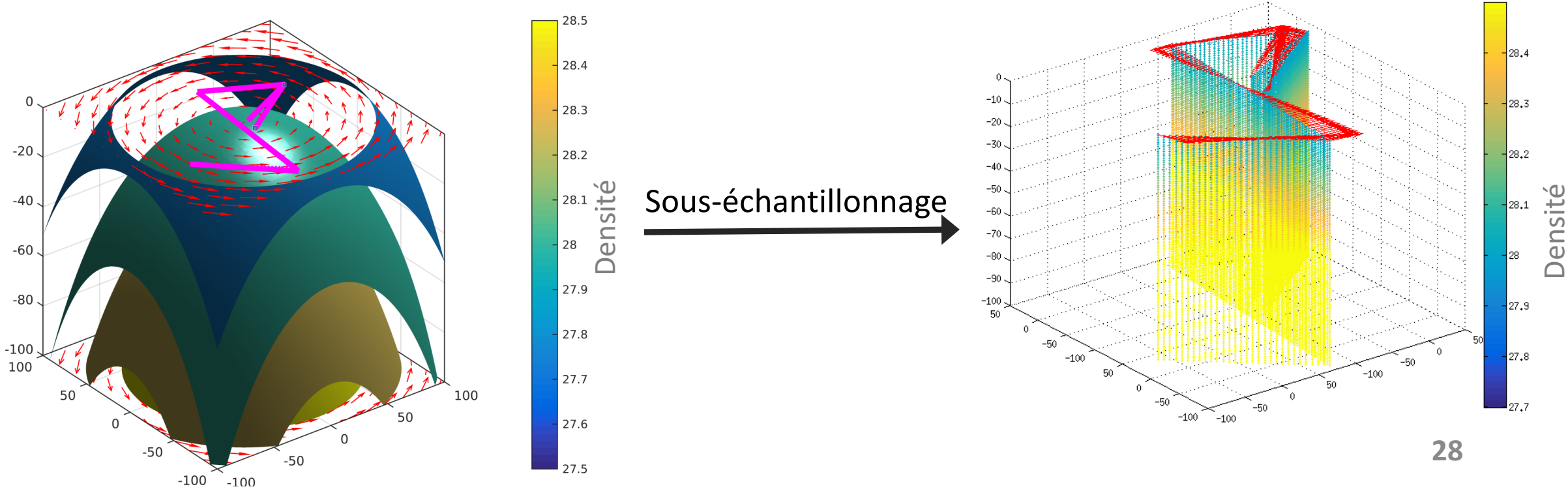
$$\nabla^2(\mathrm{N}^2\mathrm{w}) + \mathrm{f}^2\frac{\partial^2 \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}^2} = 2\nabla.\mathbf{Q}$$

$$avec\ \boldsymbol{Q} = \left(\frac{g}{\rho_0}\frac{\partial \boldsymbol{V_g}}{\partial x}\cdot\nabla\rho, \frac{g}{\rho_0}\frac{\partial \boldsymbol{V_g}}{\partial y}\cdot\nabla\rho\right)$$

Calcul de vitesses verticales: cas test d'un tourbillon cylindrique

Défi méthodologique : Nécessite des champs 3-D <u>or</u> données disponibles uniquement sur le trajet du bateau

I. Cartes objectives pour reconstruire des champs 3-D de **masse volumique** et de **composantes horizontales (u,v)** de la vitesse à partir des données MVP et ADCP (sur la trajectoire du bateau).
II. Equation- ω pour estimer la composante verticale (w) de la vitesse

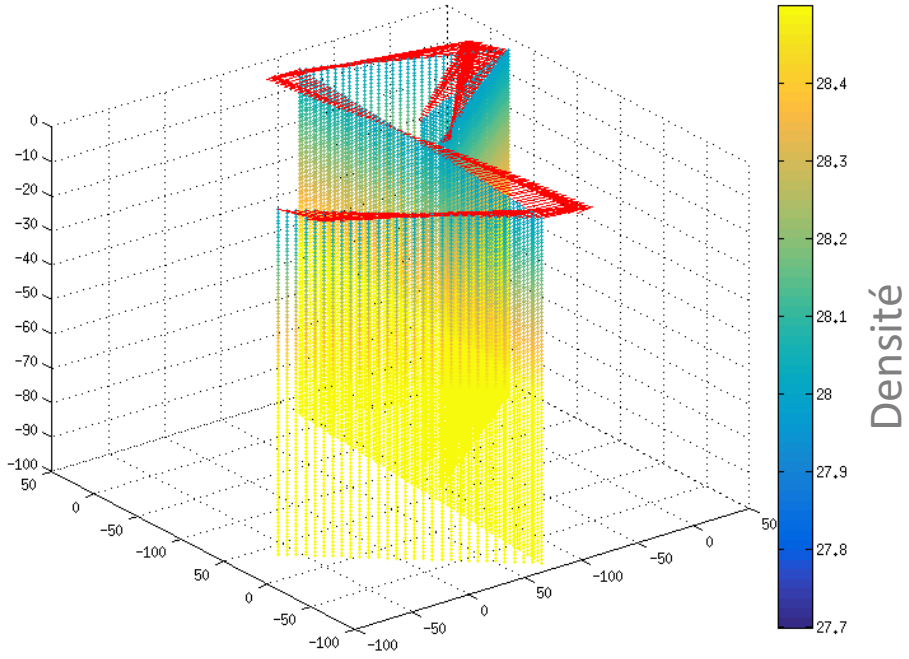


Calcul de vitesses verticales: cas test d'un tourbillon cylindrique

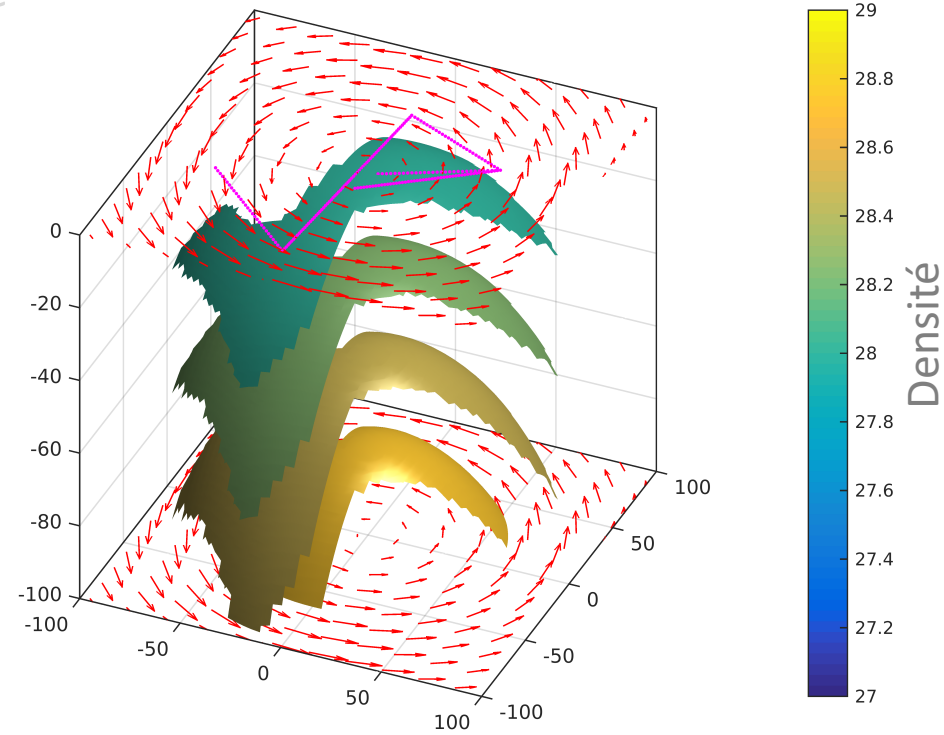
Défi méthodologique : Nécessite des champs 3-D or données disponibles uniquement sur le trajet du bateau

I. Cartes objectives pour reconstruire des champs 3-D de **masse volumique** et de **composantes horizontales (u,v)** de la vitesse à partir des données MVP et ADCP (sur la trajectoire du bateau).

II. Equation- ω pour estimer la composante verticale (w) de la vitesse



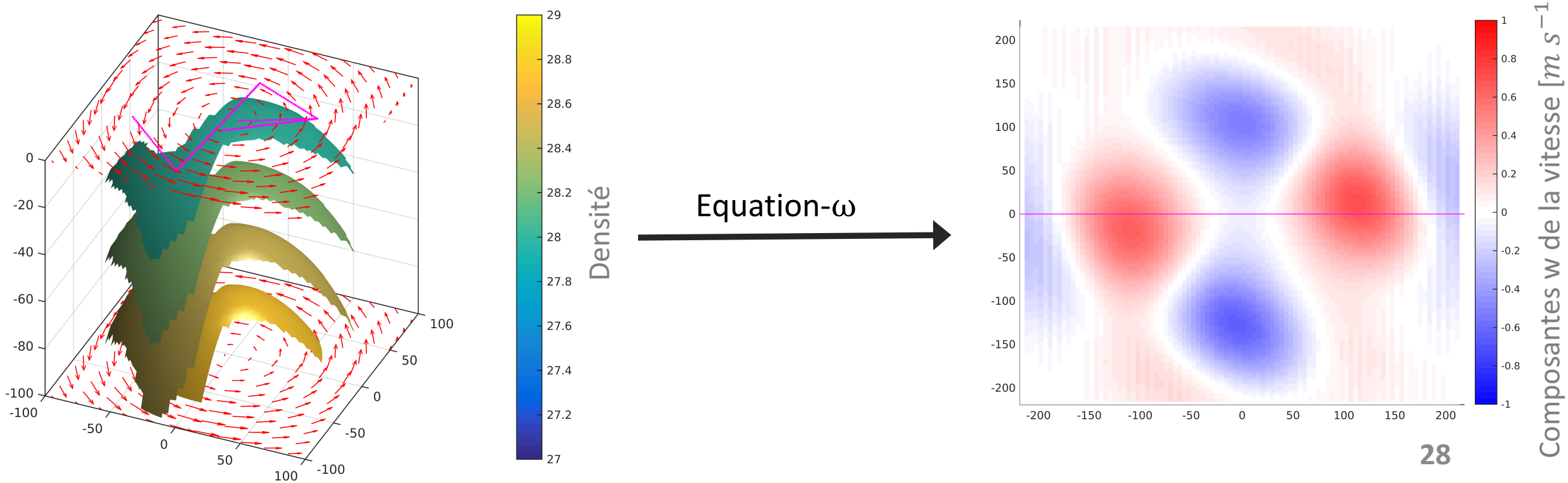
Carte objective



Calcul de vitesses verticales: cas test d'un tourbillon cylindrique

Défi méthodologique : Nécessite des champs 3-D or données disponibles uniquement sur le trajet du bateau

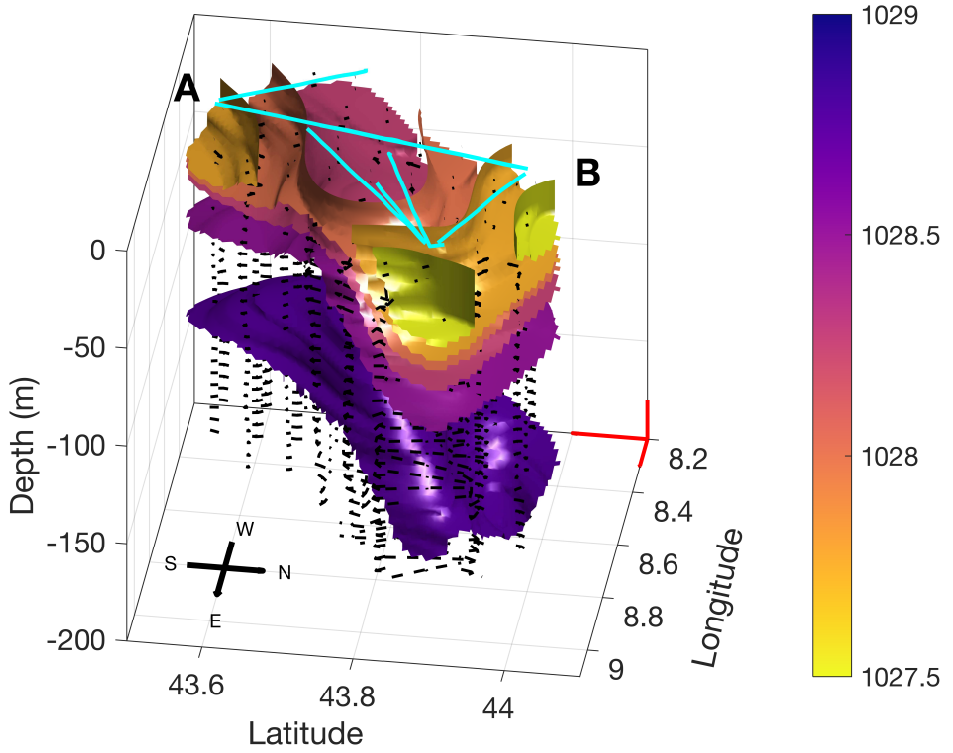
I. Cartes objectives pour reconstruire des champs 3-D de **masse volumique** et de **composantes horizontales (u,v)** de la vitesse à partir des données MVP et ADCP (sur la trajectoire du bateau).
II. Equation- ω pour estimer la composante verticale (w) de la vitesse



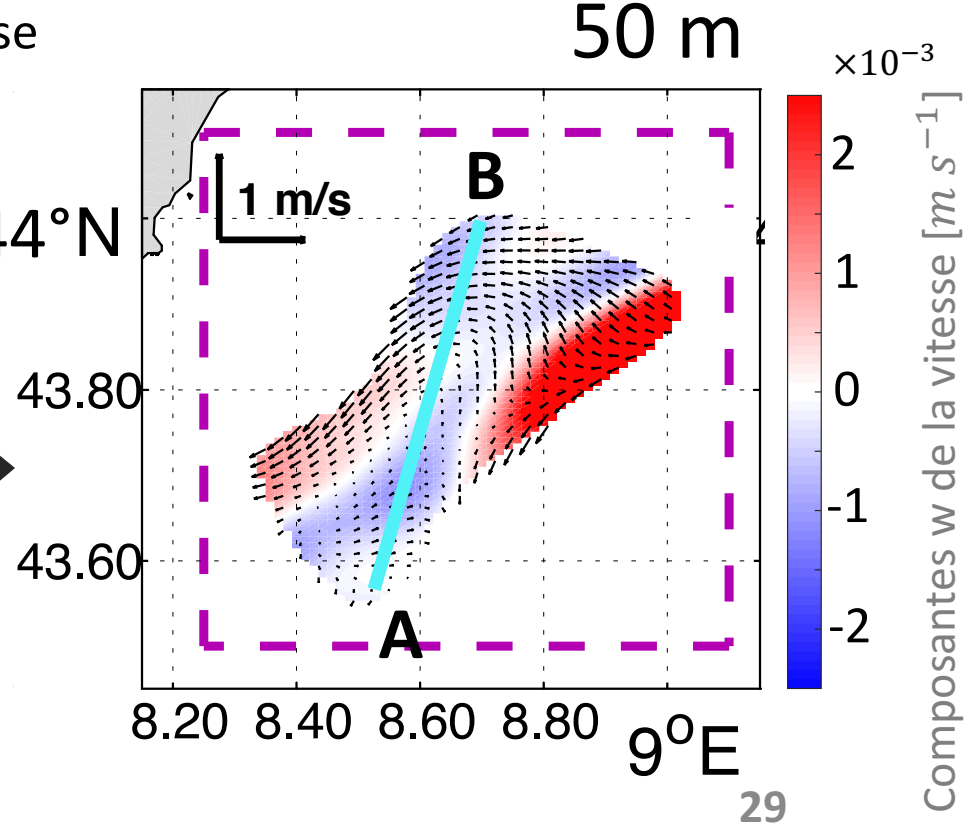
Calcul de vitesses verticales: cas OSCAHR

Défi méthodologique : Nécessite des champs 3-D or données disponibles uniquement sur le trajet du bateau

I. Cartes objectives pour reconstruire des champs 3-D de **masse volumique** et de **composantes horizontales (u,v)** de la vitesse à partir des données MVP et ADCP (sur la trajectoire du bateau).
II. Equation- ω pour estimer la composante verticale (w) de la vitesse

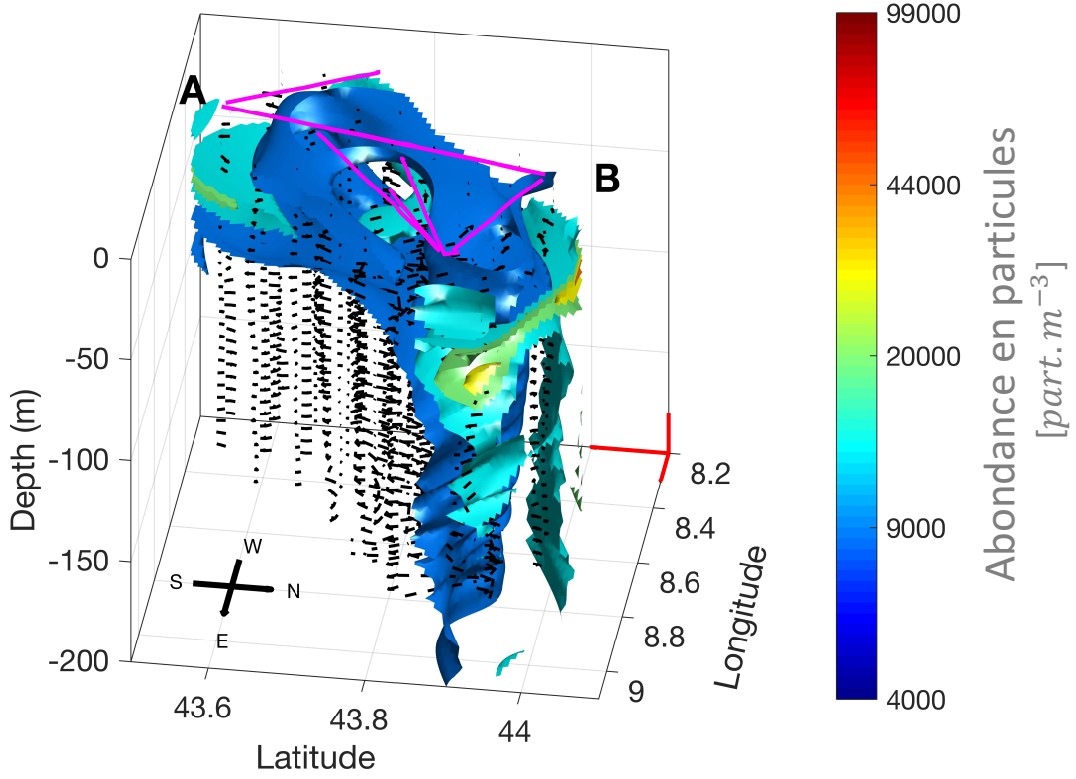


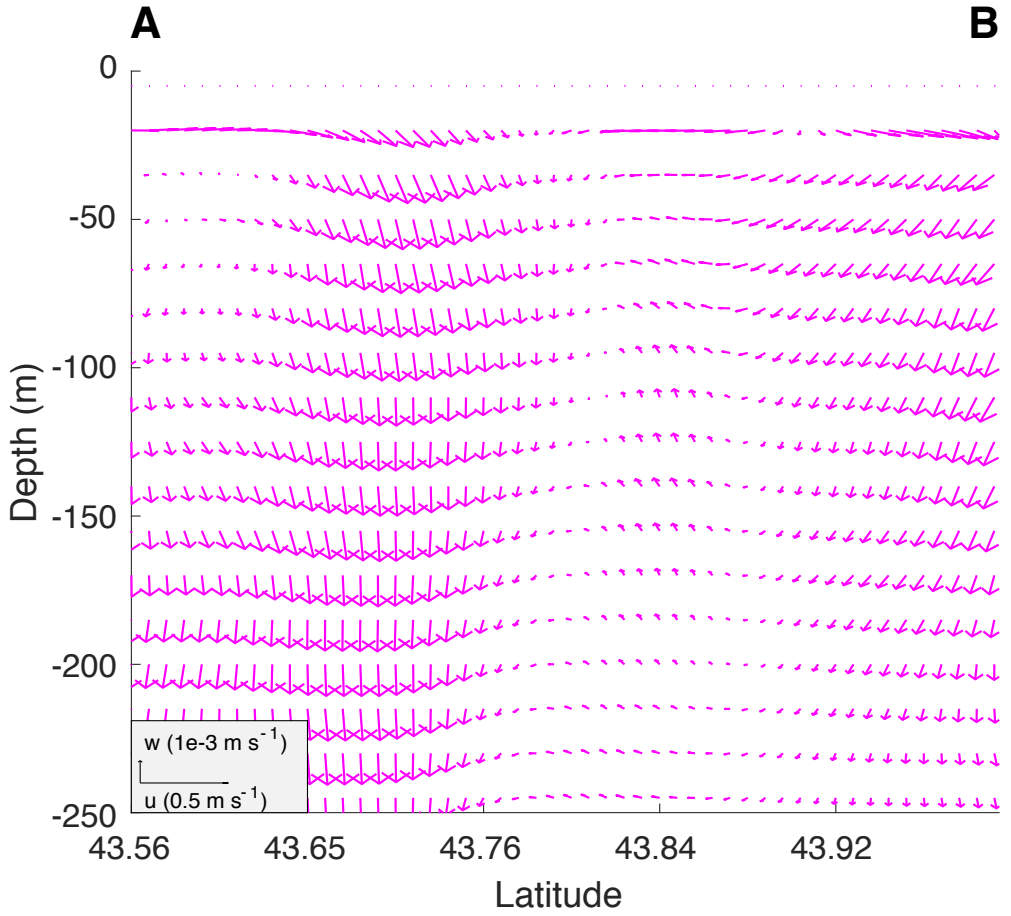
Equation-ω



Distribution particules

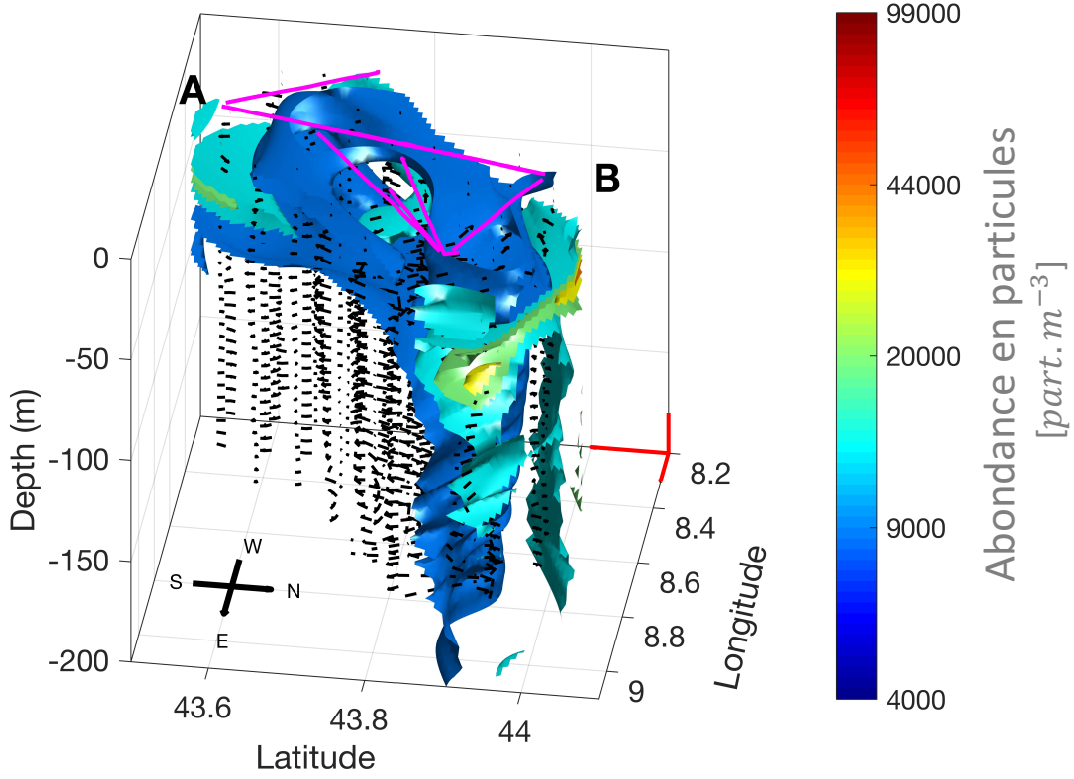
✓ Jeu de données indépendant avec des mesures d'abondance de particules en suspension (*LOPC*)

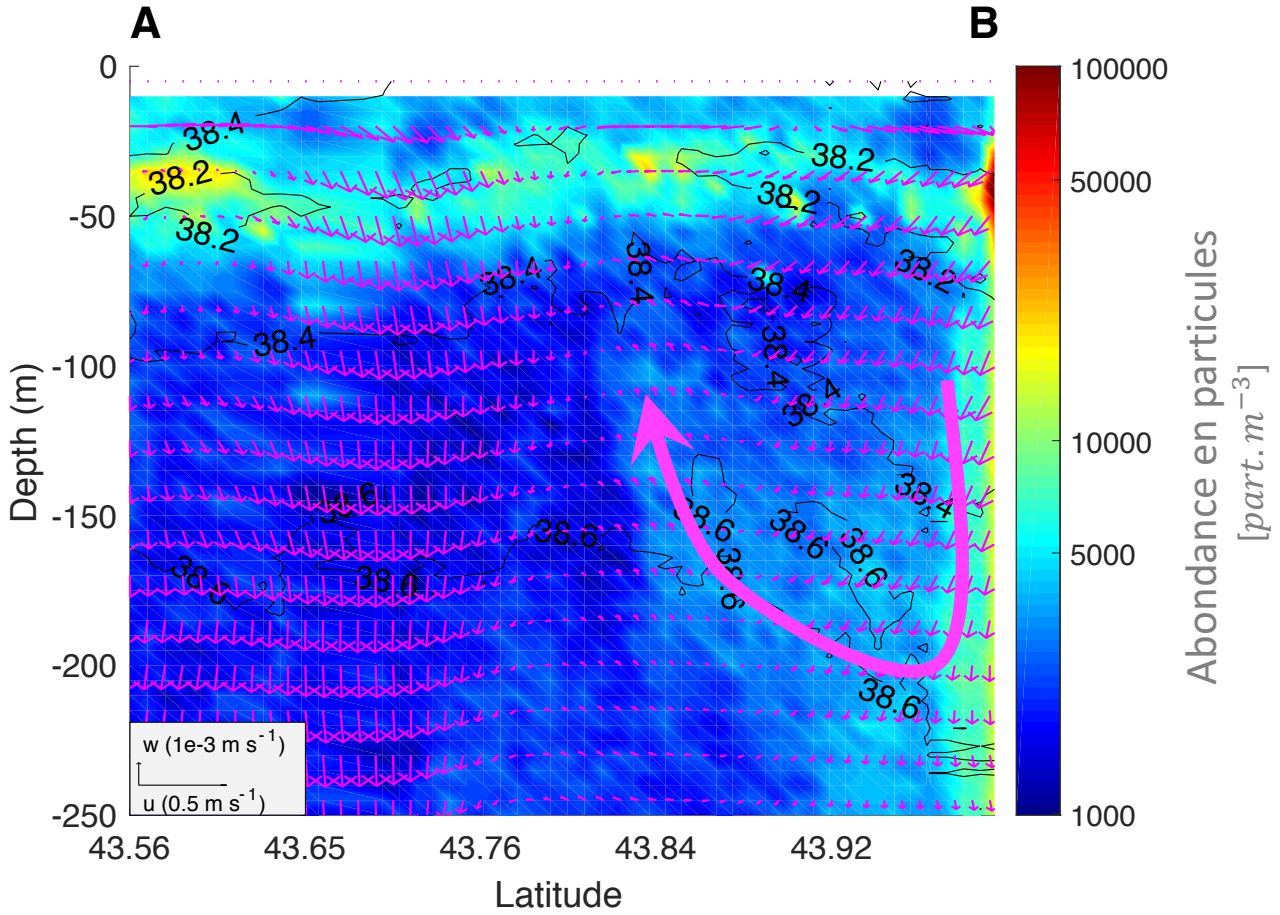




Distribution particules

✓ Jeu de données indépendant avec des mesures d'abondance de particules en suspension (*LOPC*)





☑ Cohérence avec les estimations de vitesse verticale

Conclusions - Partie III

[Rousselet et al., *in revision, JGR*]

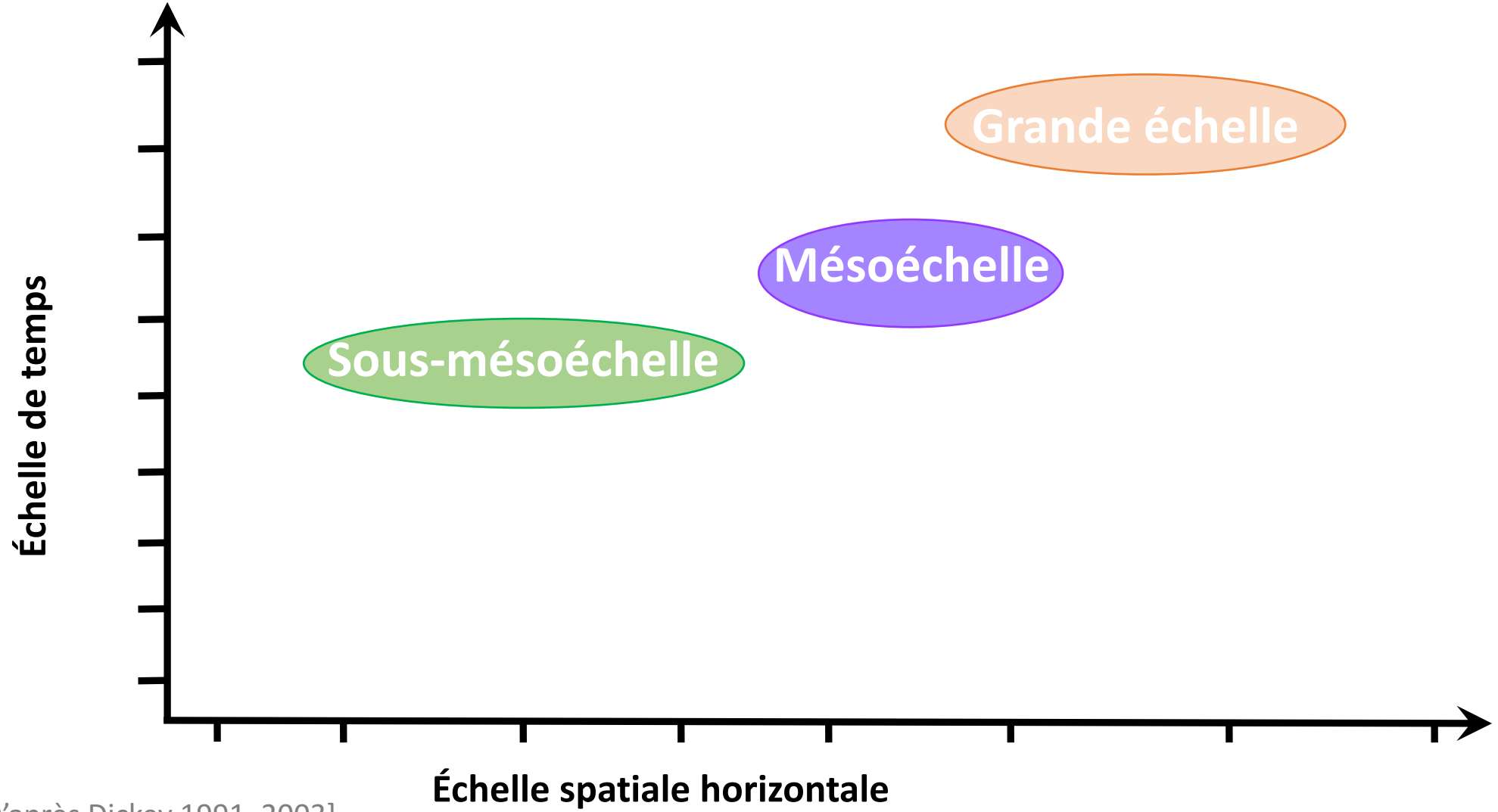
- Échantillonnage **biophysique haute-fréquence** d'une structure cyclonique

- Estimation des **vitesses verticales** sous-mésoéchelle à l'intérieur d'une **structure cyclonique** à partir de mesures *in situ*

  « Le plus grand challenge de l'océanographie physique est d'estimer les vitesses verticales sous-mésoéchelle »
  [D'après Lévy et al., 2018]

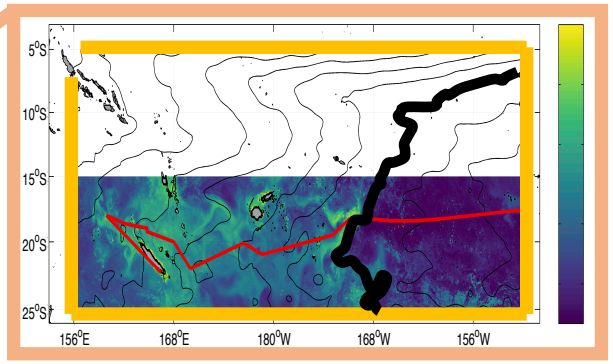
- **Cohérence des estimations** avec une mesure indépendante d'un **traceur biogéochimique** (abondance en particules)

Conclusions principales



[D'après Dickey 1991, 2003]

Conclusions principales



[Rousselet et al., 2018, *OUTPACE*]

Grande échelle

Mésoéchelle

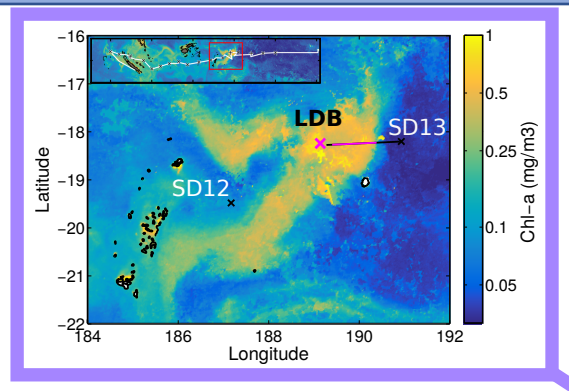
Sous-mésoéchelle

Échelle de temps

Échelle spatiale horizontale

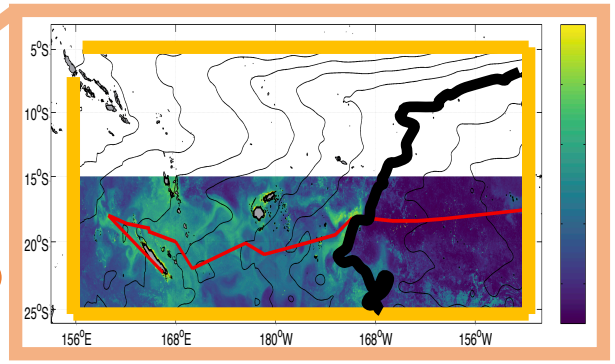
[D'après Dickey 1991, 2003]

Conclusions principales



[De Verneil et al., 2017, *OUTPACE*]

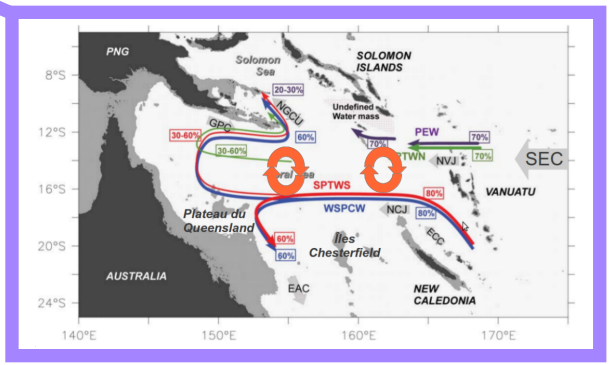
Grande échelle



[Rousselet et al., 2018, *OUTPACE*]

Mésoéchelle

Sous-mésoéchelle



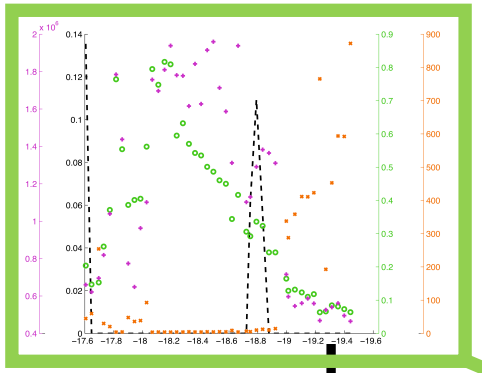
[Rousselet et al., 2016, *Bifurcation*]

Échelle de temps

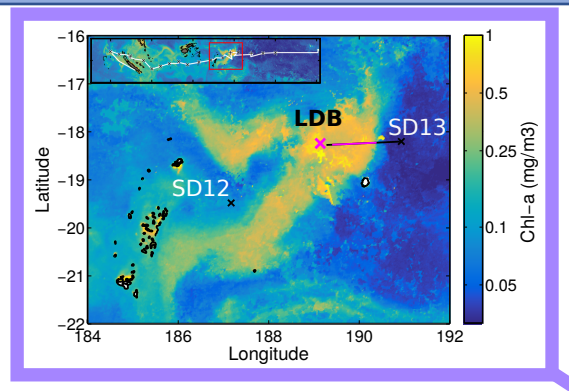
Échelle spatiale horizontale

[D'après Dickey 1991, 2003]

Conclusions principales

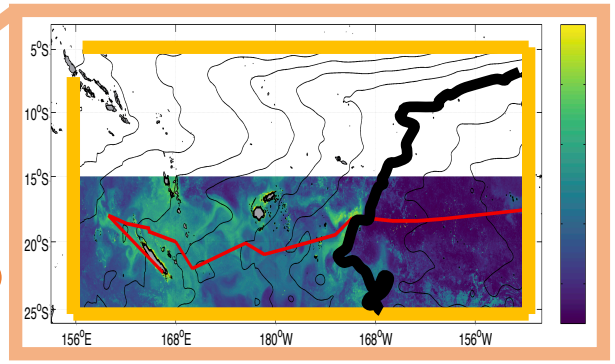


[Rousselet et al., 2018, *OUTPACE*]



[De Verneil et al., 2017, *OUTPACE*]

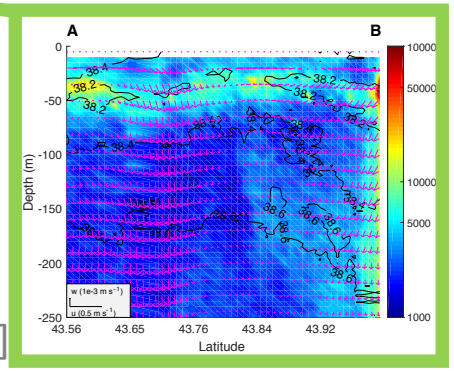
Grande échelle



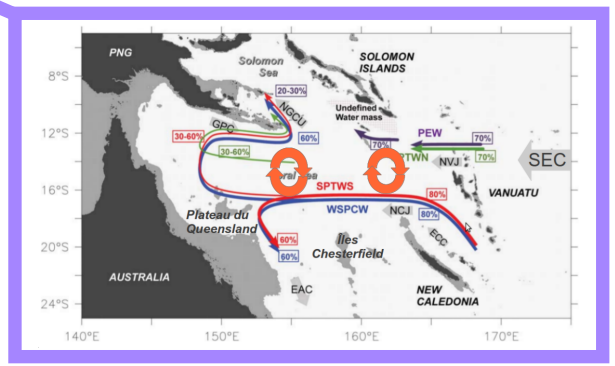
[Rousselet et al., 2018, *OUTPACE*]

Mésoéchelle

Sous-mésoéchelle



[Rousselet et al., in rev., *OSCAHR*]



[Rousselet et al., 2016, *Bifurcation*]

Échelle de temps

Échelle spatiale horizontale

[D'après Dickey 1991, 2003]

Perspectives

- Analyses Lagrangiennes en 3-D (Post-doc à SIO)
- Quantification 3-D du transport de masses d'eau par les tourbillons

} Modèles numériques

- Comparaison des vitesses verticales estimées avec un modèle haute-résolution
- Estimation de l'export de carbone à partir des estimations de vitesses verticales
- Développement de stratégies d'échantillonnage couplées avec des mesures haute-fréquence physiques/biogéochimiques/biologiques (plateforme PRECYM: cytomètre en flux automatique)
- Ces diagnostics pourront être utilisés dans le cadre des missions SWOT et BIOSWOT

[PI F. D'Ovidio]

Merci à tous

Extra slides

Rayon de déformation de Rossby

- Détermine l'échelle spatiale à laquelle les effets de la rotation terrestre deviennent aussi important que la flottabilité ou les ondes de gravité

➔ le diamètre des tourbillons océaniques

$$R_D = \frac{NH}{\pi f}$$

avec

$$N \equiv \sqrt{-\frac{g}{\rho}\frac{d\rho}{dz}}$$

H = épaisseur du fluide
ρ = densité
f = paramètre de Coriolis

<u>Pacifique Tropical Sud-Ouest</u>

Chelton et al., 1997: $R_D \sim 50 - 80\ km$
De Verneil et al., 2017b: $R_D \sim 65\ km$ estimé pendant la campagne OUTPACE à la station LDC

<u>Méditerranée</u>

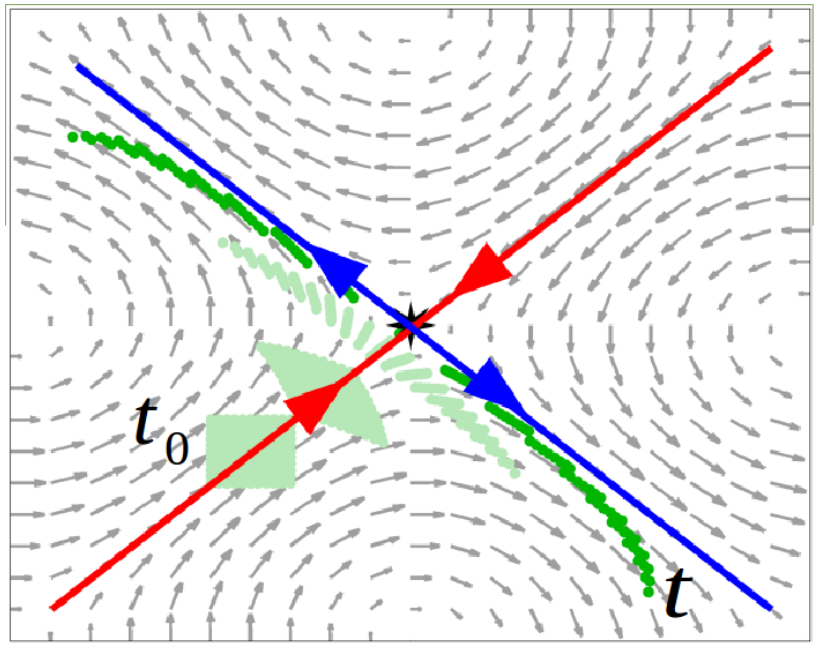
Grilli et Pinardi, 1998: $R_D \sim 5 - 12\ km$

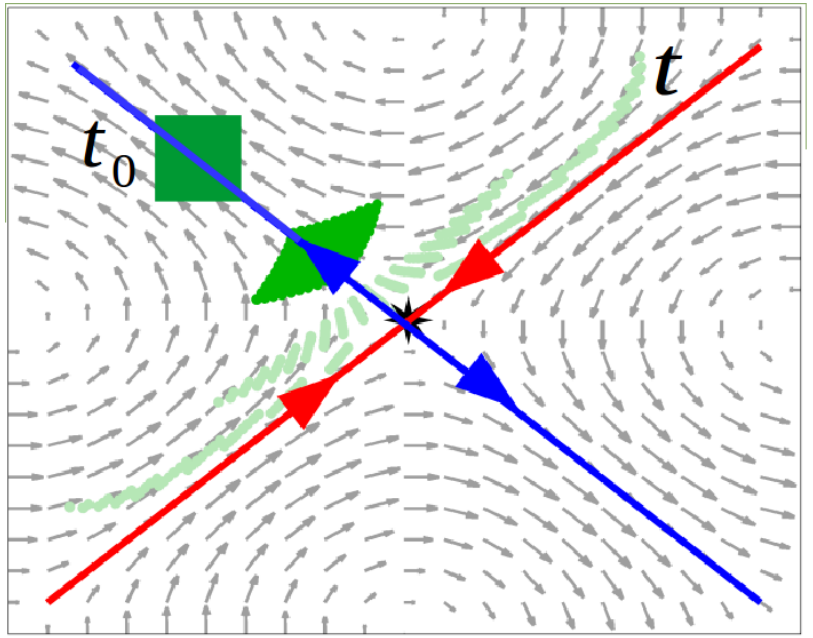
- Calcul du rayon de déformation de Rossby en cours dans la zone d'échantillonnage OSCAHR (CTD) pour révision du papier OSCAHR

Exposants de lyapunov

- Un FSLE $\lambda(x,t,\delta_0,\delta_f)$ est inversement proportionnel au temps τ mis par une trajectoire, démarrant au temps t et initialement distante de x de δ_0, pour atteindre une distance de séparation δ_f prédéfinie par rapport à la trajectoire de référence qui a démarré en x:

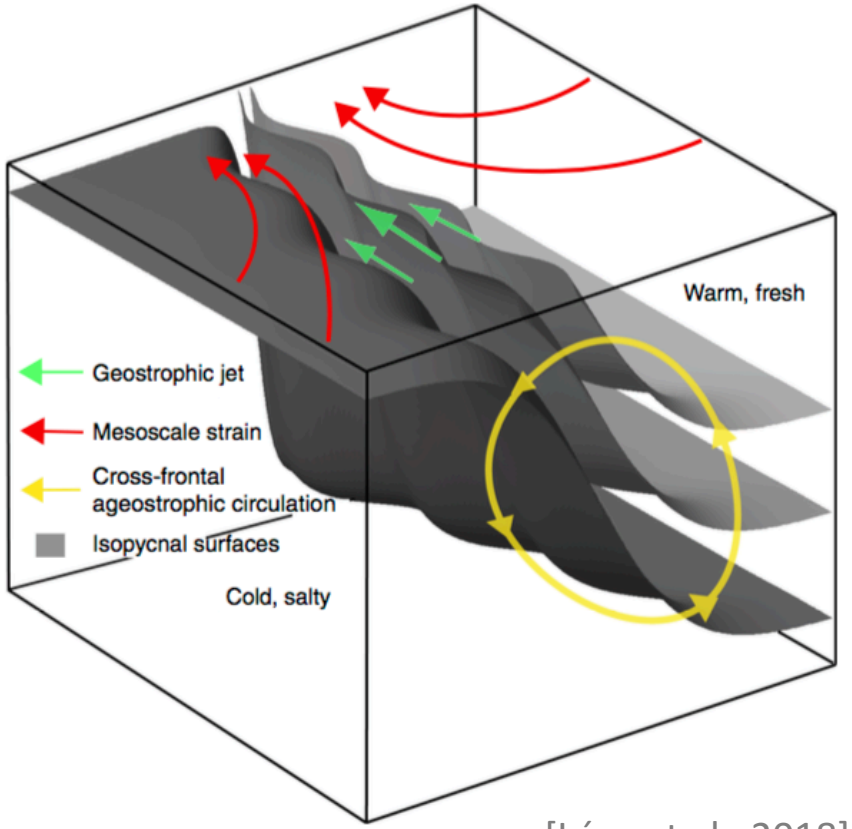
$$\lambda(x,t,\delta_0,\delta_f)=\frac{1}{\tau}\log\frac{\delta_f}{\delta_0}$$



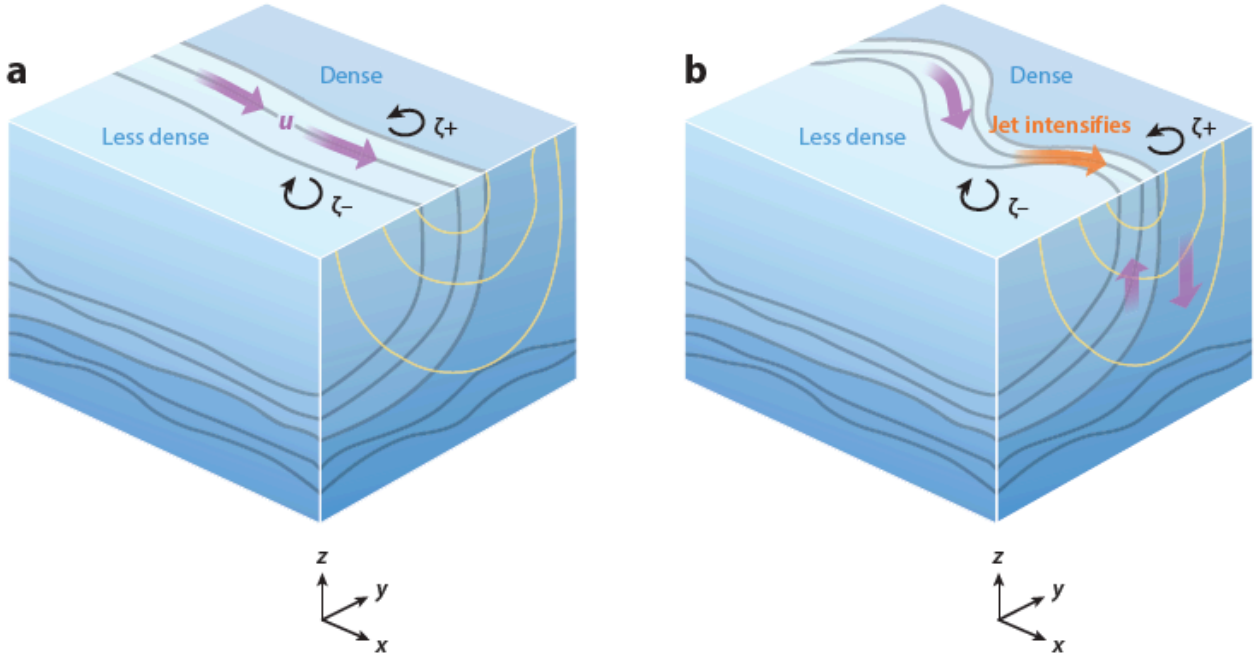


Fronts océaniques et vitesses verticales

- 2 types: **persistants** (gradients horizontaux de densité des grands courants) ou **éphémères** (instabilités sous-mésoéchelles ou processus de déformation des courants mésoéchelles)
- Circulation agéostrophique verticale pour rétablir l'équilibre géostrophique:



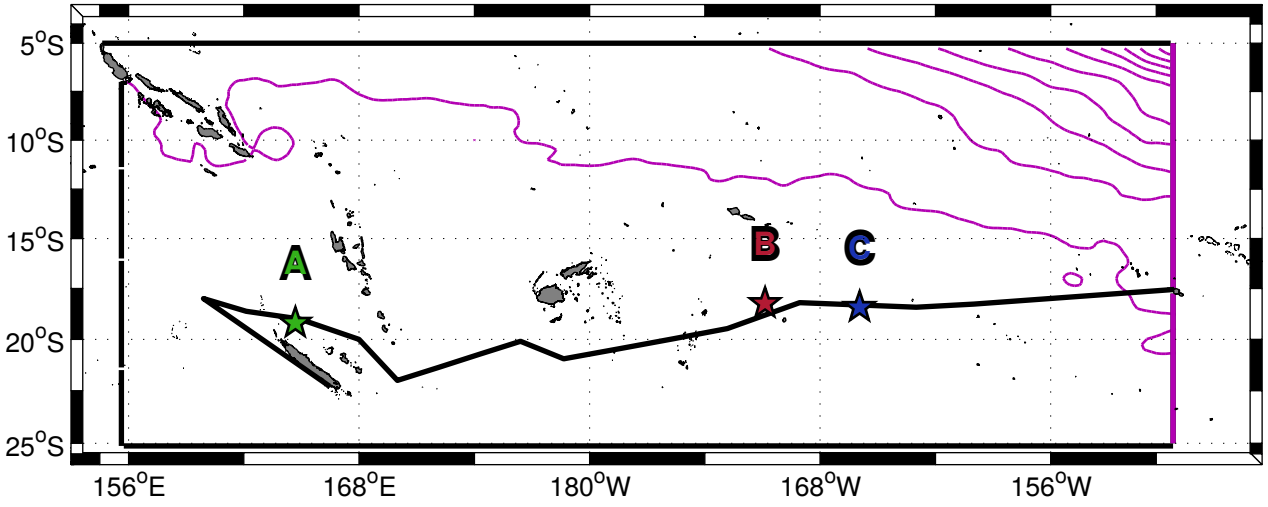
[Lévy et al., 2018]



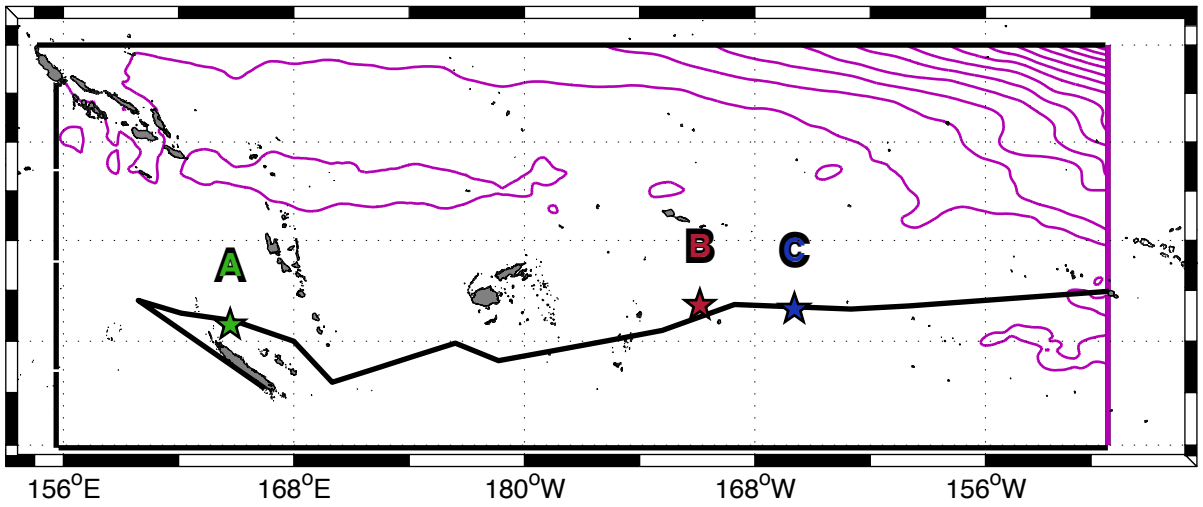
[Mahadevan et al., 2016]

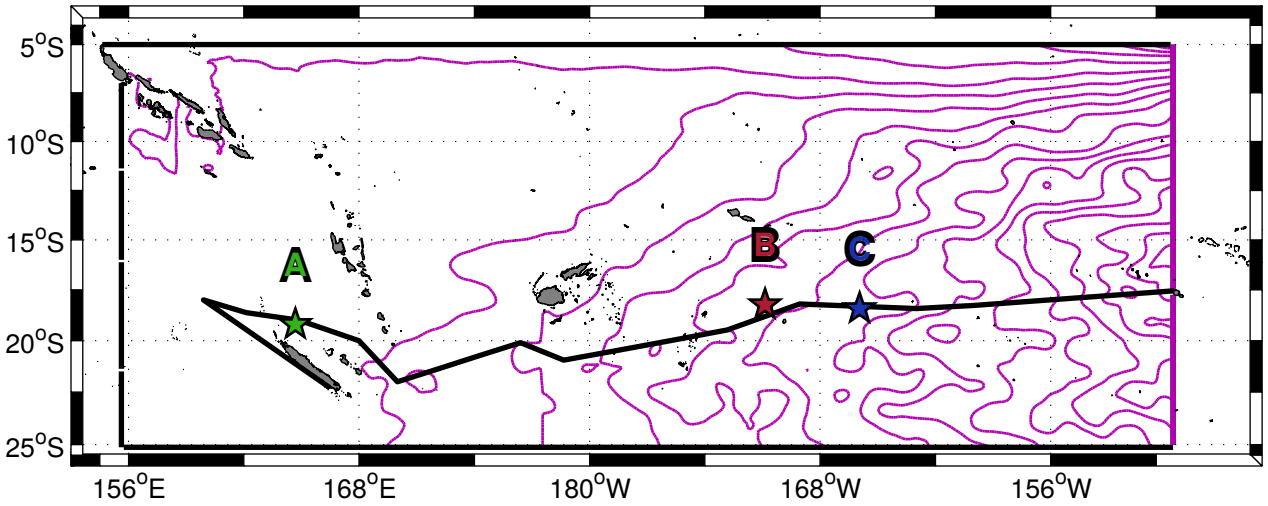
Partie I : Grande → sous-mésoéchelle

AVISO ¼°

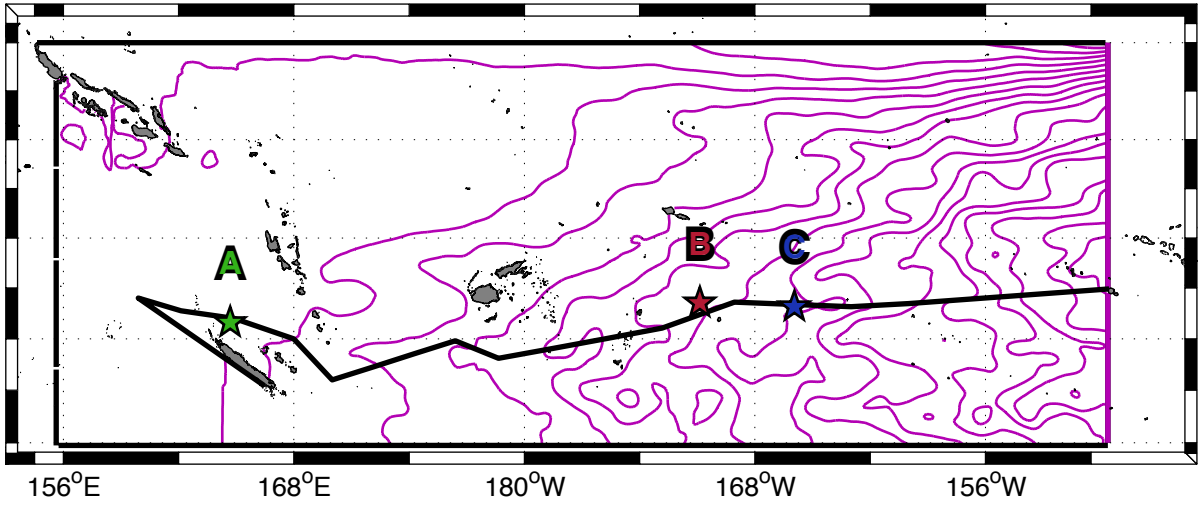


CLS 1/8°





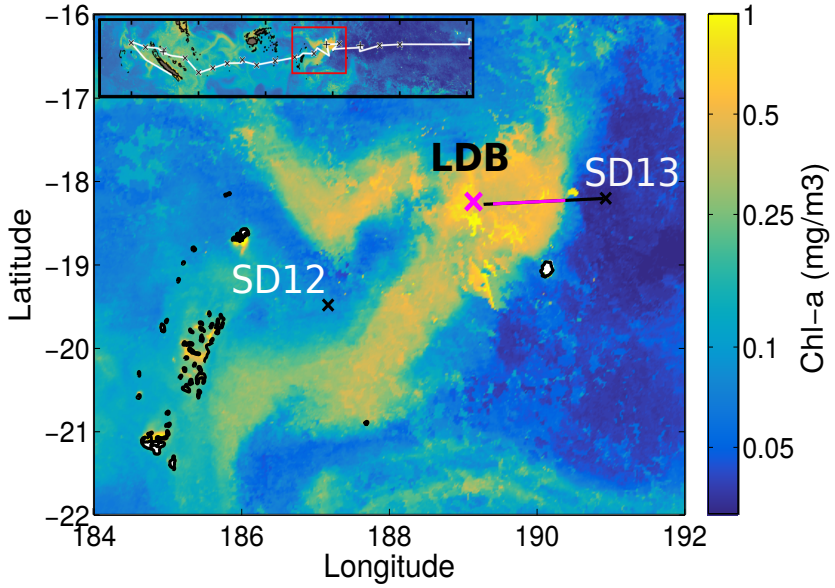
CLS 1/8° (géostrophie + Ekman)

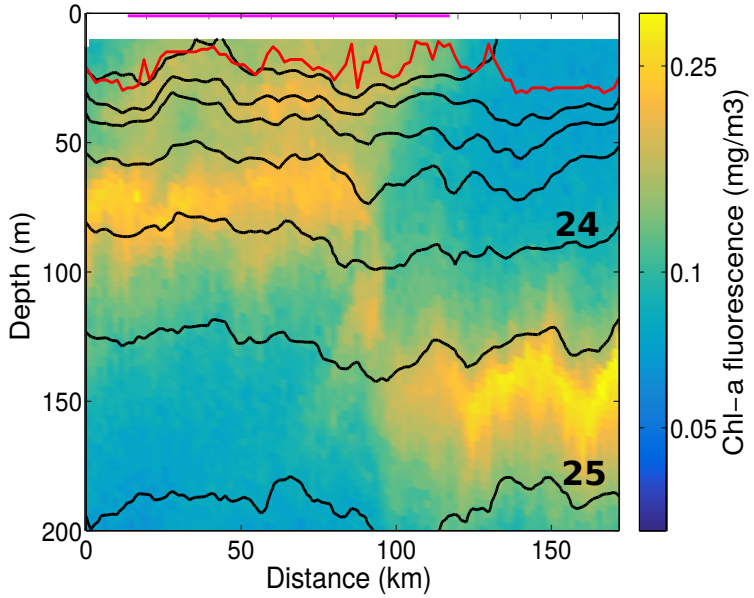


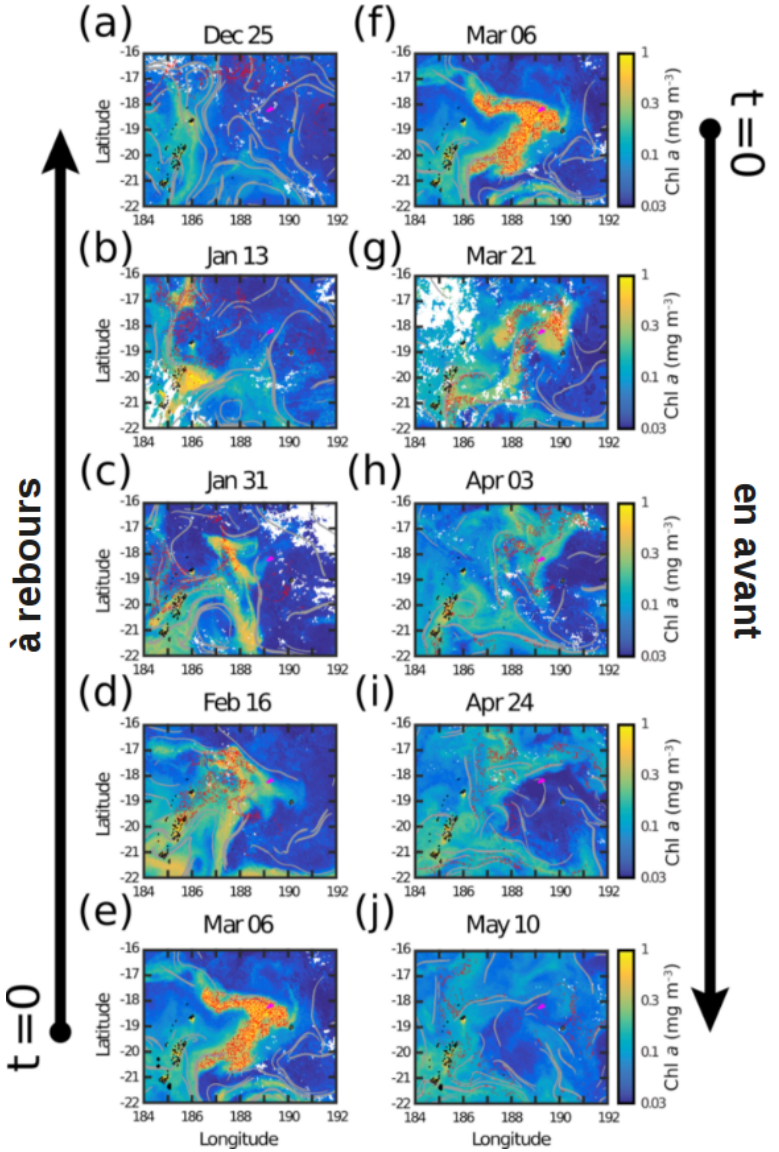
CLS 1/8° (géostrophie + Ekman + cyclogéostrophie)

Partie I : Grande → sous-mésoéchelle

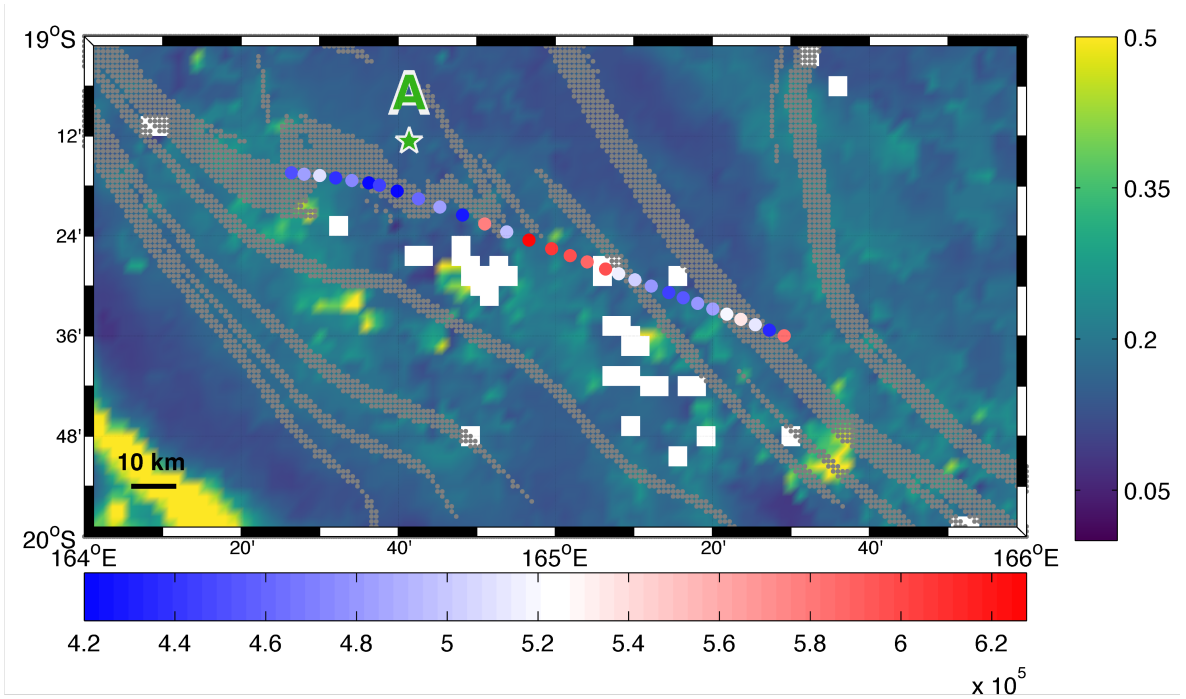
De Verneil, Rousselet et al., 2017b:

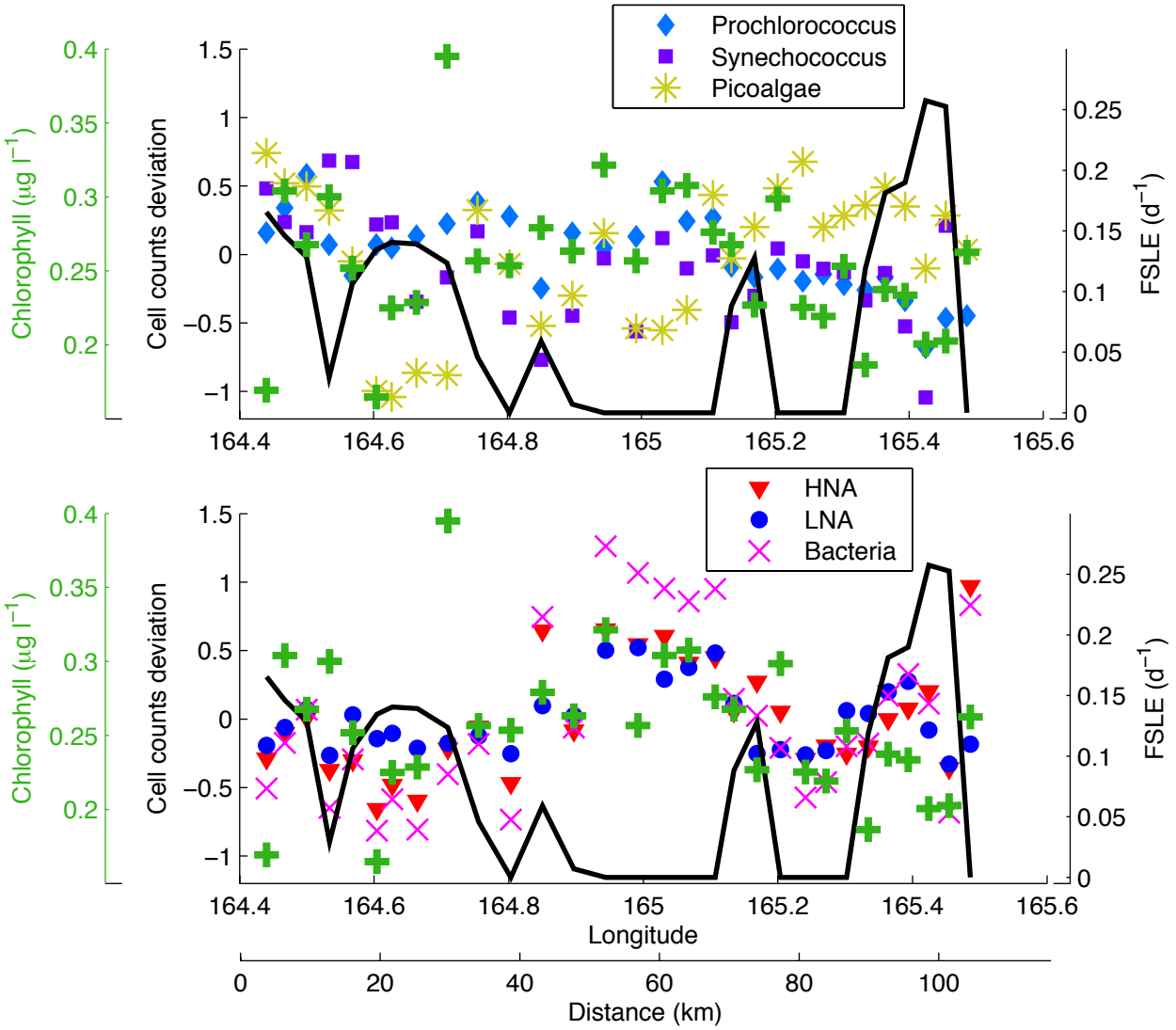




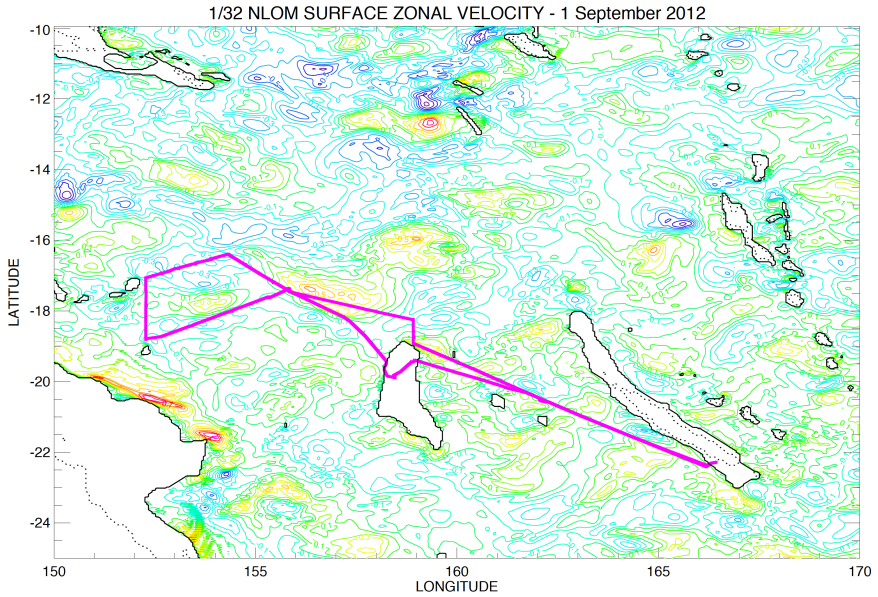


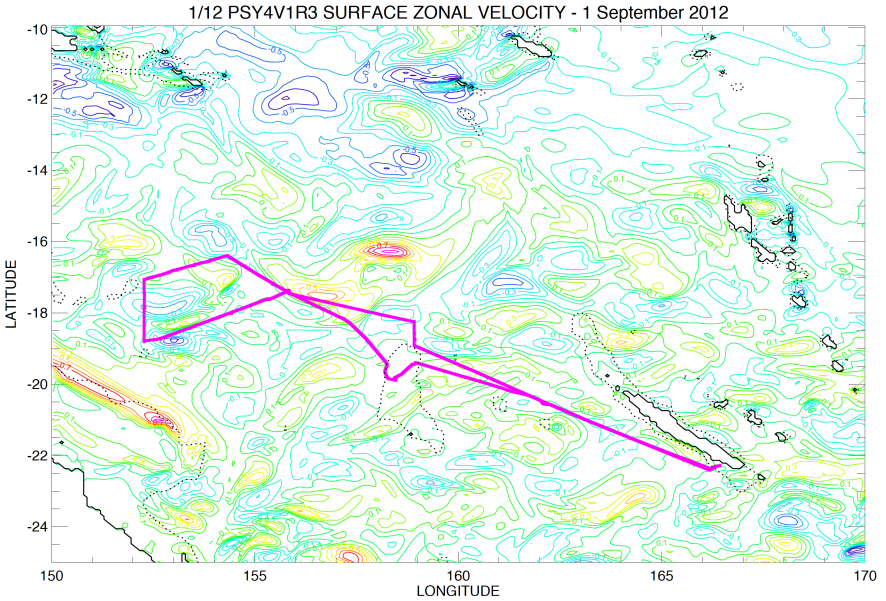
Partie I : Grande → sous-mésoéchelle

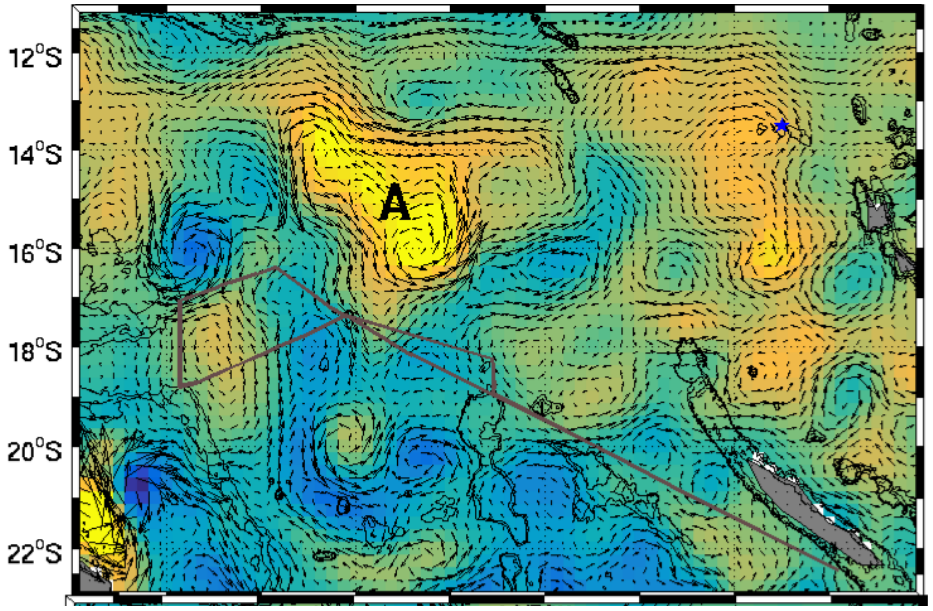


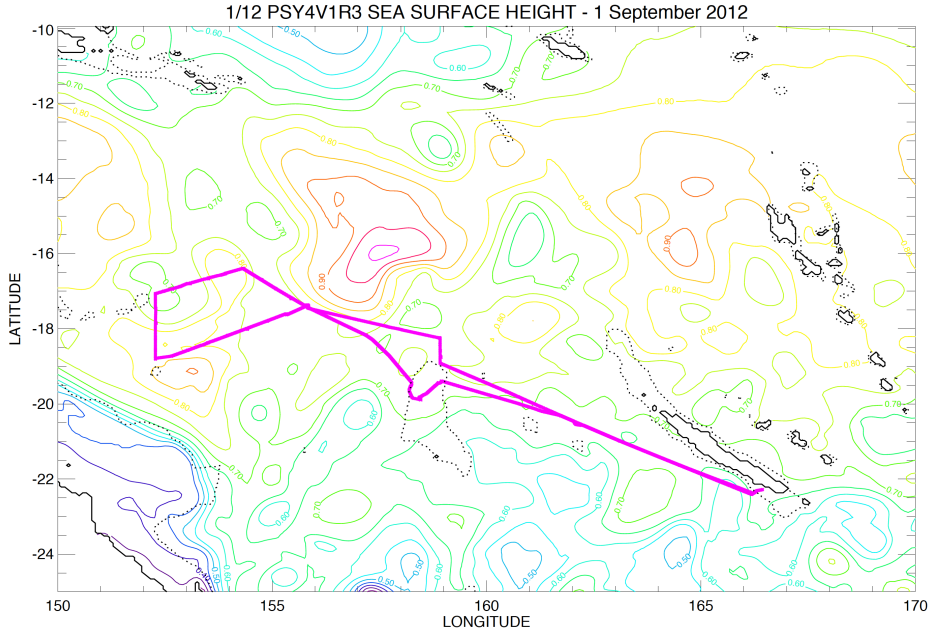


Sorties PSY4V1R3 *vs* NLOM

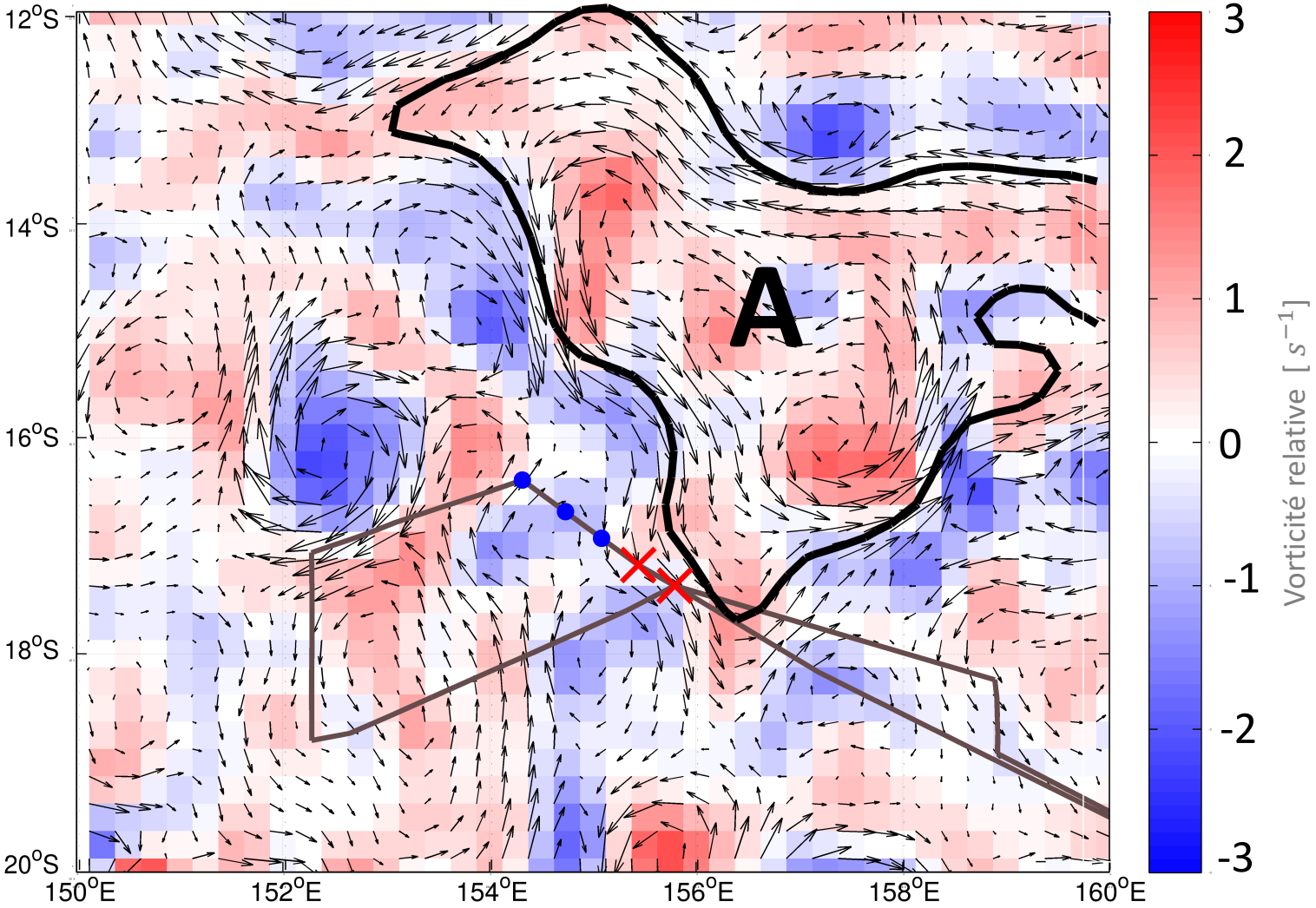


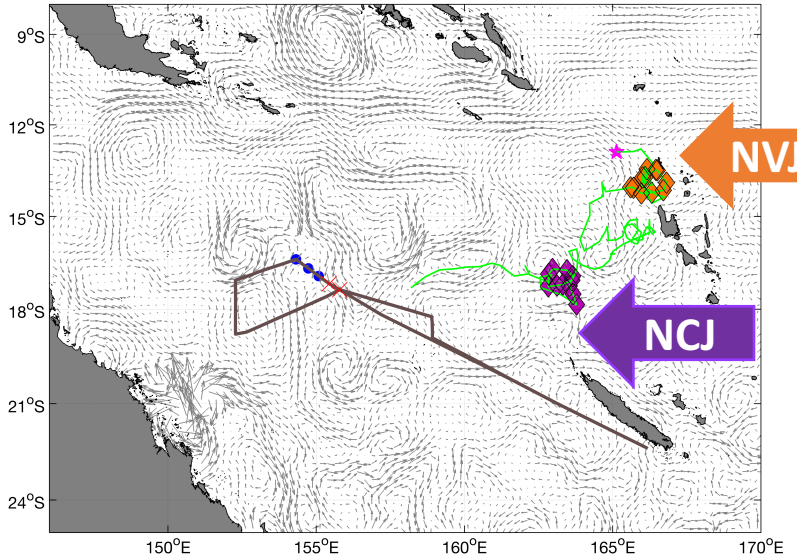




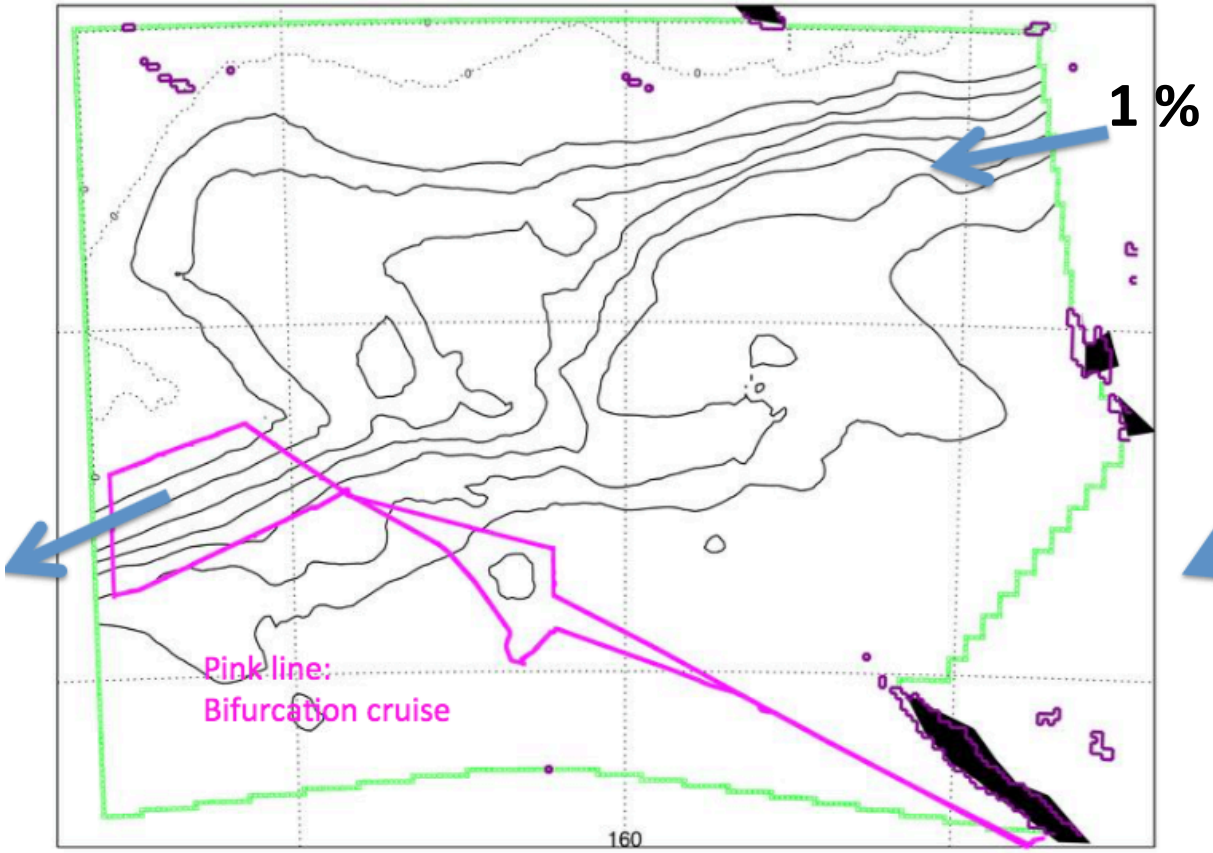


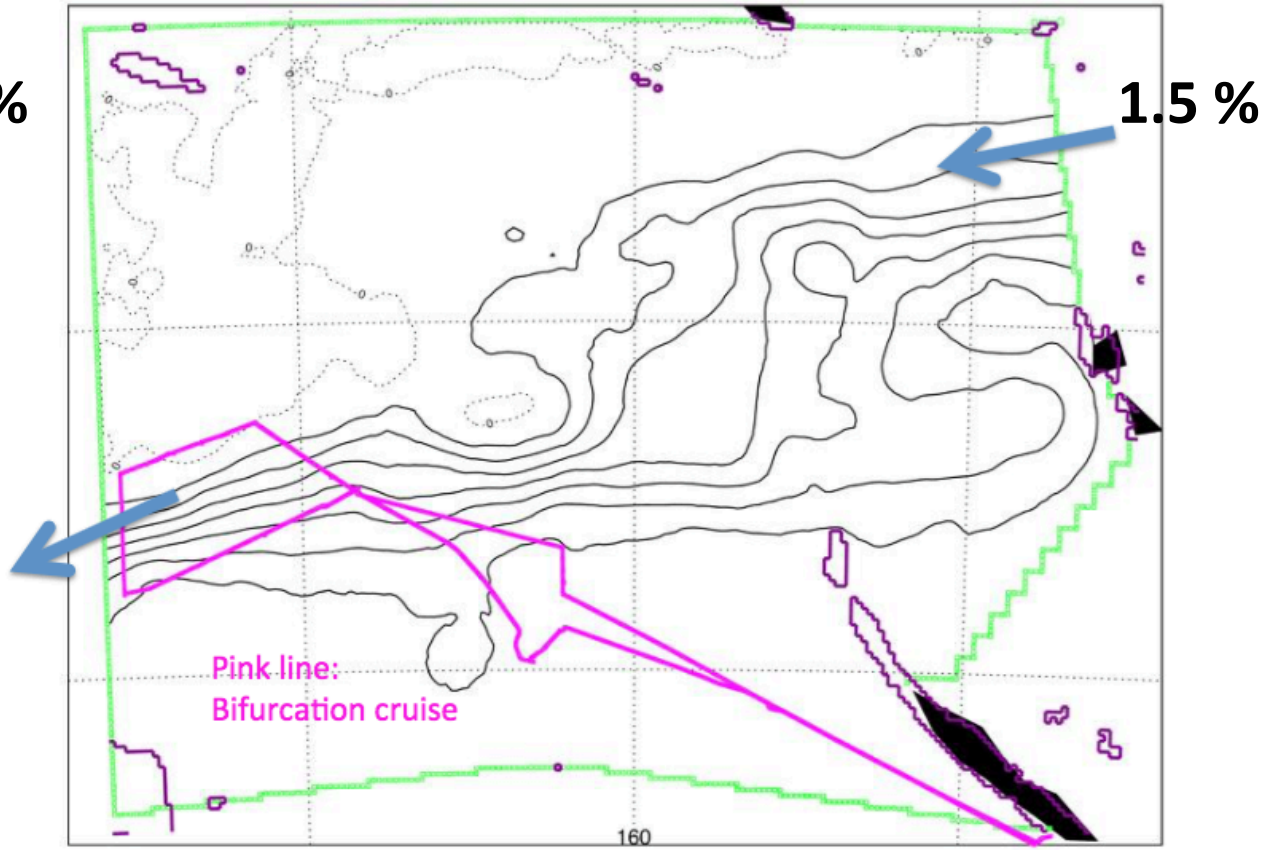
Structure anticyclonique *Bifurcation*





Sorties PSY4V1R3 surface – 100m

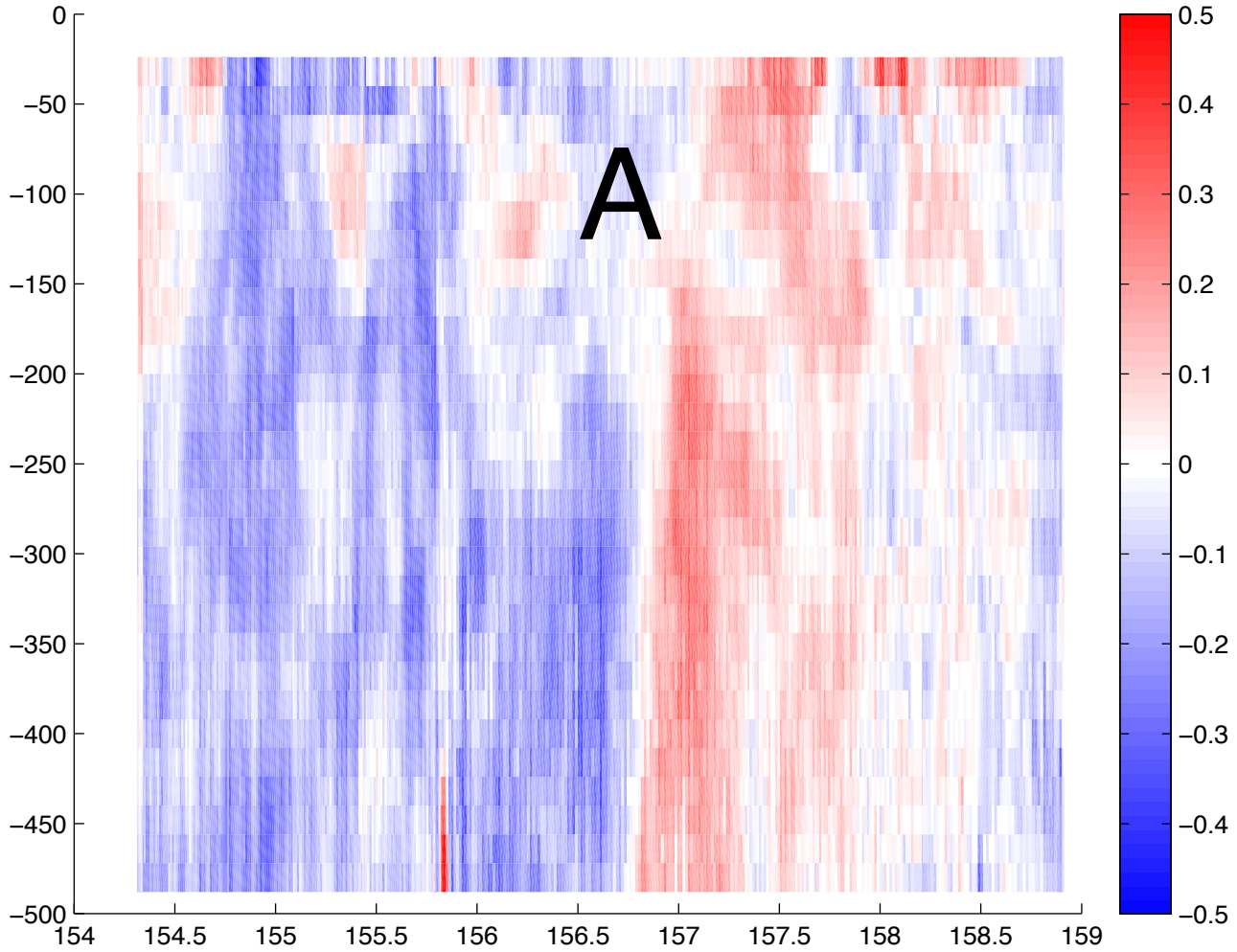


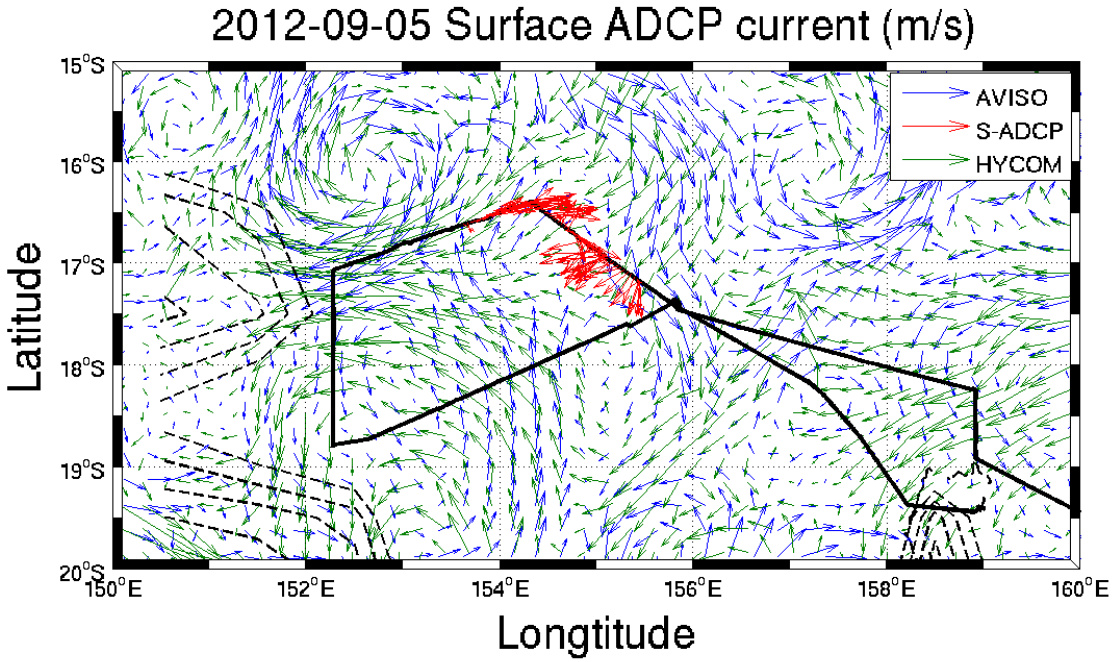


5m
Temps moyen de connexion 7 mois
Temps min de connexion 2.75 mois

100 m
Temps moyen de connexion 13 mois
Temps min de connexion 3.5 mois

Comparaison ADCP / courants satellites

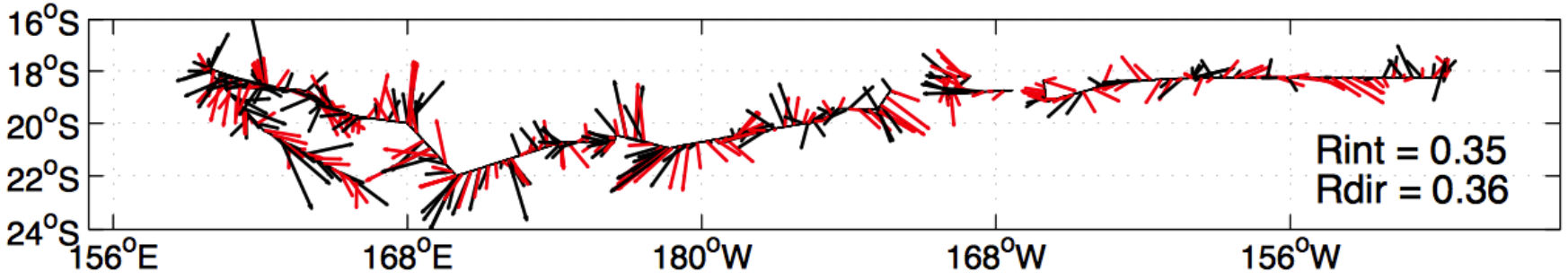




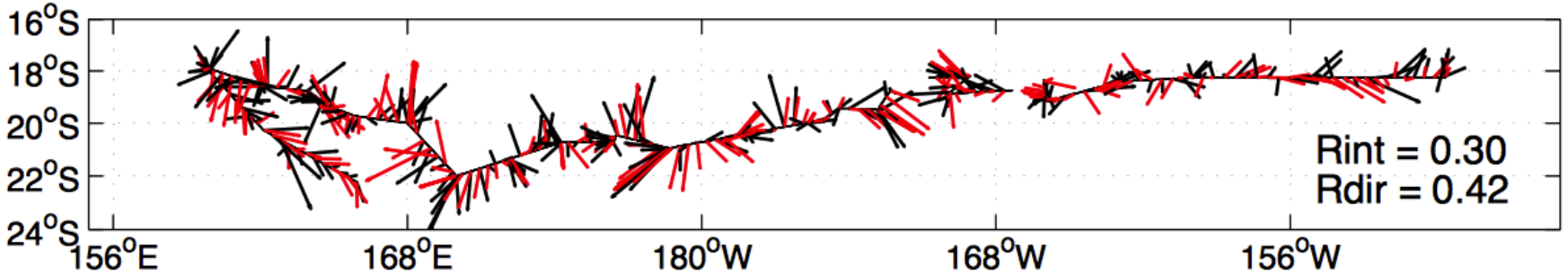
Comparaison ADCP / courants satellites

		50 m	100 m	150 m	**200 m**	250 m	300 m
150 k	R int	0,31	0,36	0,33	**0,35**	-	-
	R dir	0,32	0,33	0,37	**0,36**		
38 k	R int	0	0,2	0,28	**0,3**	0,28	0,27
	R dir	0,34	0,36	0,43	**0,42**	0,41	0,27

150k

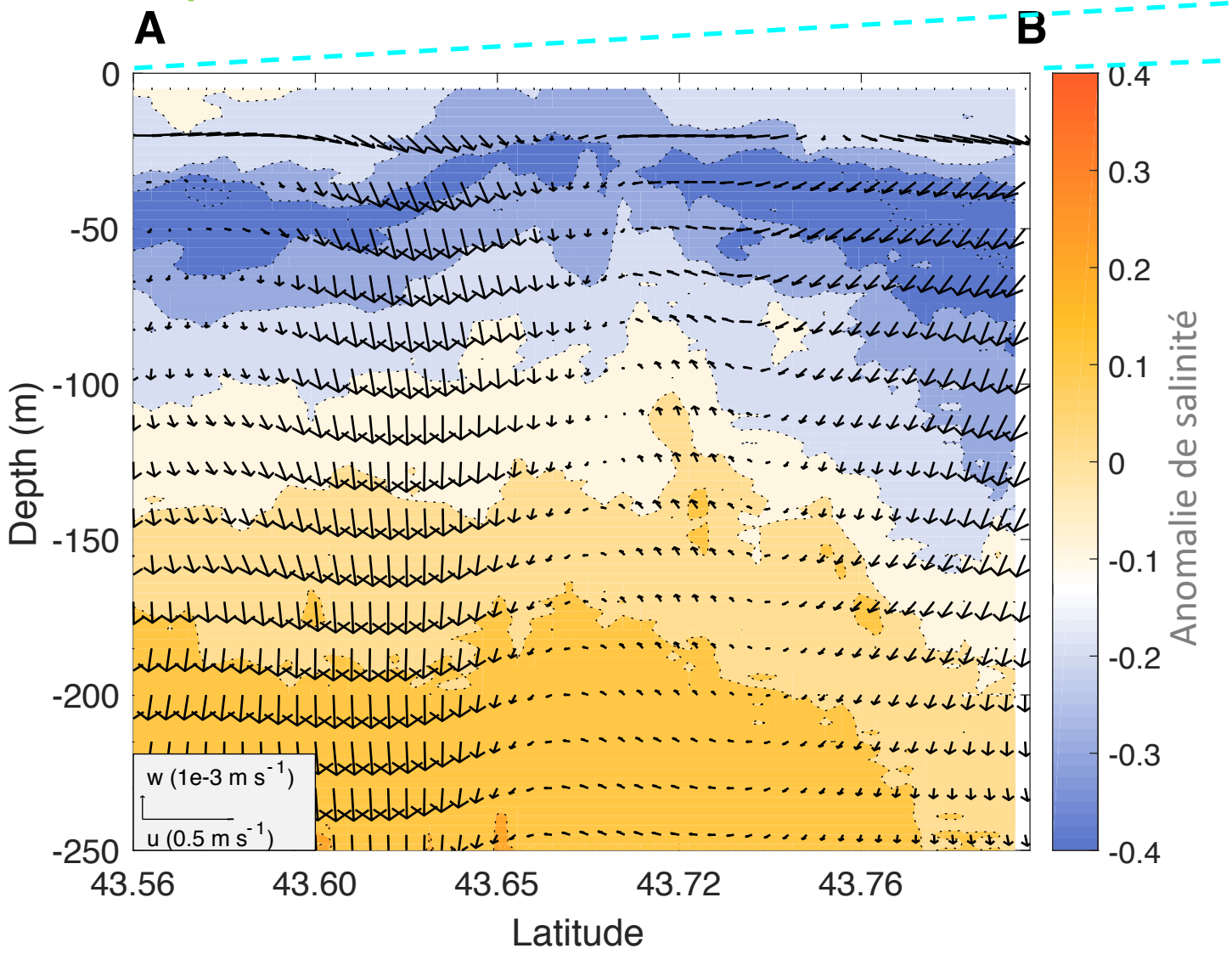


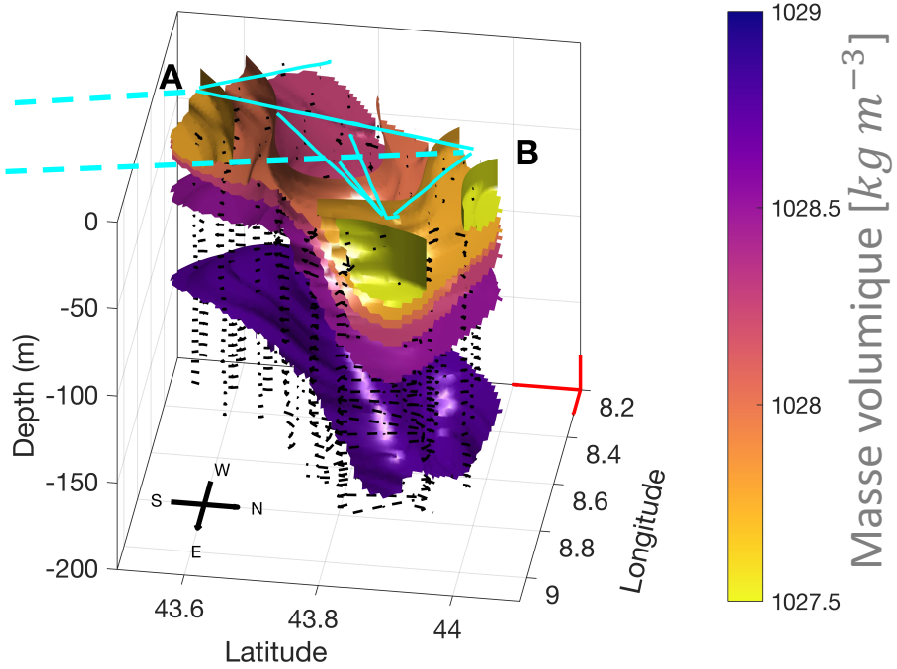
38k



Partie III : Distribution sous-mésoéchelle

Dynamique de la structure

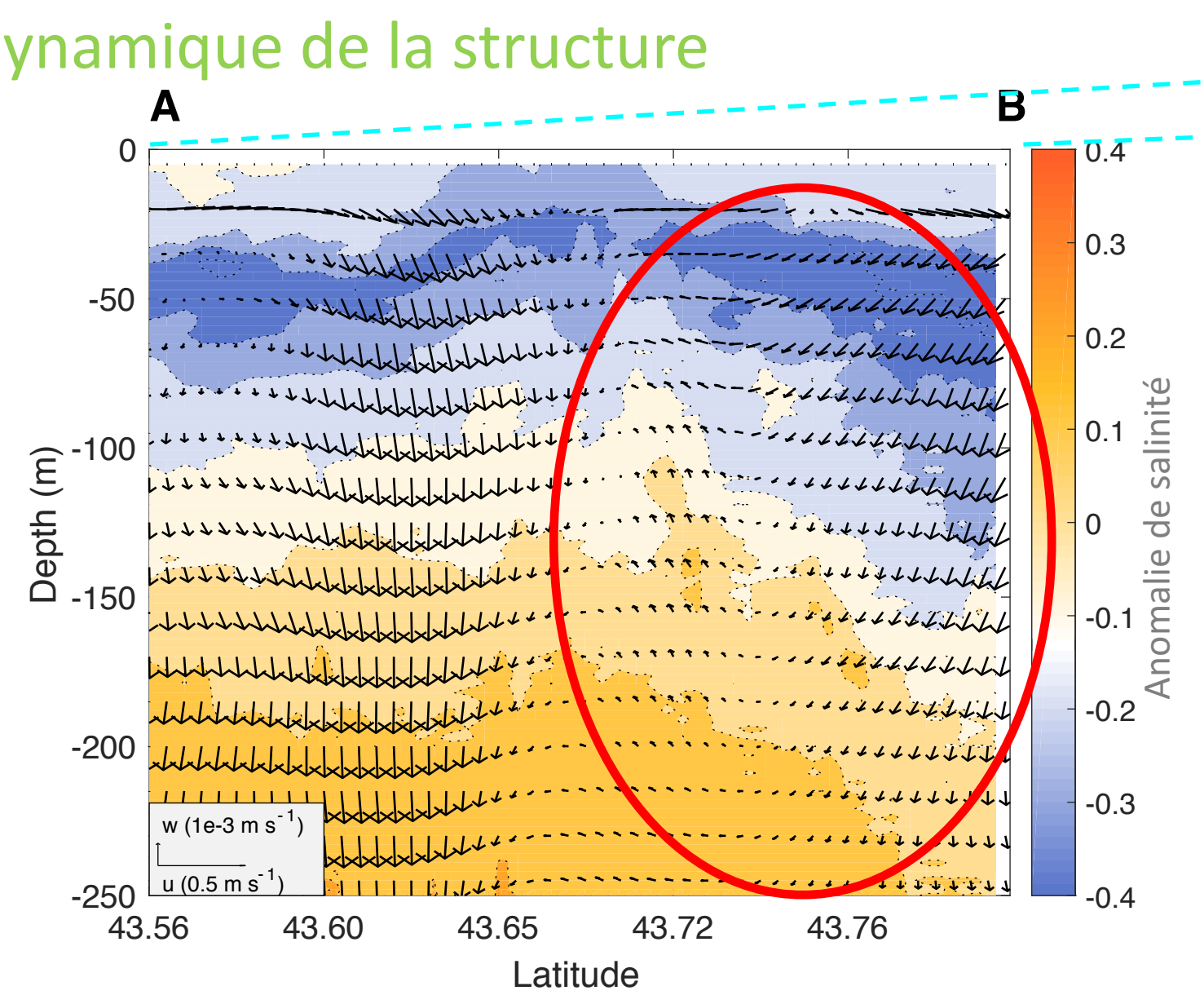


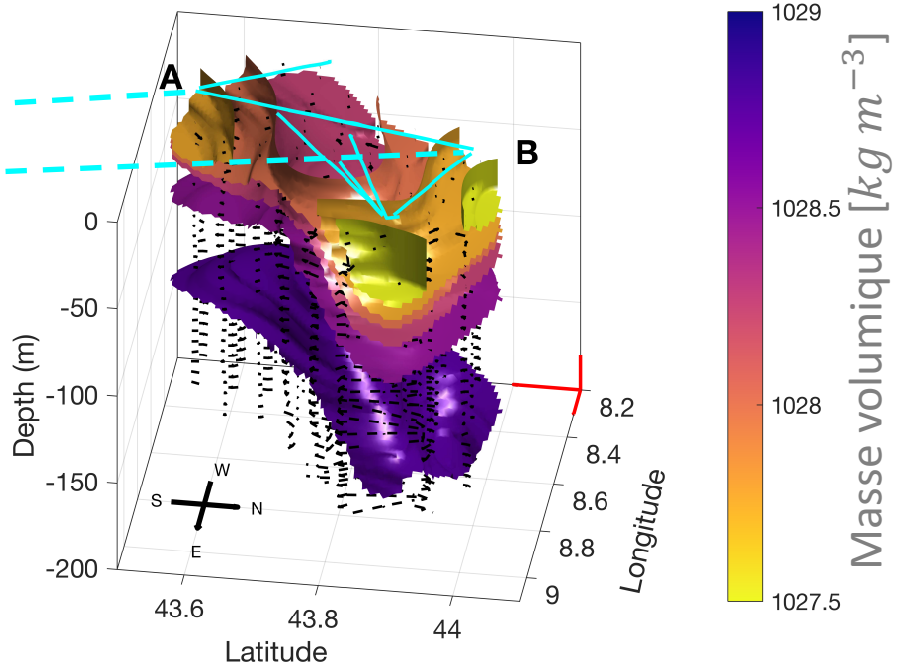


- Direction des vitesses verticales homogène sur la verticale (quadripôle)
- Vitesses verticales faibles et vers le fond au centre

Partie III : Distribution sous-mésoéchelle

Dynamique de la structure



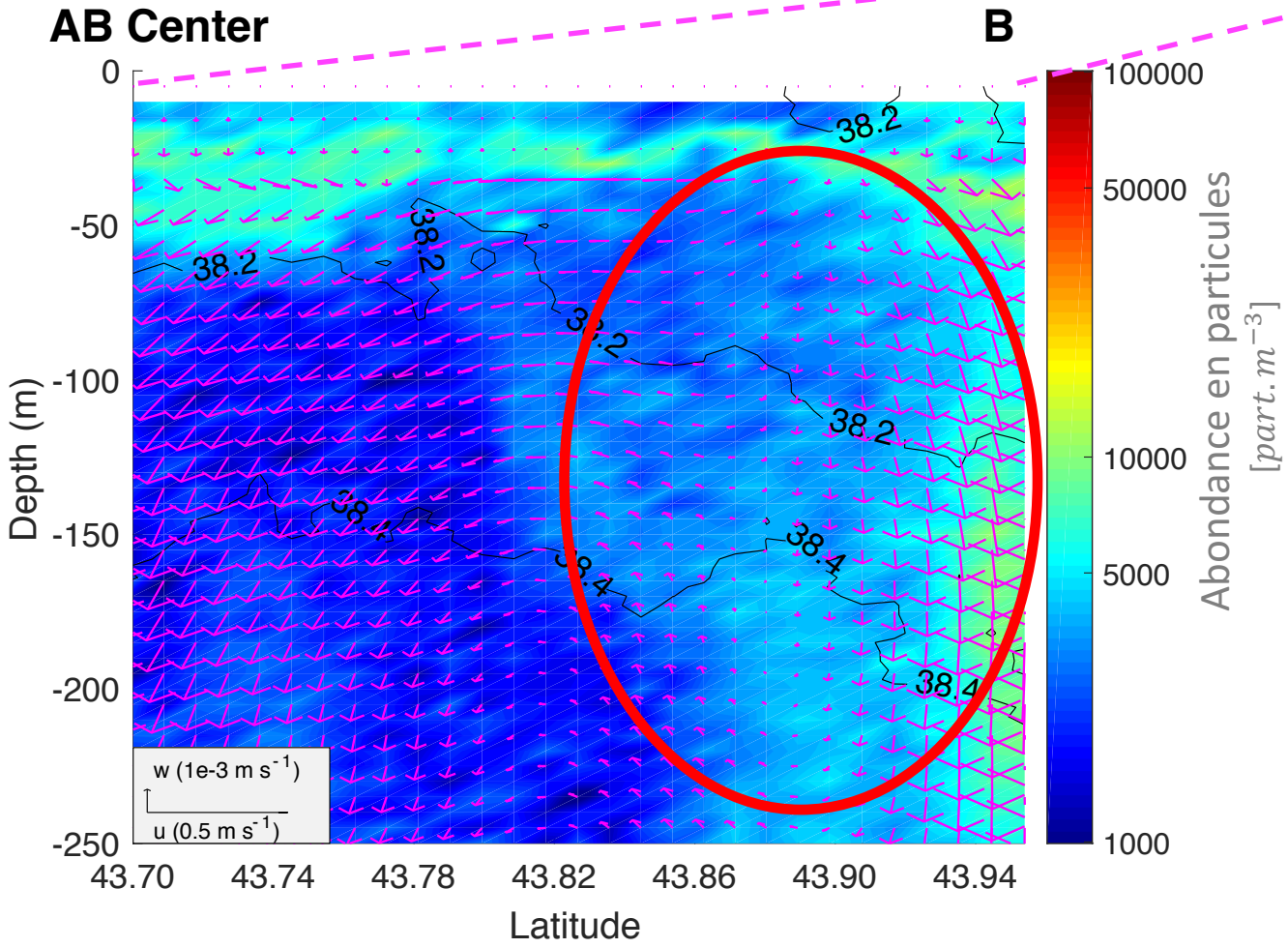


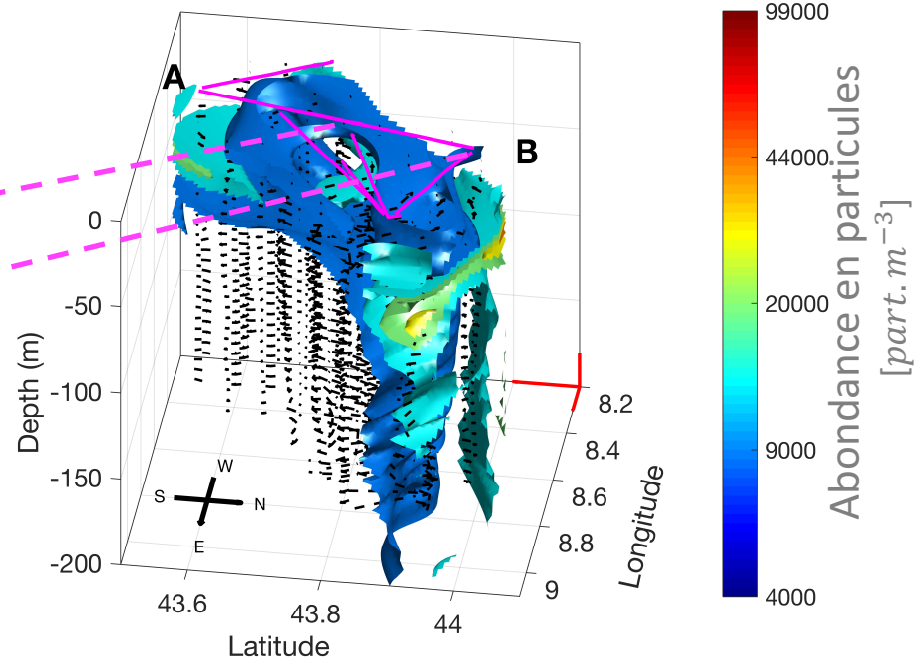
- Direction des vitesses verticales homogène sur la verticale (quadripôle)
- Vitesses verticales faibles et vers le fond au centre
- **Vitesses verticales vers la surface parallèles aux isopycnes**

Partie III : Distribution sous-mésoéchelle

Distribution particules

- ✓ Jeu de données indépendant avec des mesures d'abondance de particules en suspension (*Laser Optical Phytoplankton Counter*)



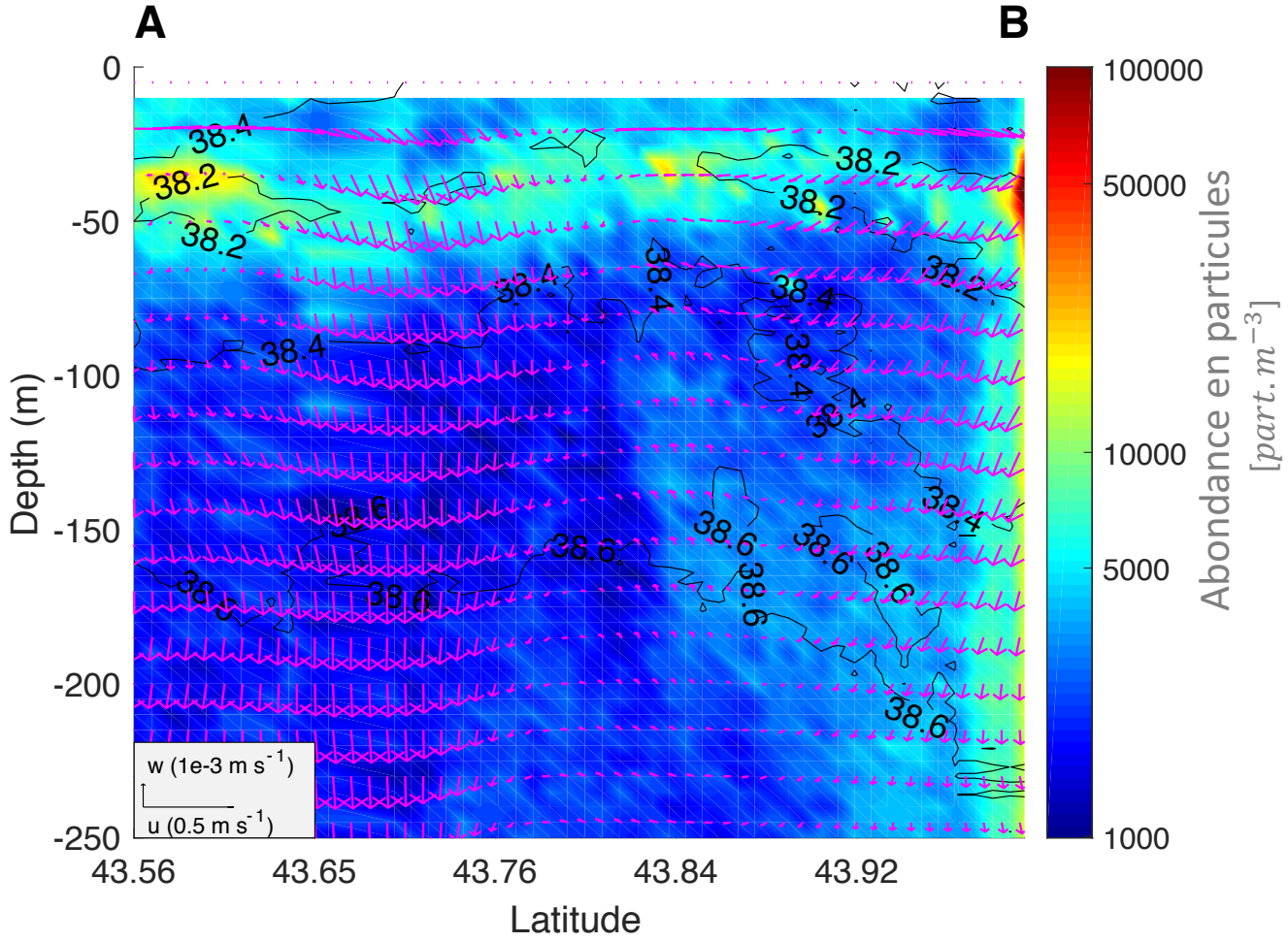


- ➢ Patch de particules qui correspond aux vitesses ascendantes
- ➢ **2 observations de cette cellule de circulation**
- ➢ **Validation des estimations de vitesse verticale**

Partie III : Distribution sous-mésoéchelle

Origine de cette distribution en particules

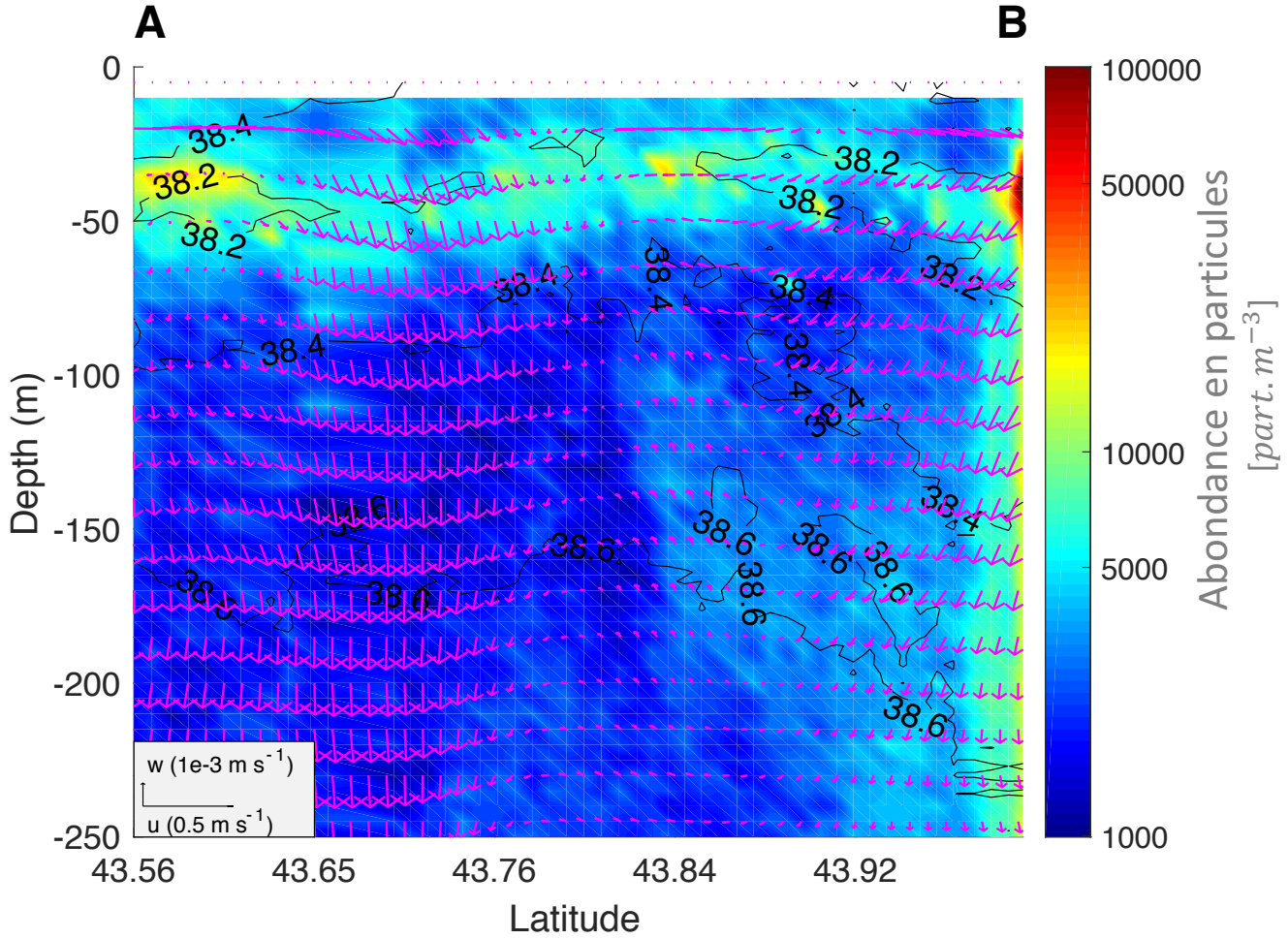
- ❑ Advection verticale entre la surface et le fond ?
- ❑ Masse d'eau d'origine différente advectée jusqu'au bord de la structure ?



Partie III : Distribution sous-mésoéchelle

Origine de cette distribution en particules

- ❑ Advection verticale entre la surface et le fond ?
- ❑ Masse d'eau d'origine différente advectée jusqu'au bord de la structure ?



✓ Classe de taille des particules (100 – 260 µm) [Guidi et al., 2008]

✗ Pas d'advection similaire côté A alors que les vitesses verticales sont du même ordre de grandeur

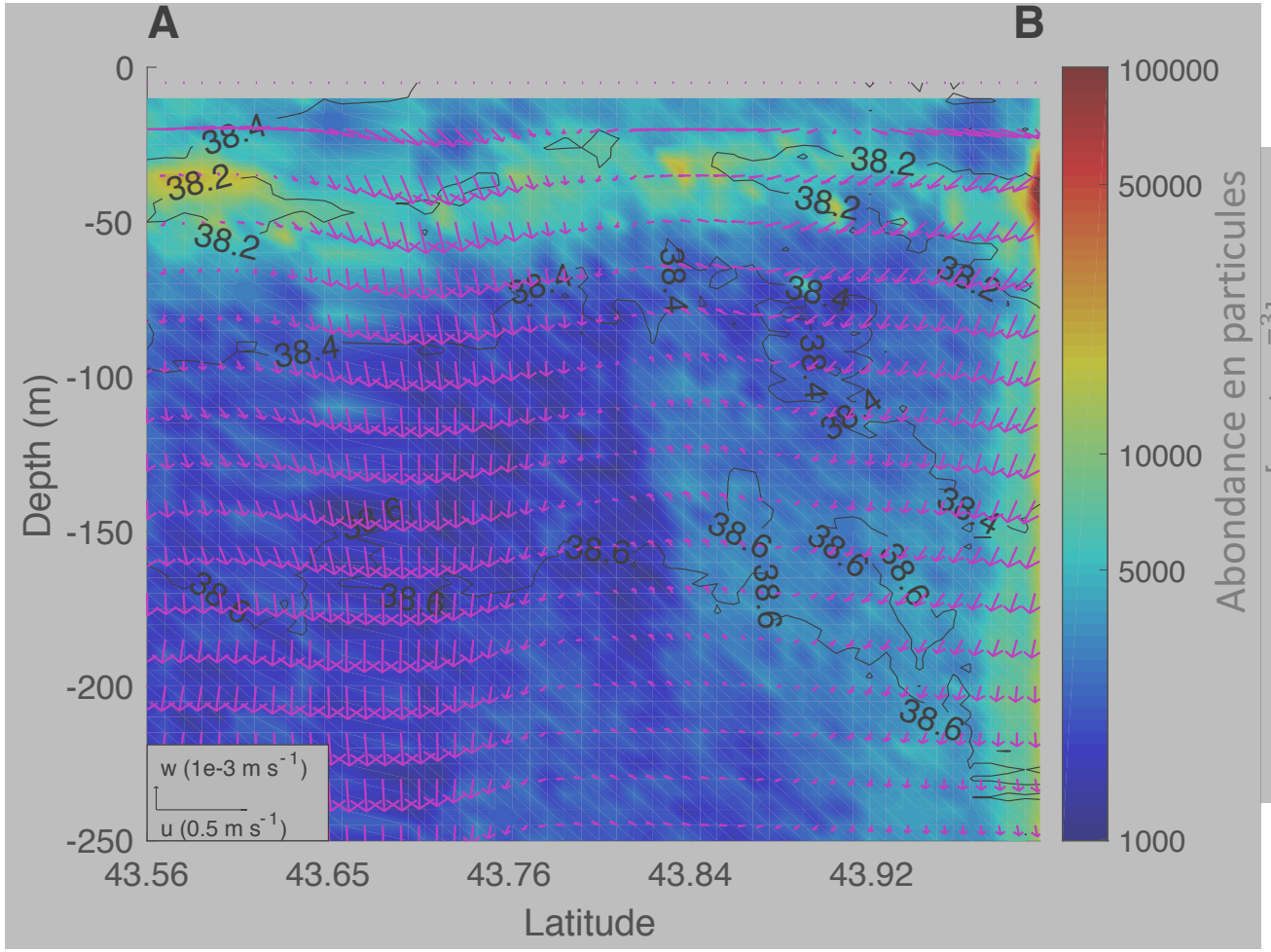
✗ Flux de 130 m j^{-1} ⟶ lessivage

Partie III : Distribution sous-mésoéchelle

Origine de cette distribution en particules

☒ Advection verticale entre la surface et le fond ?

☐ Masse d'eau d'origine différente advectée jusqu'au bord de la structure ?



✓ Classe de taille des particules (100 – 260 µm) [Guidi et al., 2008]

✗ Pas d'advection similaire côté A alors que les vitesses verticales sont du même ordre de grandeur

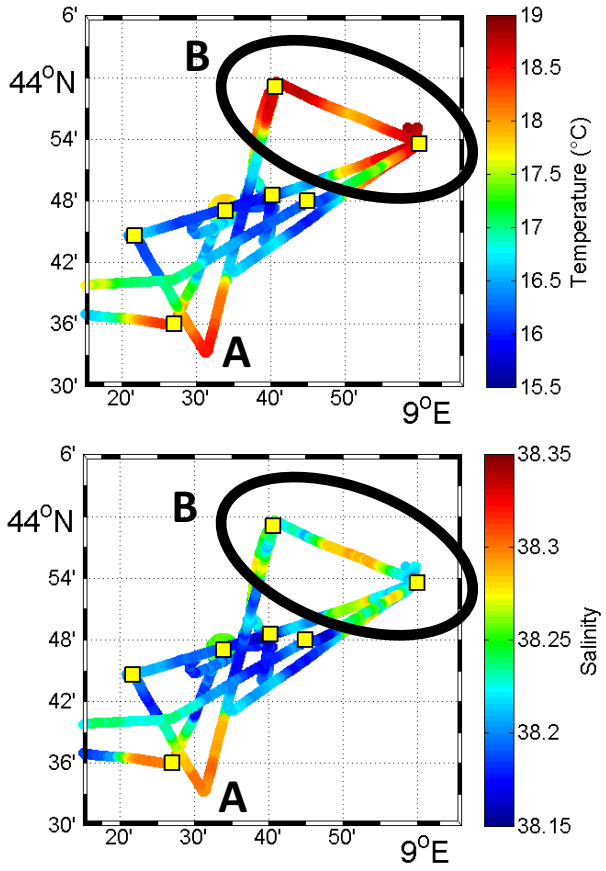
✗ Flux de 130 m j^{-1} ⟶ lessivage

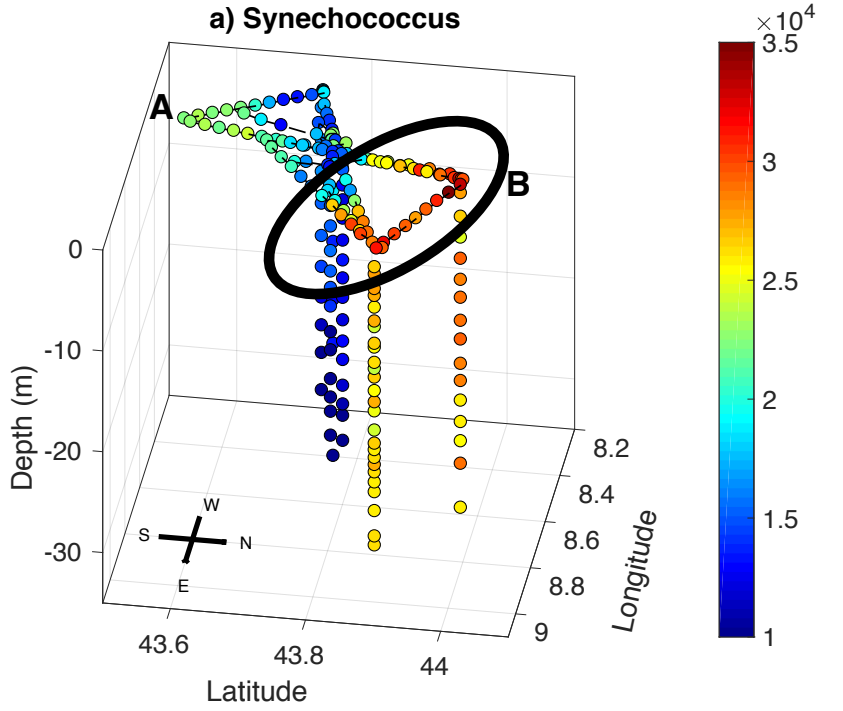
Partie III : Distribution sous-mésoéchelle

Origine de cette distribution en particules

✗ Advection verticale entre la surface et le fond ?

❑ Masse d'eau d'origine différente advectée jusqu'au bord de la structure ?



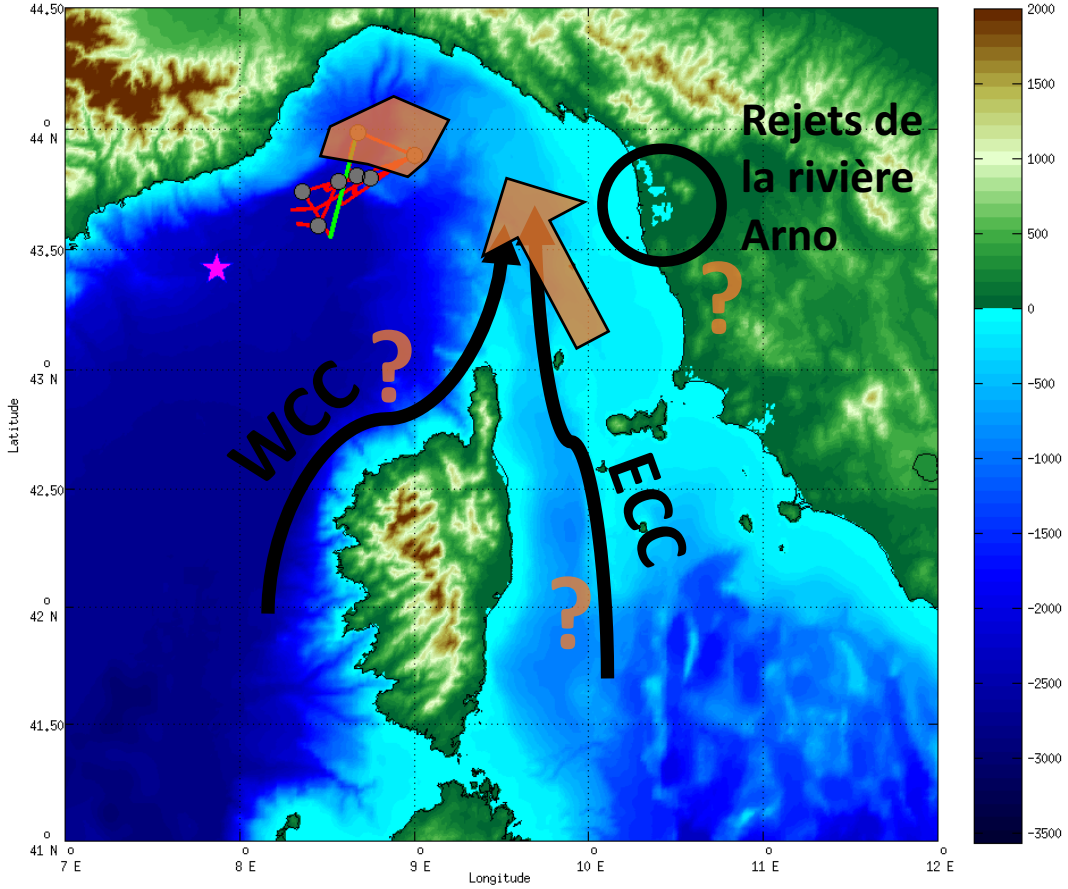


- ✓ Composition du signal en particules: matière non-vivante
- ✓ Propriétés physiques différentes côté B (S < et T >)
- ✓ Population distincte de *Synechococcus* du côté B

[Marrec et al., 2008]

Partie III : Distribution sous-mésoéchelle

Origine de cette distribution en particules

❌ Advection verticale entre la surface et le fond ?

☑ Masse d'eau d'origine différente advectée jusqu'au bord de la structure ?