

---

# Soutenance de stage

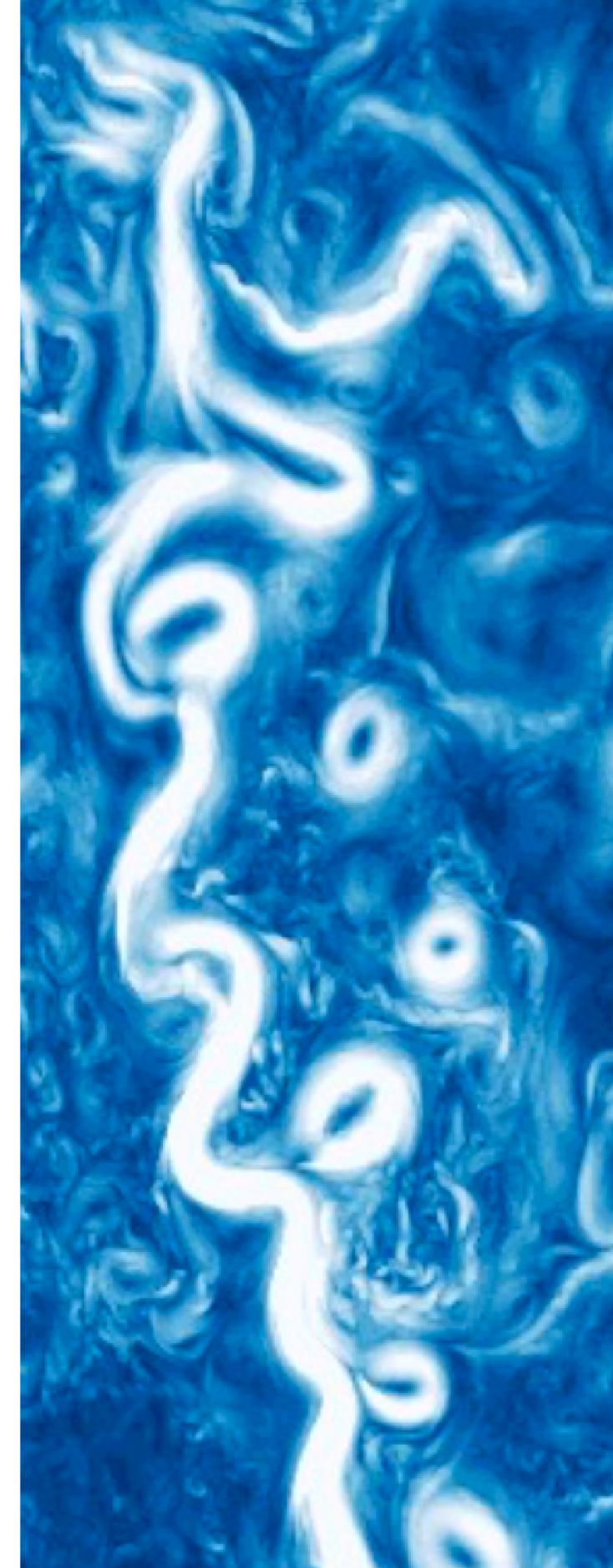
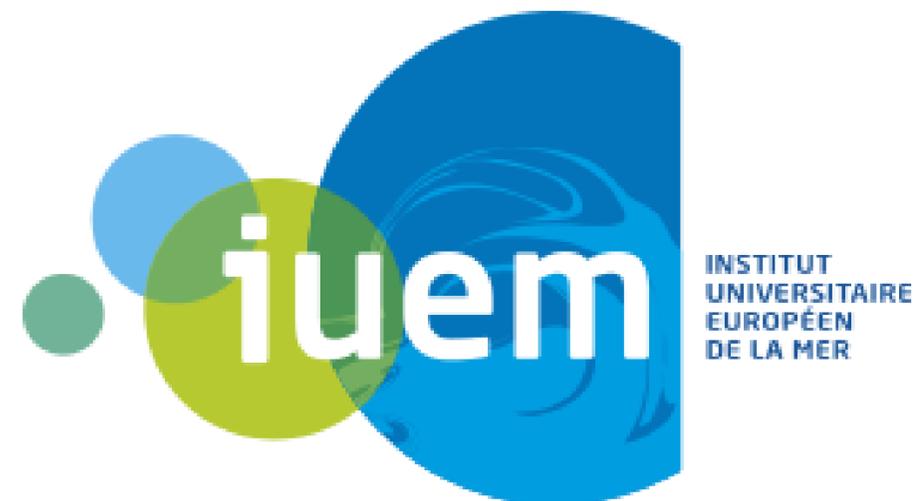
---

Échange d'énergie entre circulation moyenne et  
circulation turbulente dans le Gulf Stream à  
partir d'observations satellites

---

## Encadrants :

Jonathan Gula  
Quentin Jamet



# Contexte

- **MKE** et **EKE** : énergie cinétique, circulation **moyenne** et **turbulente**.
- **MEC** et **EDDYFLX** : transferts d'énergie cinétique, circulation **moyenne** et **turbulente**.
- Non-localité : Contributions des deux termes (**MEC** et **EDDYFLX**), non-nuls.

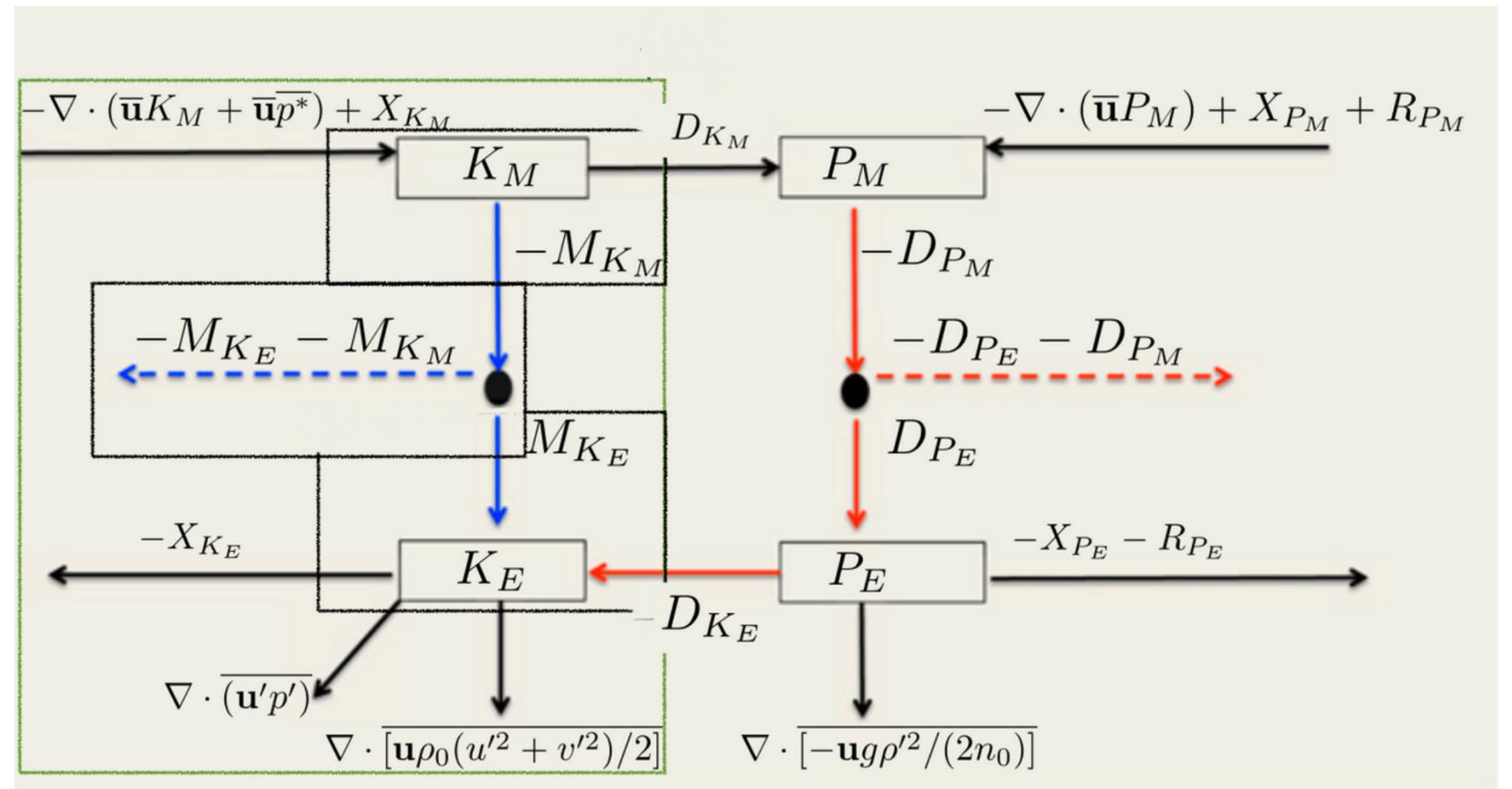


FIG. 1a : Chen, R., Flierl, G. R., and Wunsch, C. (2014).

---

# Cadre théorique

- Approximations :
  - a. Équilibre hydrostatique
  - b. Incompressibilité
  - c. Approximation de Boussinesq
  - d. Non visqueux

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla_h u - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla_h v + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

# Cadre théorique

## Décomposition de Reynolds :

$$(u, v)(x, y, z, t) = (\bar{u}, \bar{v})(x, y, z) + (u', v')(x, y, z, t)$$

$$p(x, y, z, t) = p(z) + p'(x, y, z, t)$$

## Propriétés :

$$(\bar{u}', \bar{v}', \bar{p}')(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

$$f = \bar{f} + f' \quad \longrightarrow \quad \overline{f'g'} = \overline{fg} - \bar{f} \cdot \bar{g} \quad (2)$$

$$g = \bar{g} + g' \quad \longrightarrow \quad \overline{fg} = \bar{f}\bar{g} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - f \bar{v} &= \boxed{\begin{matrix} \frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} & \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} \end{matrix}} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + f \bar{u} &= \boxed{\begin{matrix} \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial x} & \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} \end{matrix}} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \end{aligned}$$



$$\mathcal{M}(\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}) = \begin{pmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} \end{pmatrix}$$

## Contraintes de Reynolds

# Cadre théorique

## Énergie cinétique :

$$E_k = \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$$

Décomposition de Reynolds

$$E_k = \underbrace{\frac{1}{2}\rho_0(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)}_{MKE} + \underbrace{\frac{1}{2}\rho_0(u'^2 + v'^2)}_{EKE} + \underbrace{\rho_0(u'\bar{u} + v'\bar{v})}_{CKE}$$

Moyenne temporelle

$$\bar{E}_k = \underbrace{\frac{1}{2}\rho_0(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)}_{MKE} + \underbrace{\frac{1}{2}\rho_0(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})}_{\overline{EKE}}$$

## Transferts d'énergie cinétique:

$$MEC : -\rho_0[\bar{u}\nabla \cdot (\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}) + \bar{v}\nabla \cdot (\overline{\mathbf{u}'\mathbf{v}'})]$$

$$EDDYFLX : -\rho_0[\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} + \overline{\mathbf{u}'\mathbf{v}'}\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}]$$

$$EDDYFLX + MEC = \underbrace{-\nabla(\overline{u'CKE})}_{DIVEF}$$

---

# Cadre théorique

- **EDDYFLX** (EDDY momentum FLuX) : accélération de l'écoulement moyen dû au travail des contraintes de Reynolds entre les écoulements moyen et perturbé.
  - **MEC** (Mean-to-Eddy energy Conversion) : production d'énergie cinétique turbulente dû aux instabilités *barotropes*.
  - **DIVEF** (DIVERgence of Eddy Flux) : décrit la non-localité des interactions entre la circulation moyenne et turbulente.
-

---

# Méthodes et données

- Données satellitaires :

1. **Deux satellites** : TOPEX/Poseidon et ERS-1/2 (période : **1er janvier 1995 - 31 décembre 2020**).
2. **Constellation de satellites** : Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T/P, ENVISAT, GFO, ERS-1/2 (période : **1er janvier 2000 - 30 mars 2012**).
3. Nous considérerons la période **1995 - 2007** (TOPEX/Poseidon et ERS-1/2) pour être **en adéquation avec les travaux de Greatbatch et al. .**

- Données de simulation :

1. **GIGATL6** du modèle **CROCO** sur la période **2009 - 2011**. Utilisation des librairies python *xarray* et *xgcm* (*General Circulation Model Postprocessing with xarray*).
-

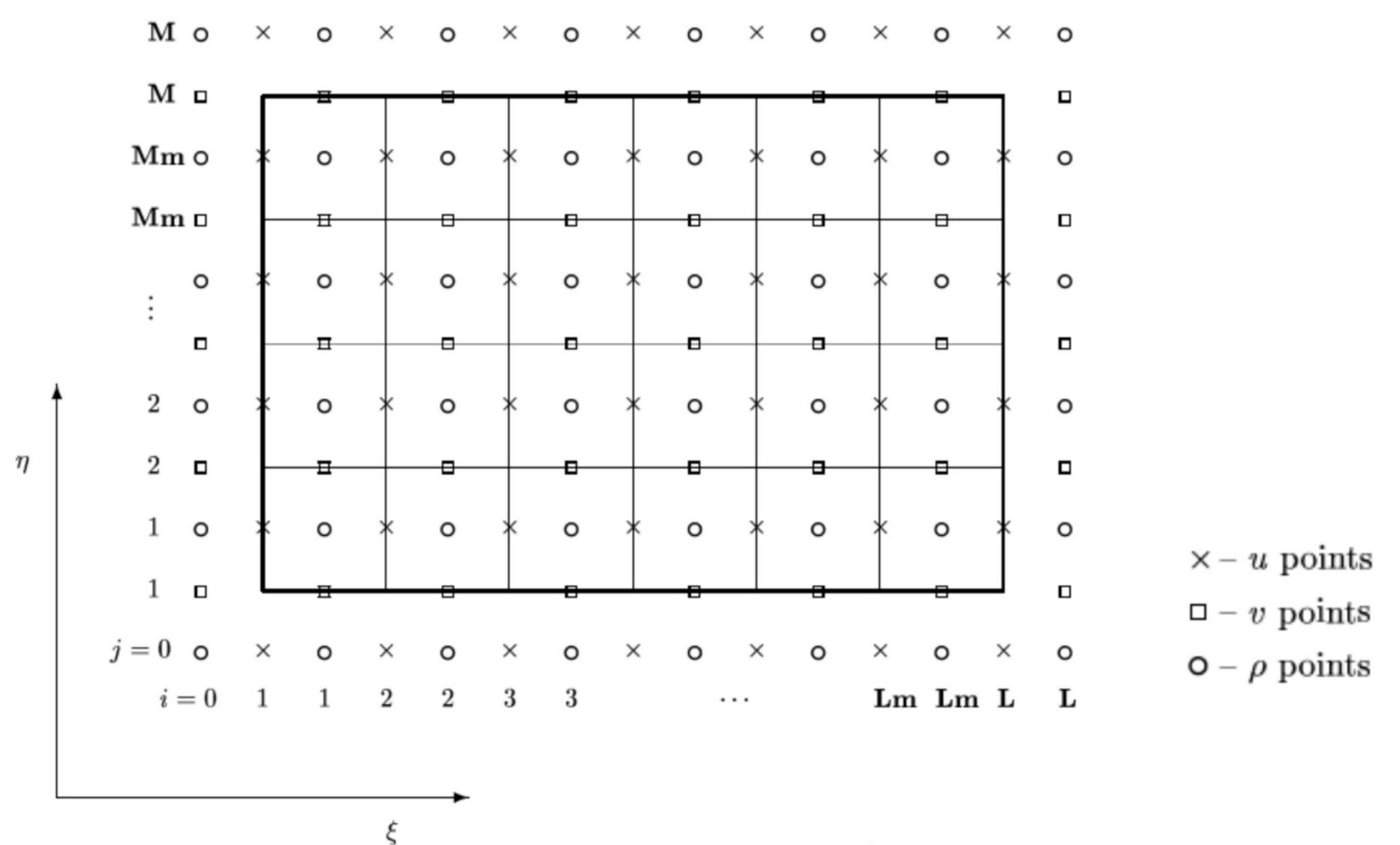
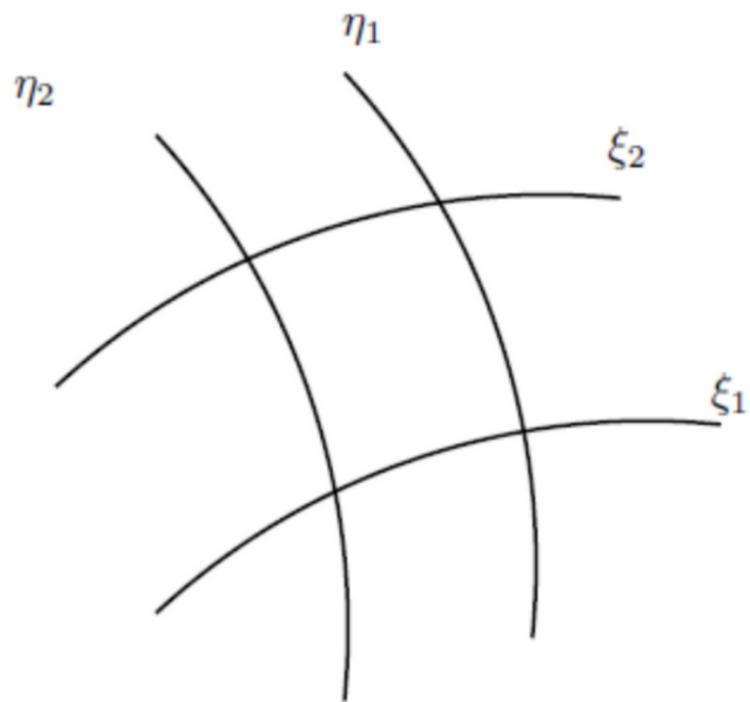
# Méthodes et données

Données altimétriques : u et v colocalisés au centre des grilles. Résolution : **1/4 de degré**.

Données de simulation : u et v localisés sur une grille **Arakawa C curviligne**. Résolution : **6km**.

$$(ds)_\xi = \left(\frac{1}{m}\right) d\xi$$

$$(ds)_\eta = \left(\frac{1}{n}\right) d\eta$$



# Résultats

## Contrainte de Reynolds : $\overline{u'^2}$

- Structure **cohérente**.
- Contrainte **moins intense** dans les travaux de *Greatbatch et al.* .
- Terme prédominant après *Cap Hatteras*.

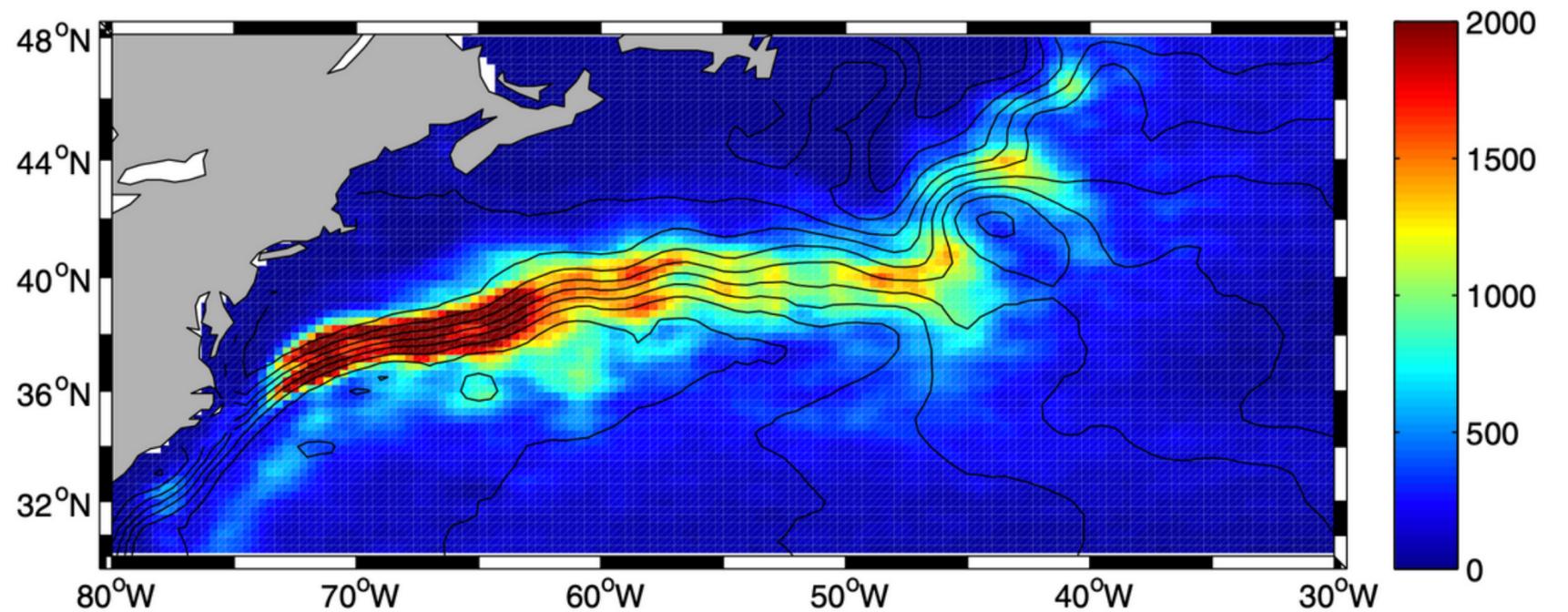
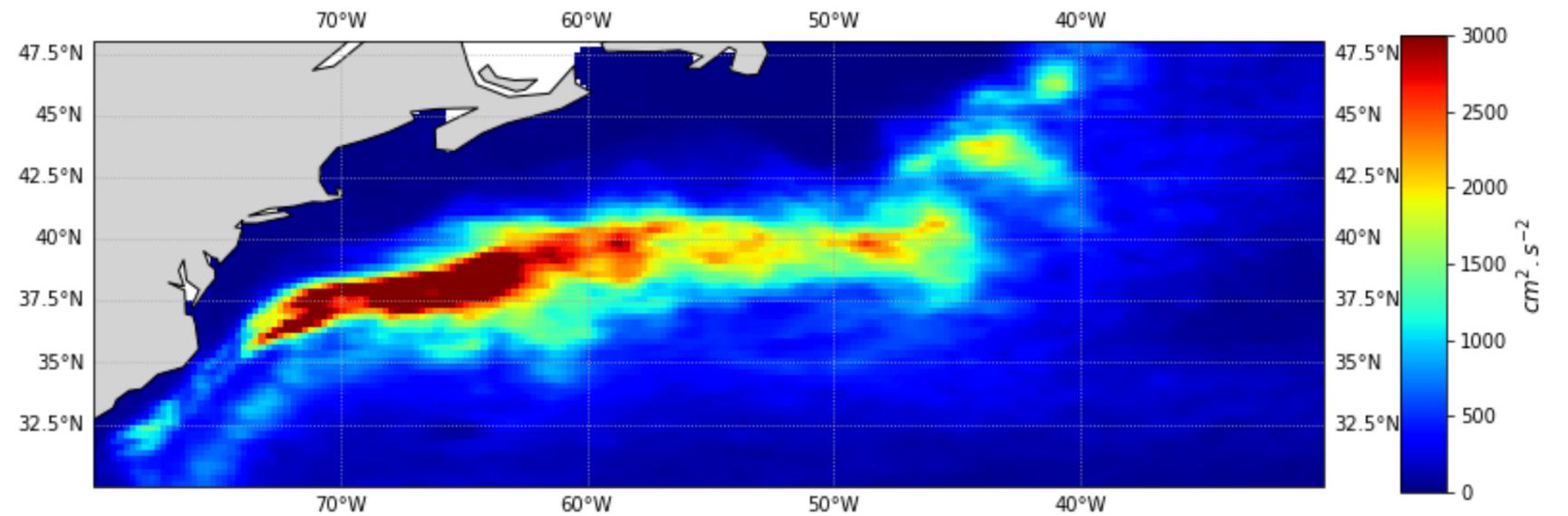


Fig. 4 : Greatbatch et al. (2012)

# Résultats

## Contrainte de Reynolds : $\overline{v'u'}$

- Structure **cohérente** (double blade).
- Contrainte **plus intense** dans les travaux de *Greatbatch et al.* .
- Terme **intense** après *Cap Hatteras*, puis **fluctuation**.

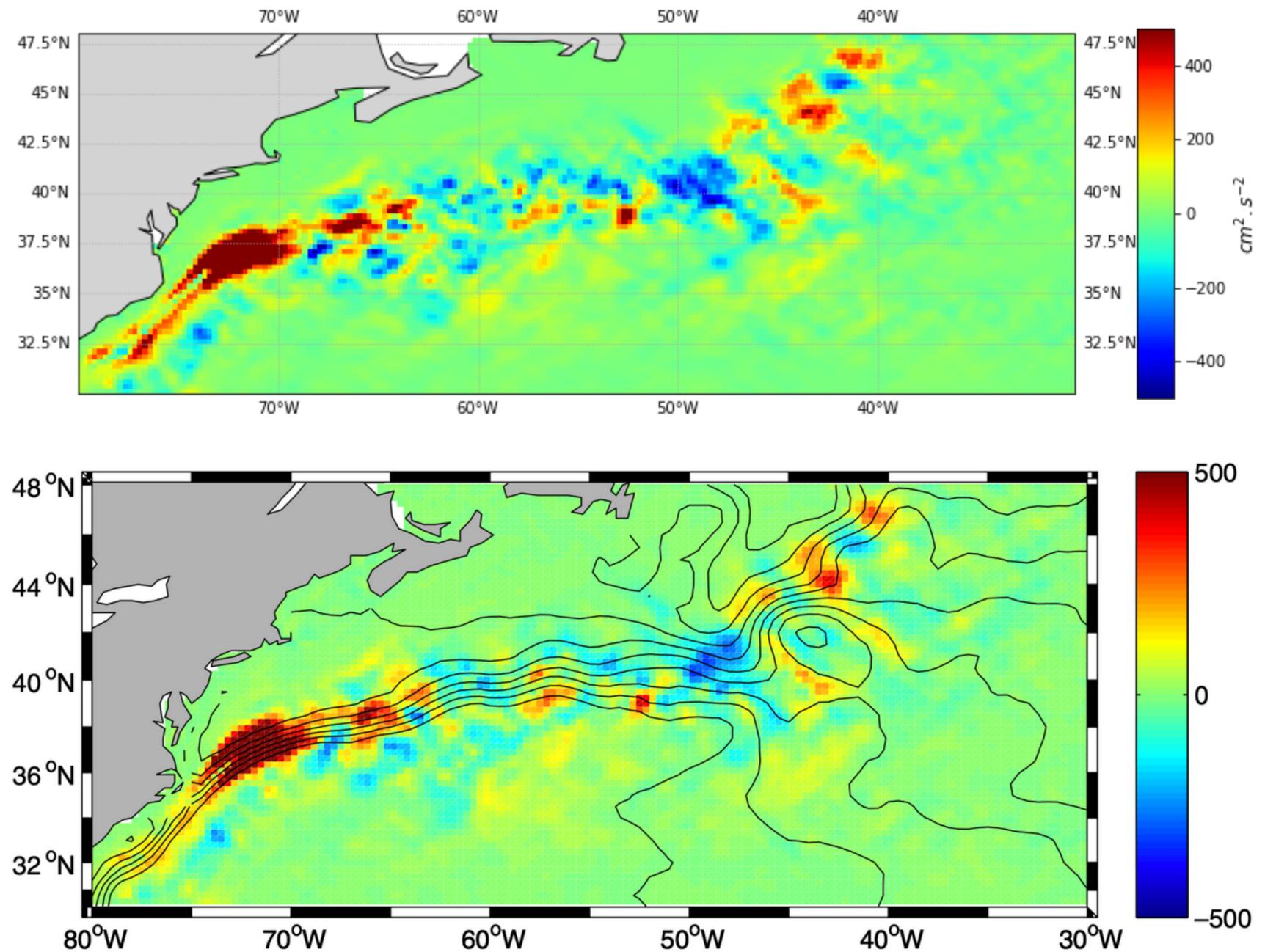


Fig. 2 : Greatbatch et al. (2012)

# Résultats

Contrainte de Reynolds :  $\overline{v'^2}$

- Structure **cohérente** (longiligne).
- Contrainte **moins intense** dans les travaux de *Greatbatch et al.* .
- Terme **intense** dans la région très turbulente.

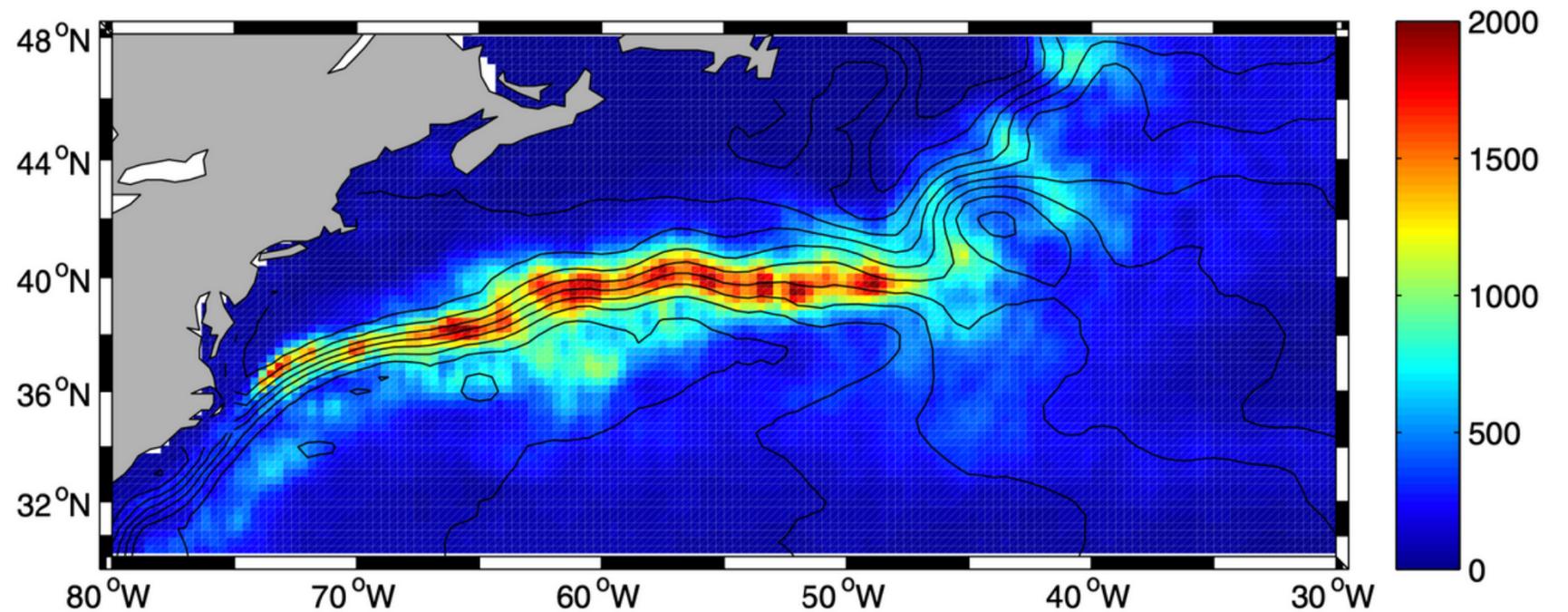
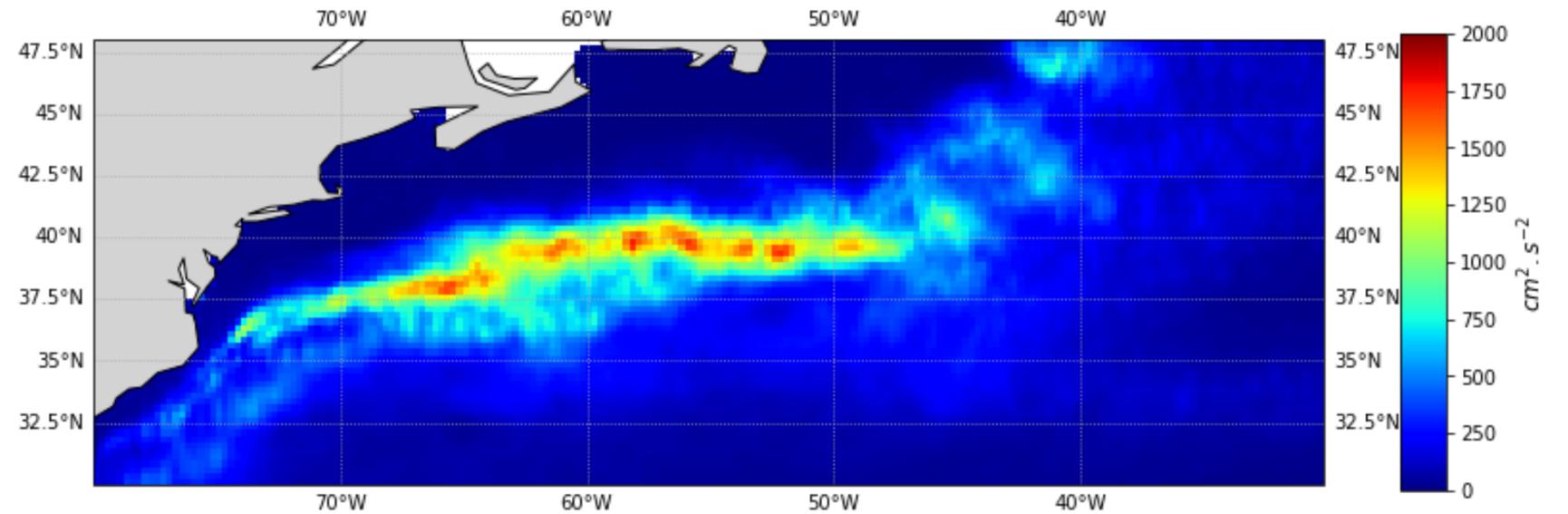
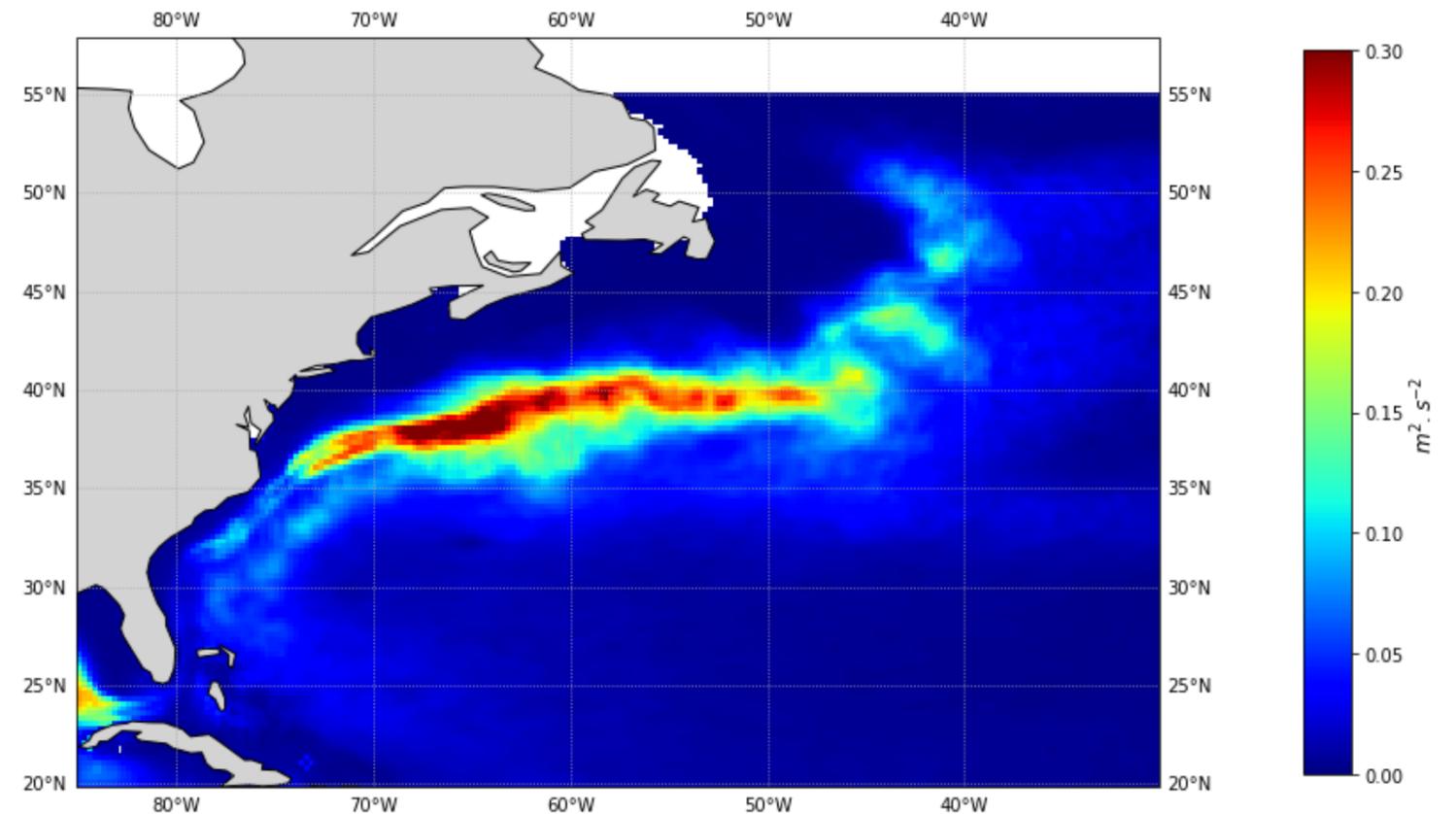
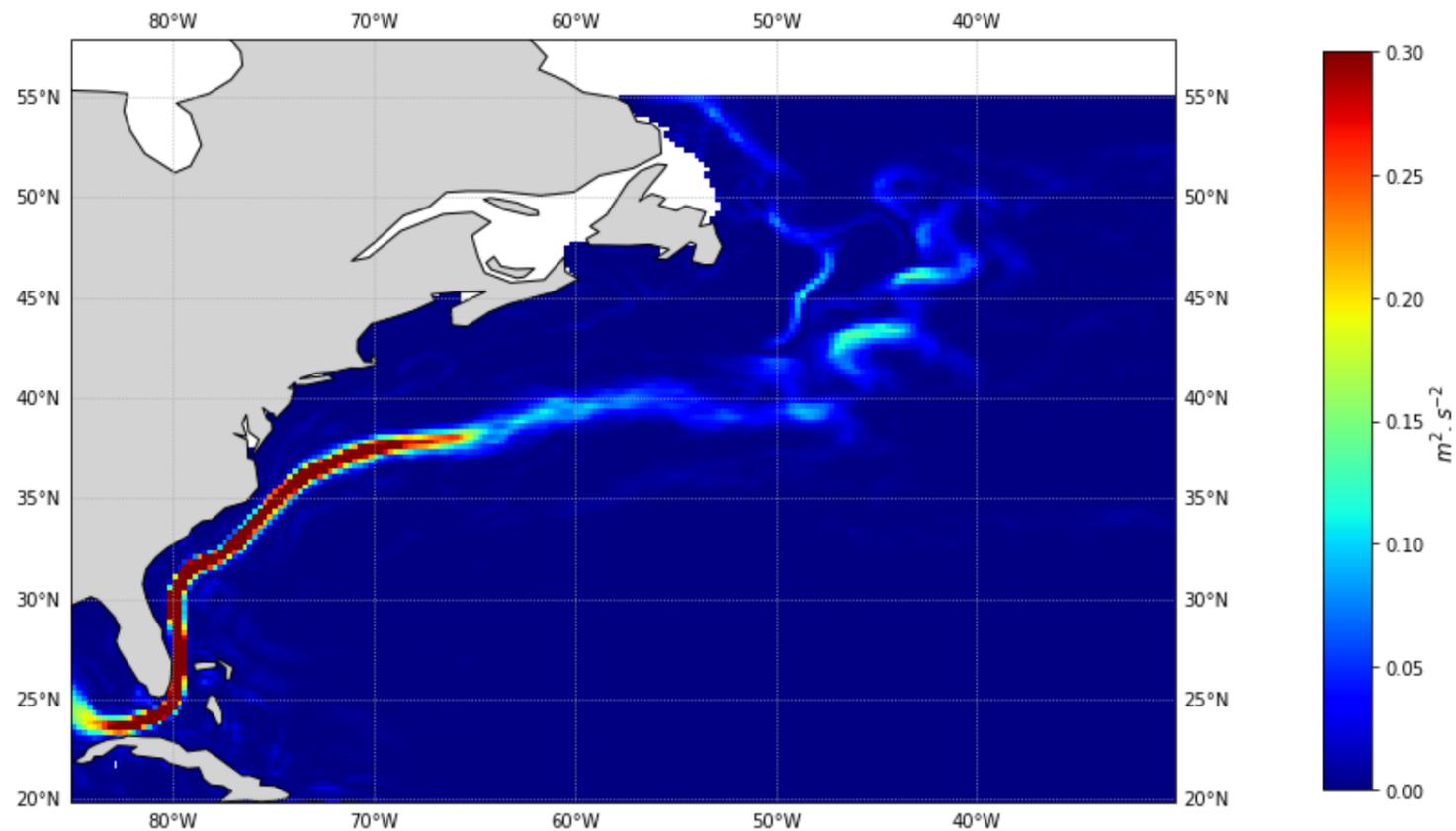


Fig. 5 : Greatbatch et al. (2012)

# Résultats

## MIKE (Mean Kinetic Energy):

1. Prédominante **avant** *Cap Hatteras*.
2. Régions intenses entre 40°W et 50 °W.



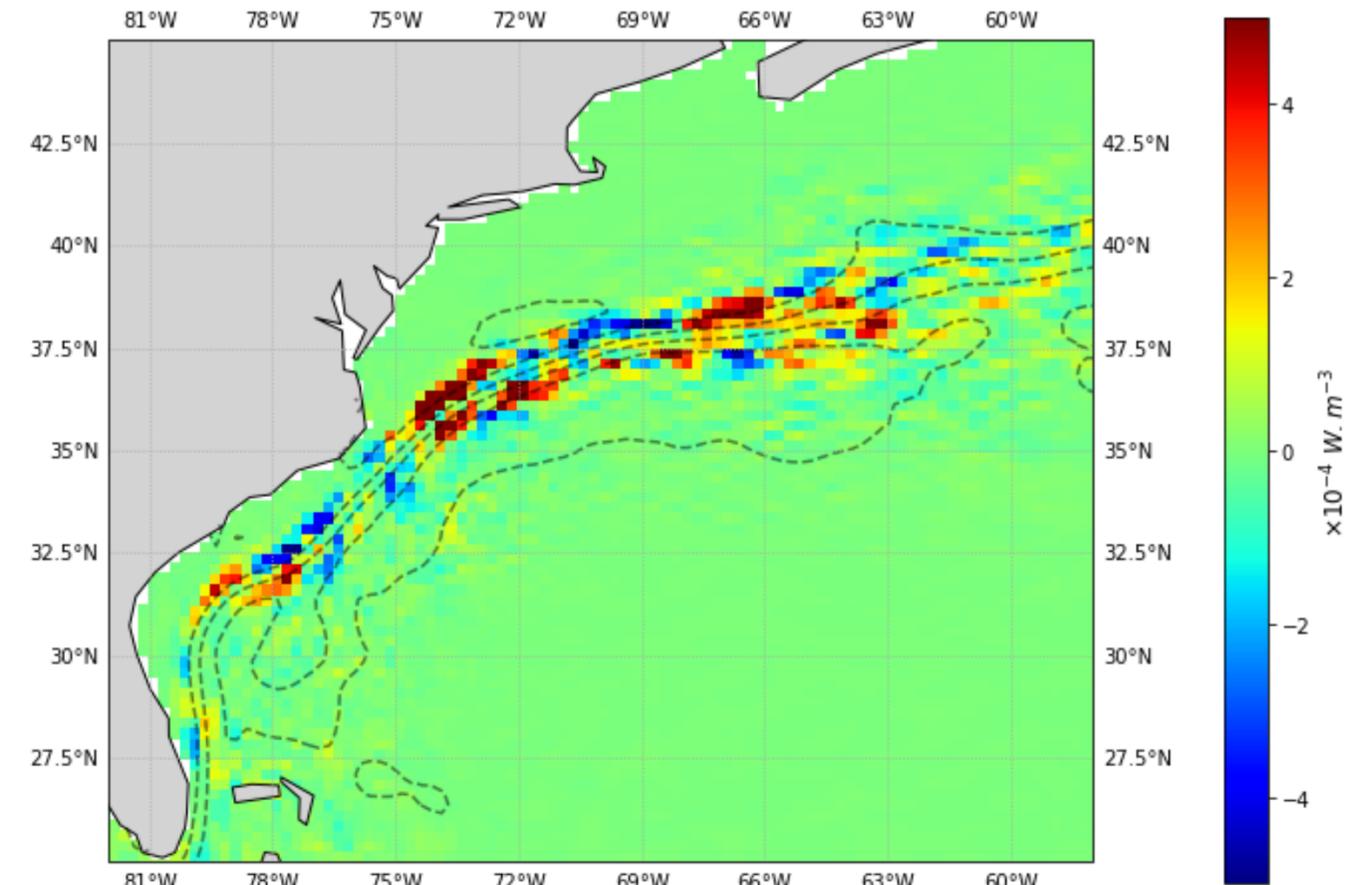
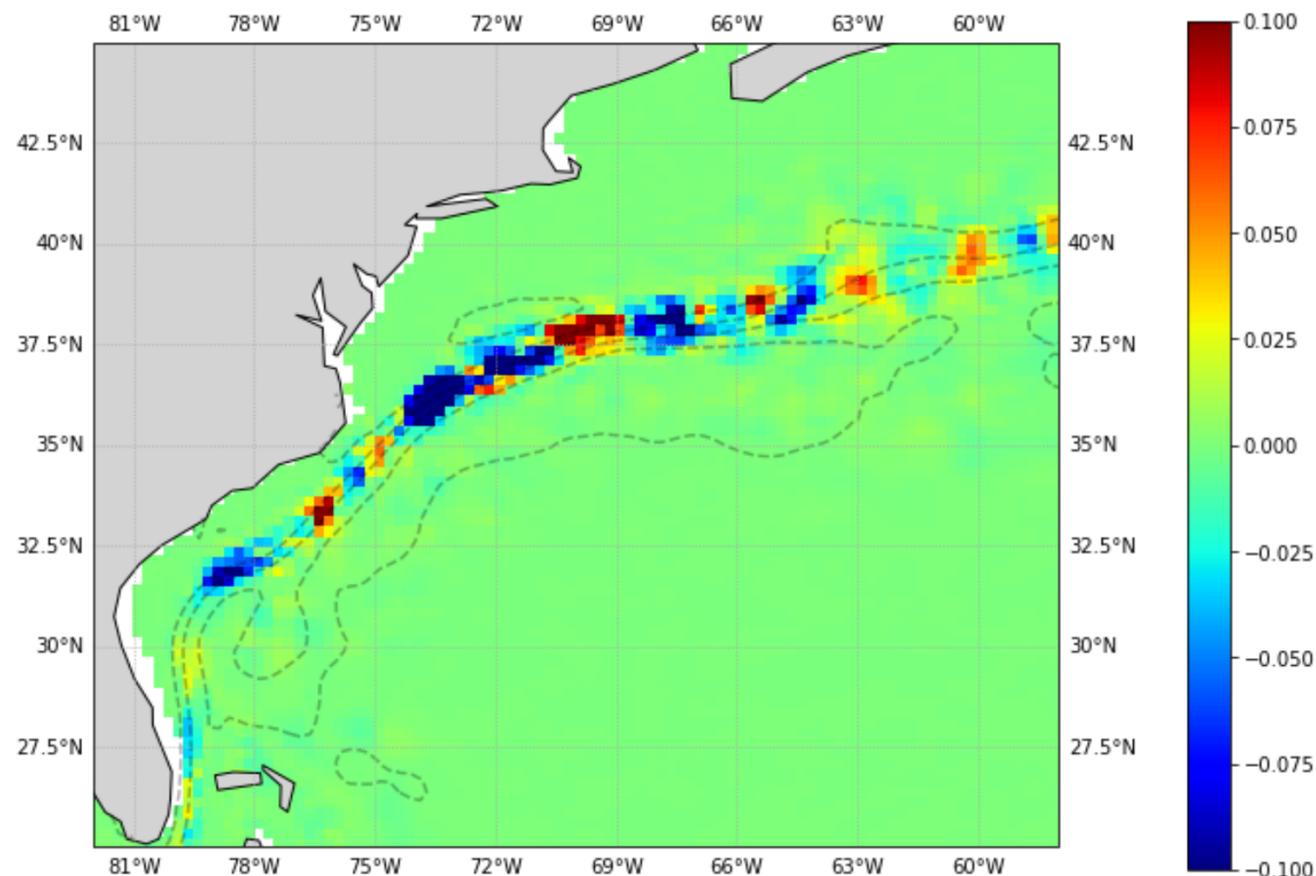
## EKE (Eddy Kinetic Energy):

1. Prédominante **après** *Cap Hatteras*.
2. Régions intenses entre 40°W et 50 °W.

# Résultats

## EDDYFLX

1. Gain d'énergie cinétique turbulente conséquent après *Cap Hatteras*.
2. **Gains** d'énergie cinétique turbulent **plus importants**, en moyenne.



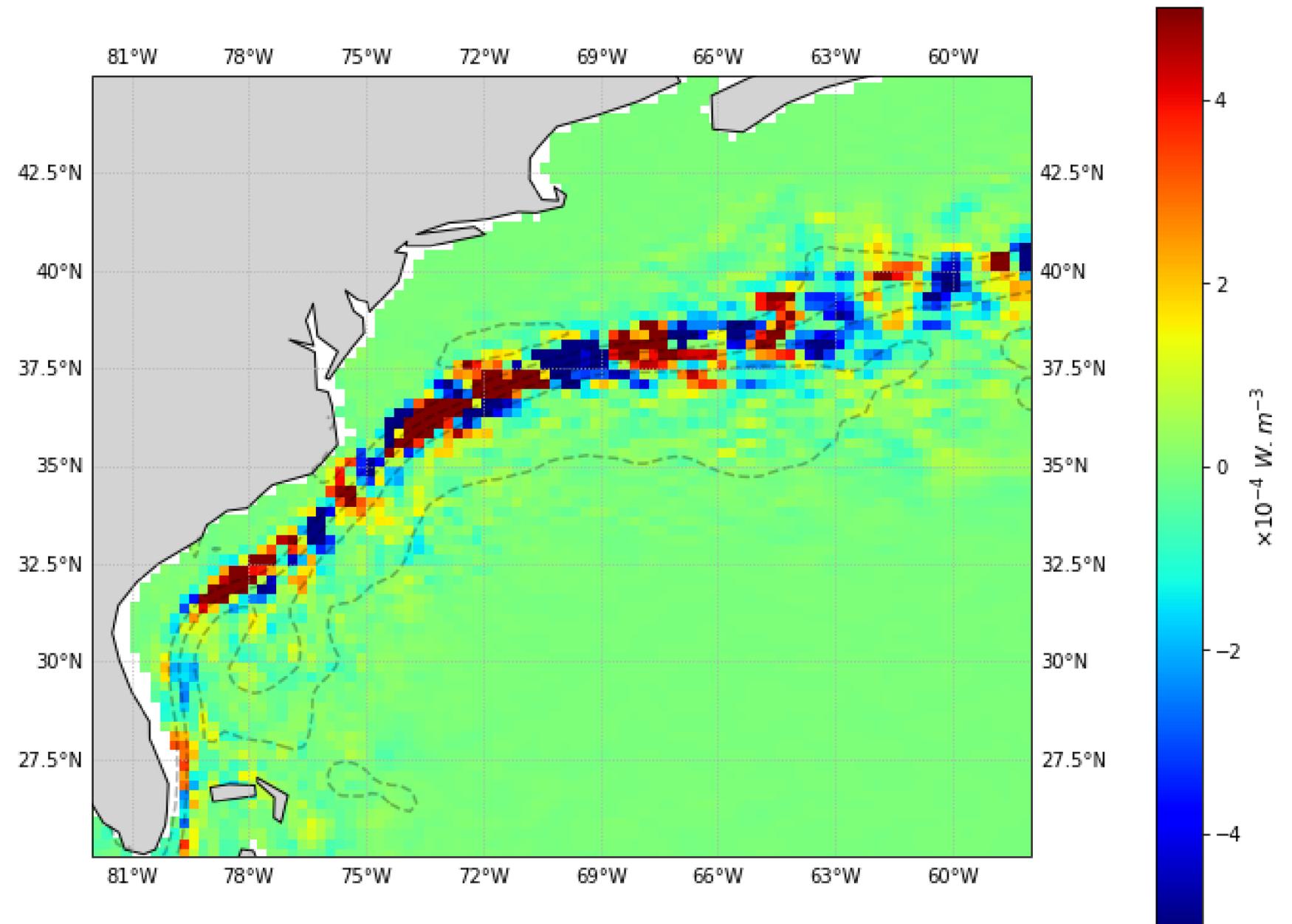
## MEC:

1. Perte d'énergie cinétique moyenne conséquent après *Cap Hatteras*.
2. **Pertes** d'énergie cinétique moyenne **plus importantes**, en moyenne.

# Résultats

## DIVEF :

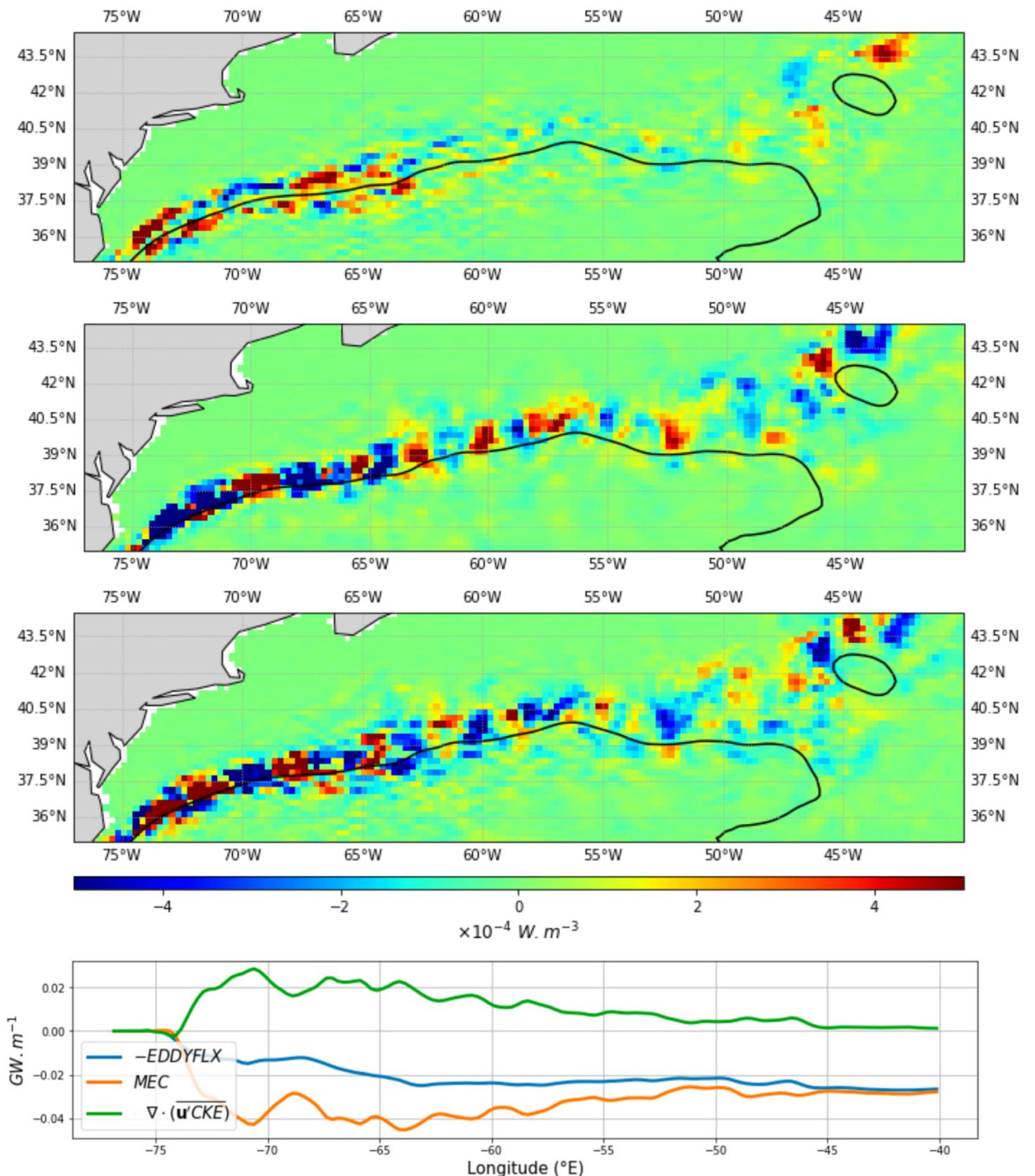
- Divergence du flux moyen turbulent du terme croisé d'énergie cinétique non-nul : non-localité.
- Interactions hautement non-locales après *Cap Hatteras* (région très turbulente).



# Résultats

## Quantification de la non-localité :

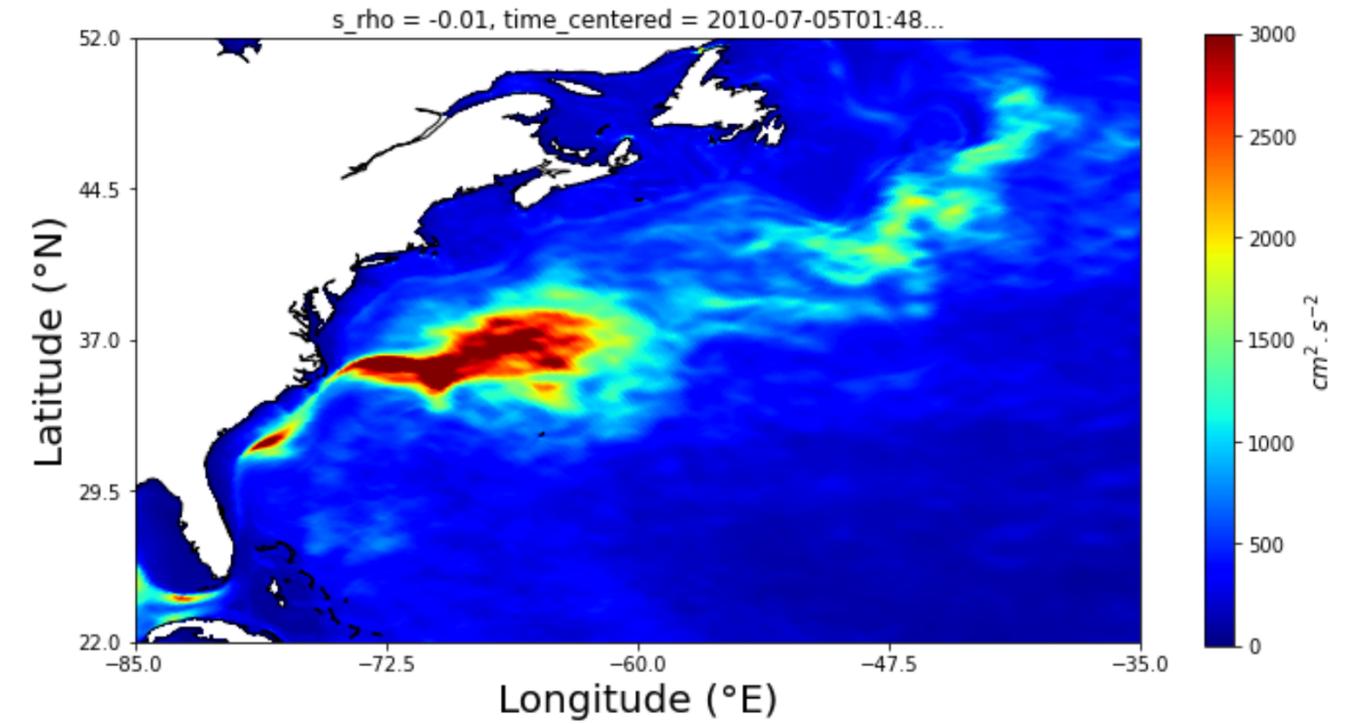
1. **MEC, EDDYFLX** et **DIVEF** intégrée méridionalement en fonction de la longitude.
2. Interactions **hautement non locales** après *Cap Hatteras* : 0.03 GW/m.
3. **Contribution plus importante** de la **MEC** à la non localité.



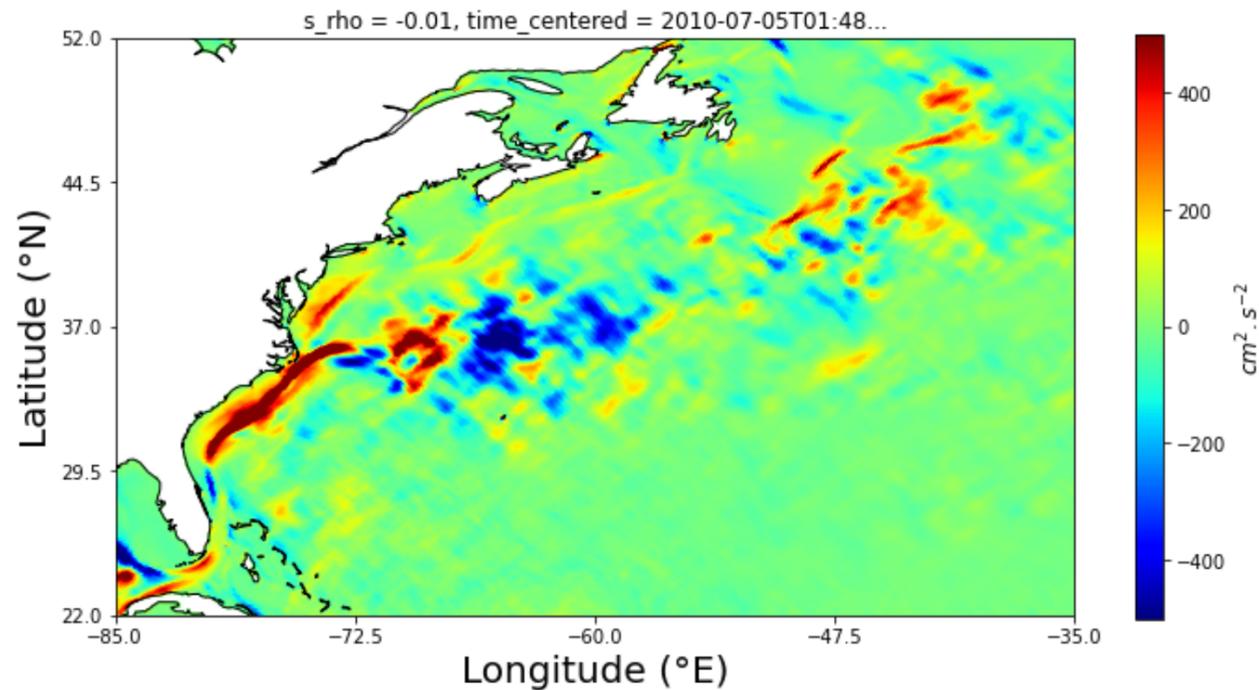
# Résultats

Contraintes de Reynolds  
simulation **GIGATL6**, modèle  
**CROCO**.

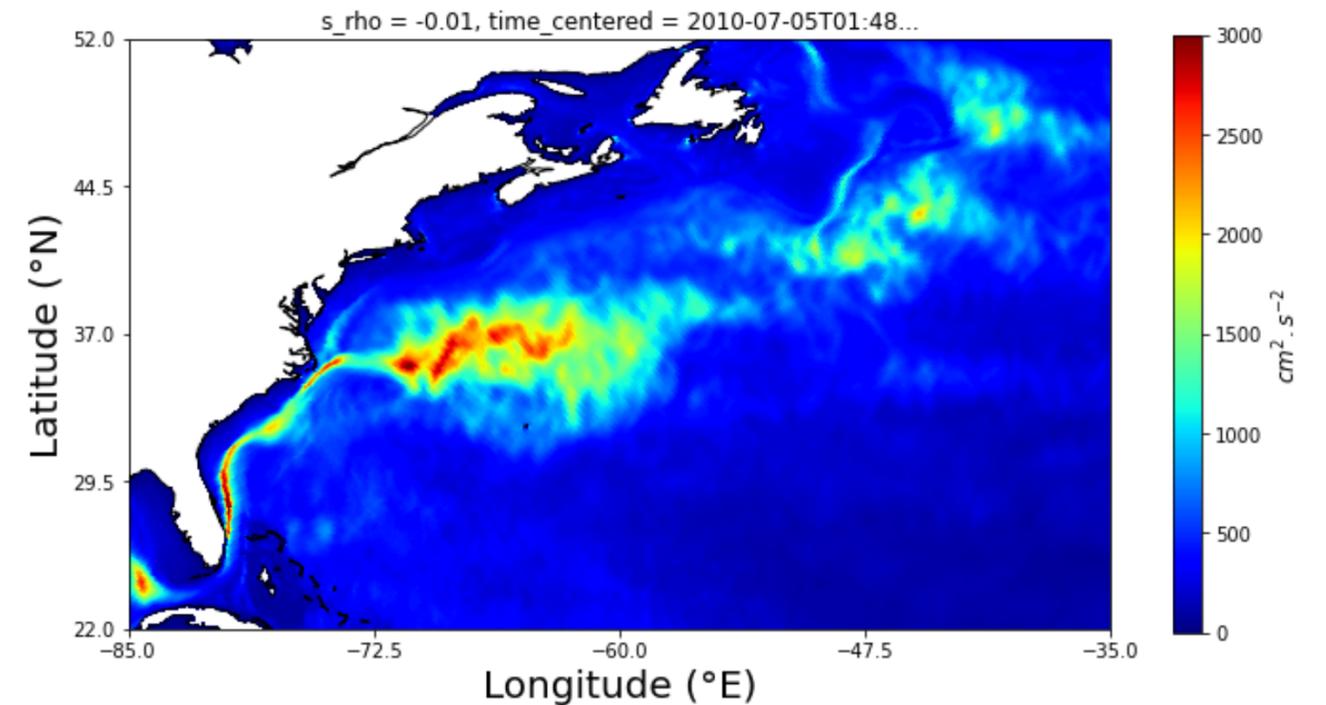
Terme :  $\overline{u'^2}$



Terme :  $\overline{v'u'}$



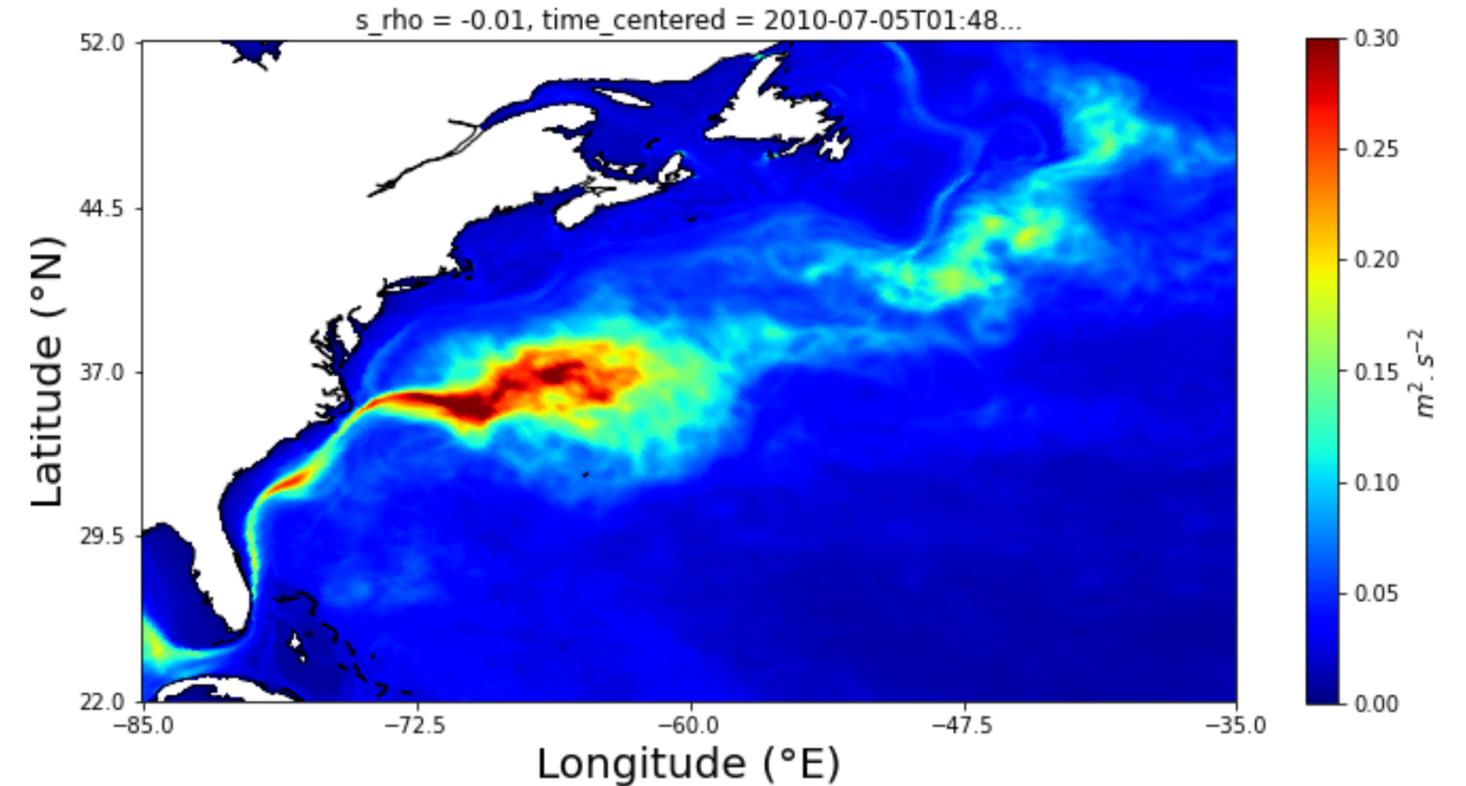
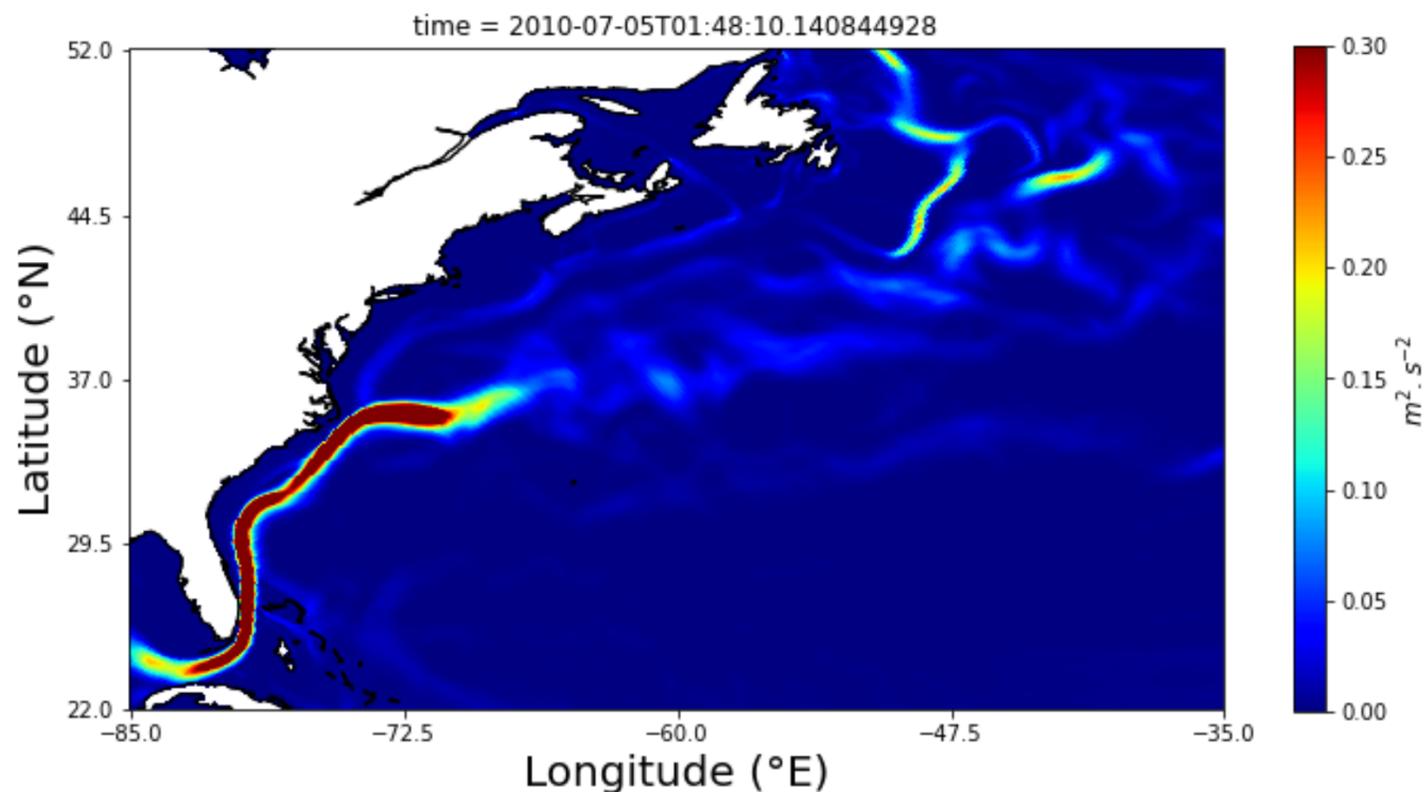
Terme :  $\overline{v'^2}$



# Résultats

## MKE (Mean Kinetic Energy):

1. Prédominante **avant** *Cap Hatteras*, forme **légèrement différente** des observations.
2. Régions **plus intenses** entre 40°W et 50 °W.



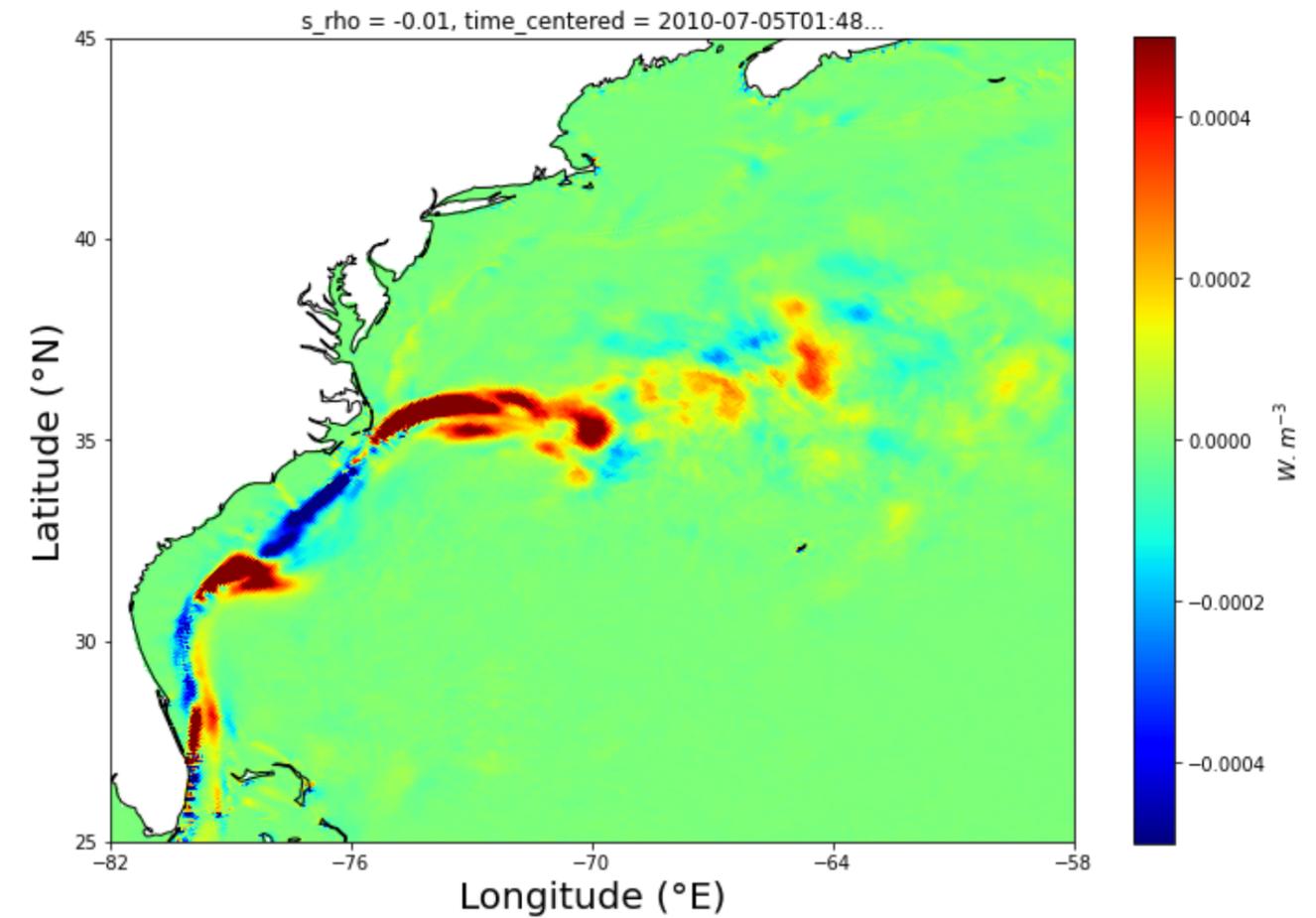
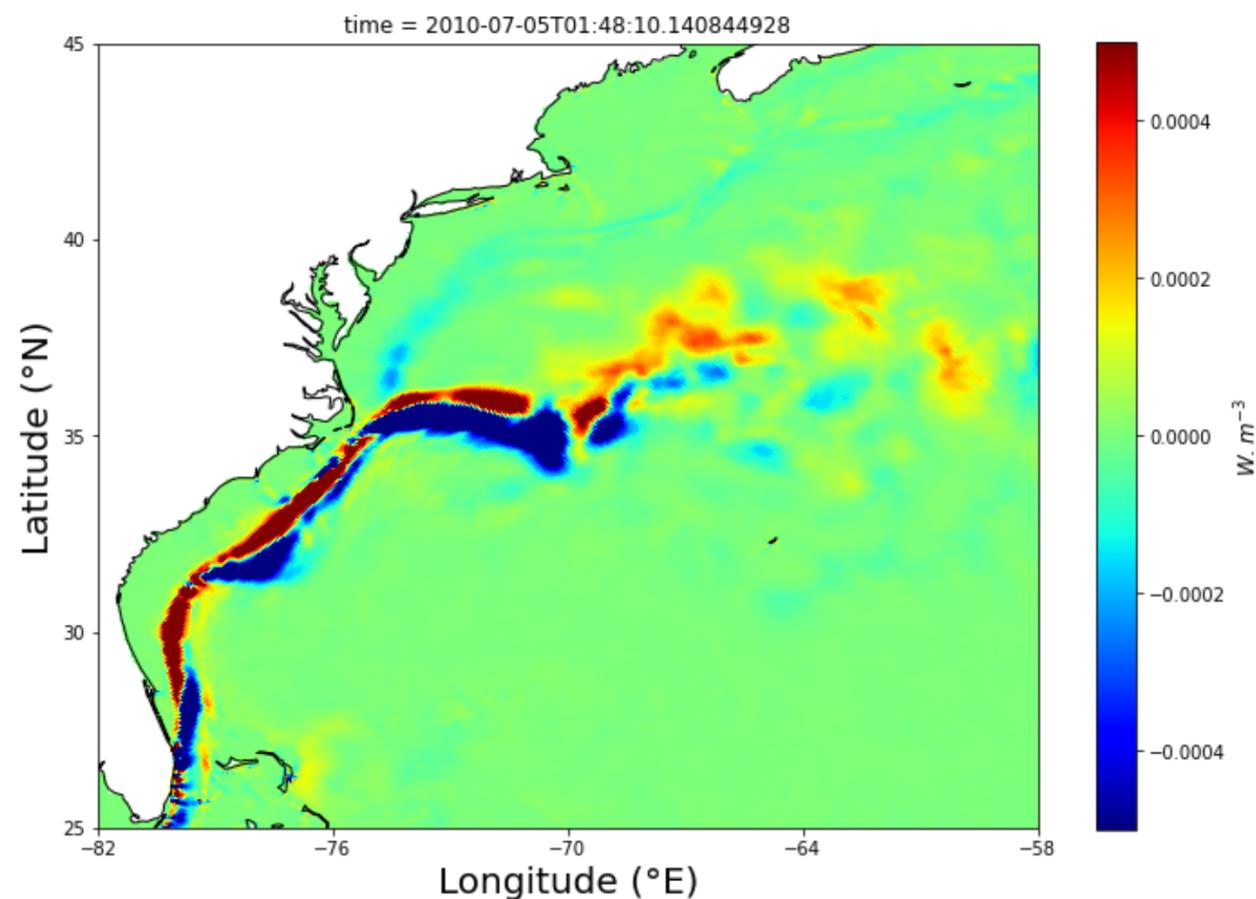
## EKE (Eddy Kinetic Energy):

1. Prédominante **après** *Cap Hatteras*.
2. **EKE** globalement moins intense et de forme différente.
3. Régions intenses entre 40°W et 50 °W, comparable aux observations.

# Résultats

## EDDYFLX :

1. Gain d'énergie cinétique turbulente conséquent après *Cap Hatteras*.
2. **Problème** : Pas d'alternance entre gains et perte d'énergie cinétique (observations)



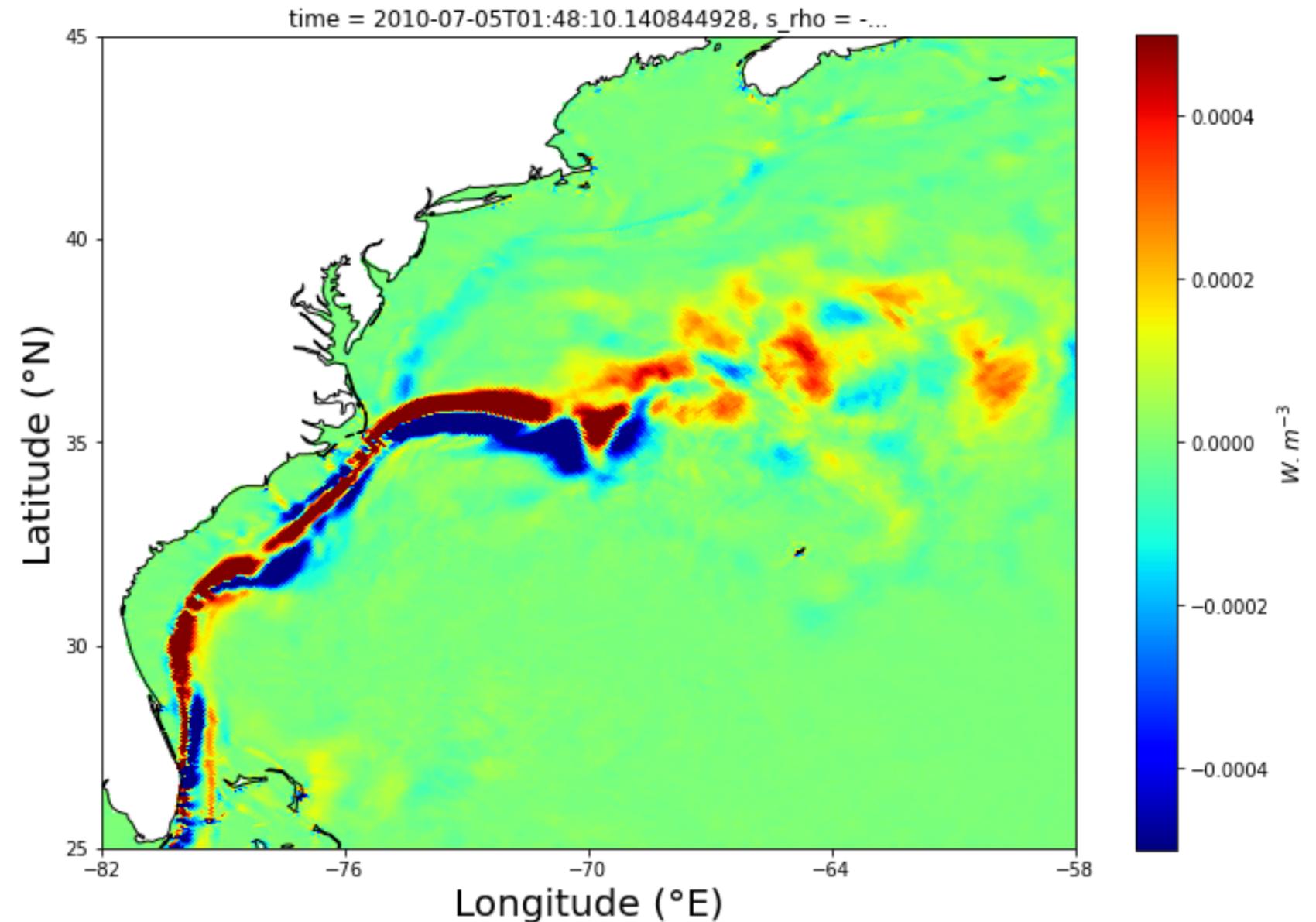
## MEC :

1. Perte d'énergie cinétique moyenne conséquent après *Cap Hatteras*.
2. **Problème** : Pas de *double blade* visible, ni d'alternance entre gain et perte d'énergie cinétique.

# Résultats

## DIVEF (CROCO):

1. Somme de deux termes **erronées** : terme de divergence **non cohérent**.
2. **Ce que nous observons** : terme de divergence divisant le Gulf Stream en deux.
3. **Ce que nous devrions observer** : alternance positive et négative du terme décrivant la non-localité .



---

# Discussion et Perspectives

- **Signatures cohérentes** (bien que **moins intenses**) des contraintes de Reynolds concernant les données altimétriques.
  - **Hypothèse géostrophique** des données altimétriques : amène des **erreurs** (notamment au bord des côtes américaines).
  - Quantification de la **non-localité** : **pic à 0.03 GW/m** après *Cap Hatteras*, puis diminution progressive.
  - Résolution d'**un quart de degré** pour les **données altimétriques** contre **6km** pour les **données de simulation** : résolution **plus fine**.
  - Terme de contrainte  $\overline{v'u'}$  **peu cohérent** : **entraîne des erreurs** sur les termes de transferts d'énergie cinétique. Des **analyses supplémentaires** sont donc nécessaires.
  - **Champ des vitesses sous-estimé** dans les sorties de simulation **GIGATL6** : Hypothèses **trop restrictives** ?
  - **Processus barotrope** (intégrer sur la couche de mélange), introduire **l'énergie potentielle** (via le terme  $\overline{w'b'}$  ), étude de la **topographie** (Kuroshio, courant des aiguilles,...).
-

---

# Conclusion

- **Reconstitution cohérente** des **contraintes de Reynolds** et des **contributions, termes de transferts** d'énergie cinétique à partir des **données altimétriques**.
  - Quantification de la **non-localité** avec un **pic à 0.03 GW/m en surface**.
  - **Champ des vitesses** globalement **sous-estimé** dans les **données de simulation**.
  - **Erreurs** concernant le terme  $\overline{v'u'}$  ne **correspondant pas aux observations : erreurs** sur les **termes de transferts d'énergie cinétique**. Davantage d'analyse sont **nécessaires** pour pallier à ce problème.
-

---

Merci de votre attention

---

---

# Références

- Chassignet, E. P. and Xu, X. (2017). Impact of Horizontal Resolution (1/12° to 1/50°) on Gulf Stream Separation, Penetration, and Variability. *Journal of Physical Oceanography*, 47(8) :1999–2021.
  - Chen, R., Flierl, G. R., and Wunsch, C. (2014). A Description of Local and Nonlocal Eddy–Mean Flow Interaction in a Global Eddy-Permitting State Estimate. *Journal of Physical Oceanography*, 44(9) :2336–2352.
  - Cushman-Roisin, B. and Beckers, J.-M. (2011). Introduction to geophysical fluid dynamics : physical and numerical aspects. Number v. 101 in International geophysics series. Academic Press, Waltham, MA, 2nd ed edition. OCLC : ocn751829434.
-

---

# Références

- Ducet, N. and Le Traon, P.-Y. (2001). A comparison of surface eddy kinetic energy and Reynolds stresses in the Gulf Stream and the Kuroshio Current systems from merged TOPEX/Poseidon and ERS-1/2 altimetric data. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 106(C8) :16603–16622.
  - Harrison, D. and Robinson, A. (1978). Energy analysis of open regions of turbulent flows — mean eddy energetics of a numerical ocean circulation experiment. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2(2) :185–211.
  - Jamet, Q., Leroux, S., Dewar, W. K., Penduff, T., Le Sommer, J., Molines, J.-M., and Gula, J. (2022). Non-local eddy-mean kinetic energy transfers in submesoscale-permitting ensemble simulations. Manuscript submitted to *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, pages ..–..
-

---

# Références

- Kang, D. and Curchitser, E. N. (2015). Energetics of Eddy–Mean Flow Interactions in the Gulf Stream Region. *Journal of Physical Oceanography*, 45(4) :1103–1120.
  - Martínez-Moreno, J., Hogg, A. M., Kiss, A. E., Constantinou, N. C., and Morrison, A. K. (2019). Kinetic Energy of Eddy-Like Features From Sea Surface Altimetry. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(10) :3090–3105.
  - Niiler, P. P., Maximenko, N. A., and McWilliams, J. C. (2003). Dynamically balanced absolute sea level of the global ocean derived from near-surface velocity observations : ABSOLUTE SEA LEVEL OF THE GLOBAL OCEAN. *Geophysical Research Letters*, 30(22).
  - Richard John Greatbatch, Xiaoming Zhai, Jan-Dirk Kohlmann, and Lars Czeschel (2010). Ocean eddy momentum fluxes at the latitudes of the Gulf Stream and the Kuroshio ex- tensions as revealed by satellite data. *Ocean Dynamics*, 60(3) :617–628.
-

---

# Documentation

- *xarray* : <https://docs.xarray.dev/en/stable/>
- *xgcm* : <https://xgcm.readthedocs.io/en/latest/>
- CROCO : [https://croco-ocean.gitlabpages.inria.fr/croco\\_doc/index.html](https://croco-ocean.gitlabpages.inria.fr/croco_doc/index.html)

---

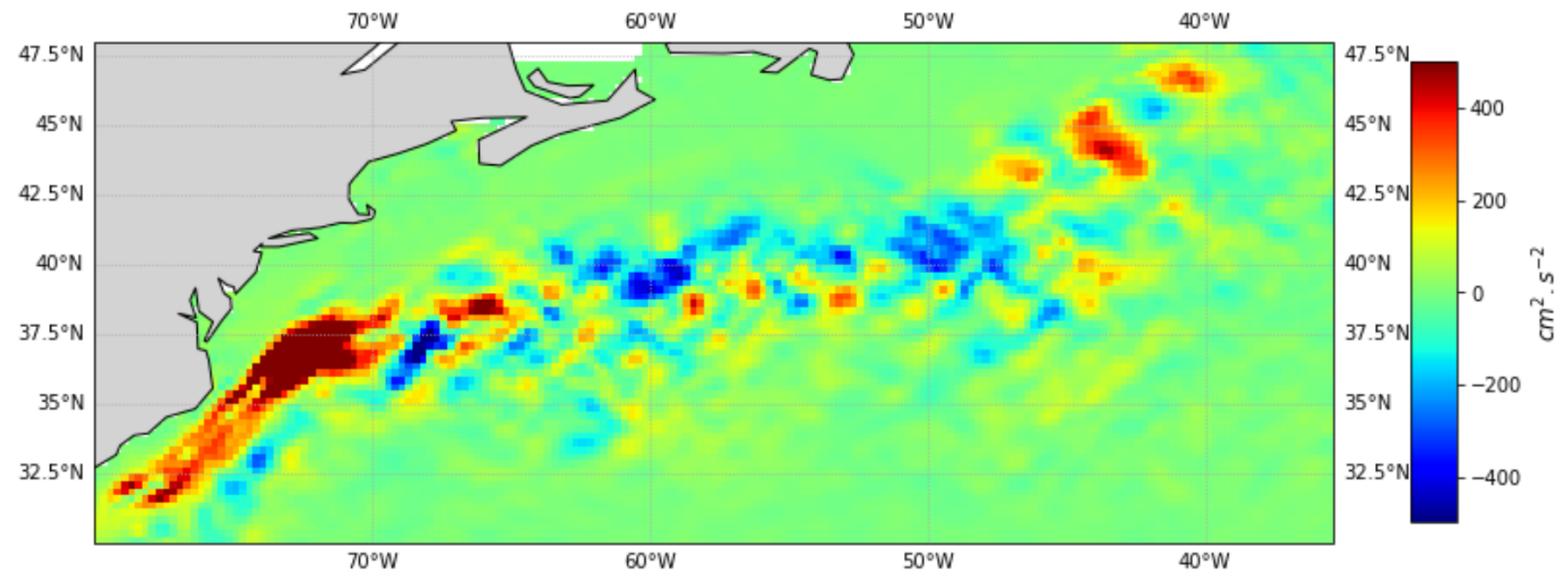
# ANNEXES

(Données altimétriques, constellation de satellites, période : 2000 - 2012)

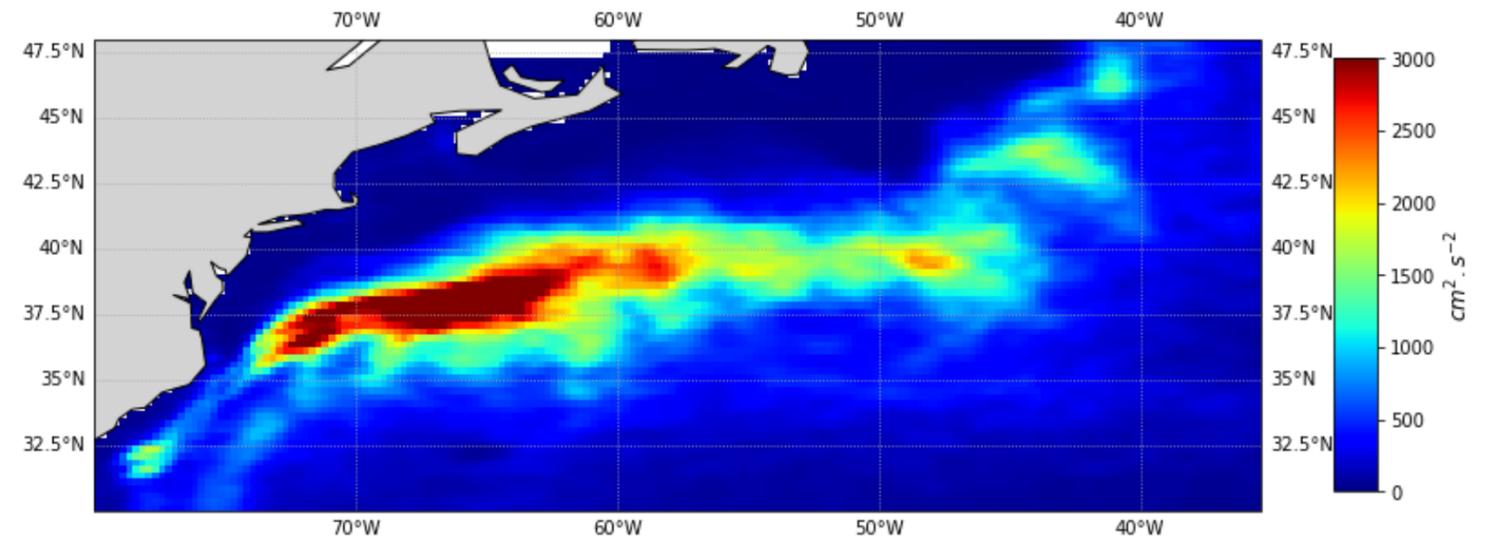
---

# Annexe

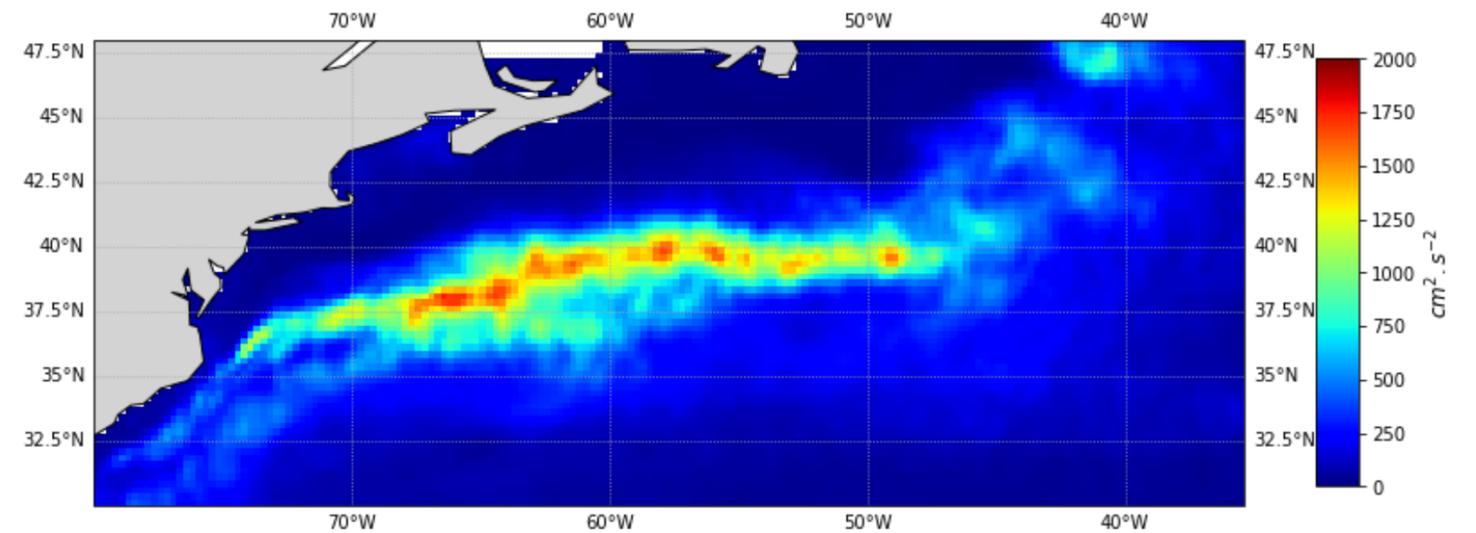
Terme  $\overline{v'u'}$



Terme  $\overline{u'^2}$

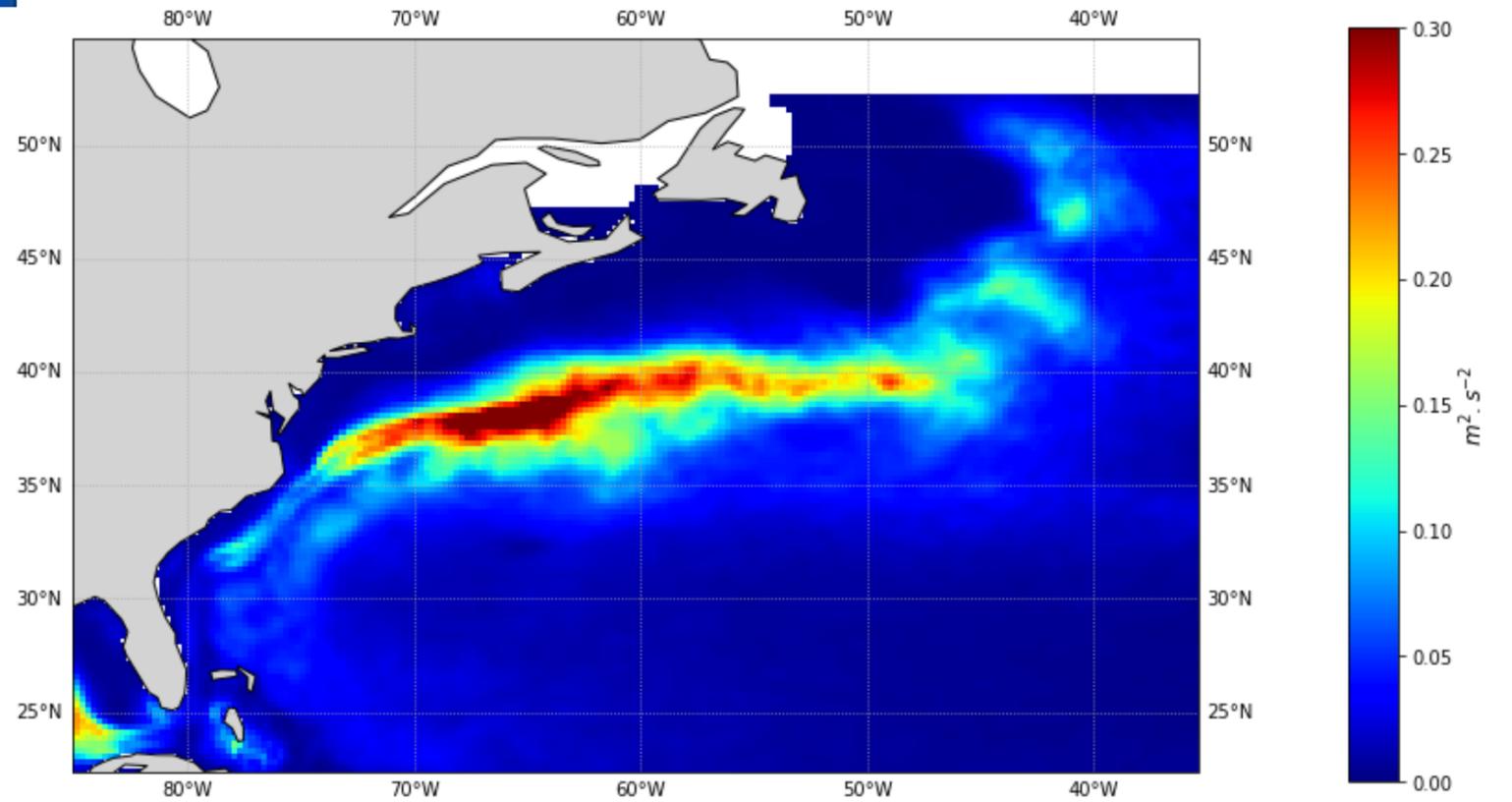
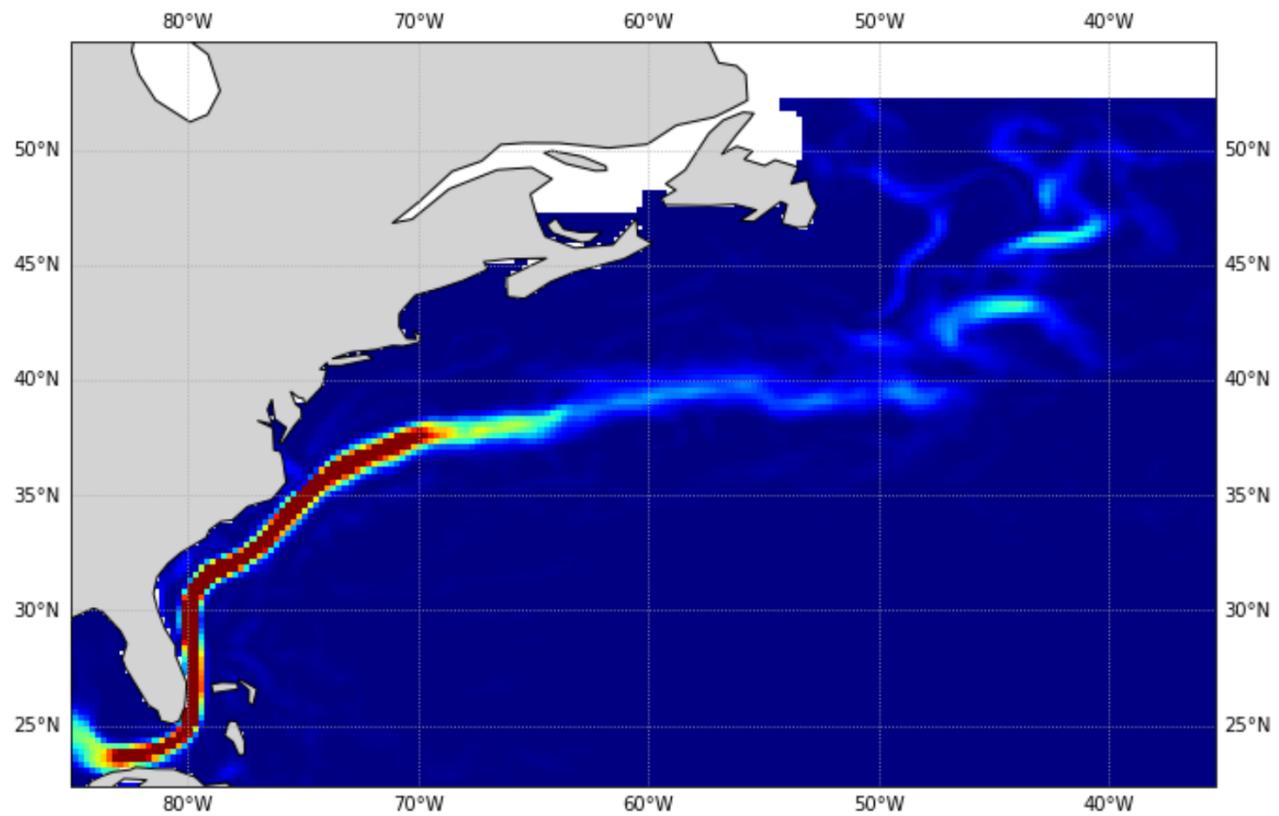


Terme  $\overline{v'^2}$

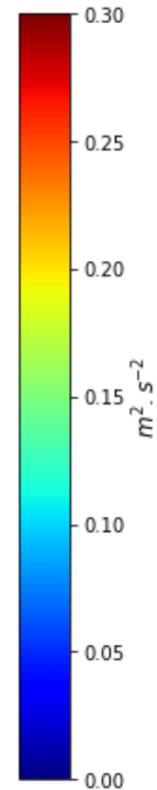


# Annexe

**MKE :**

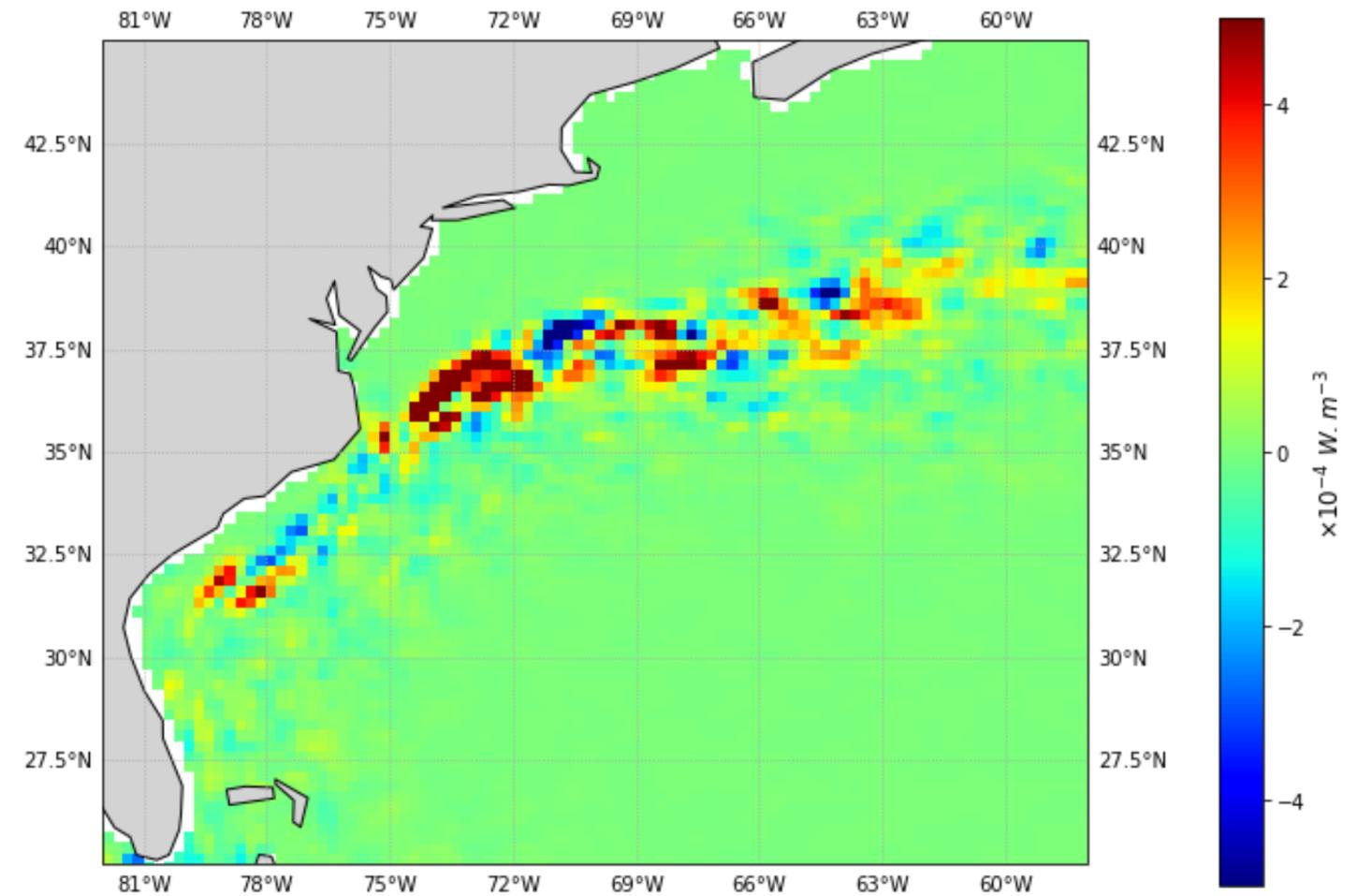
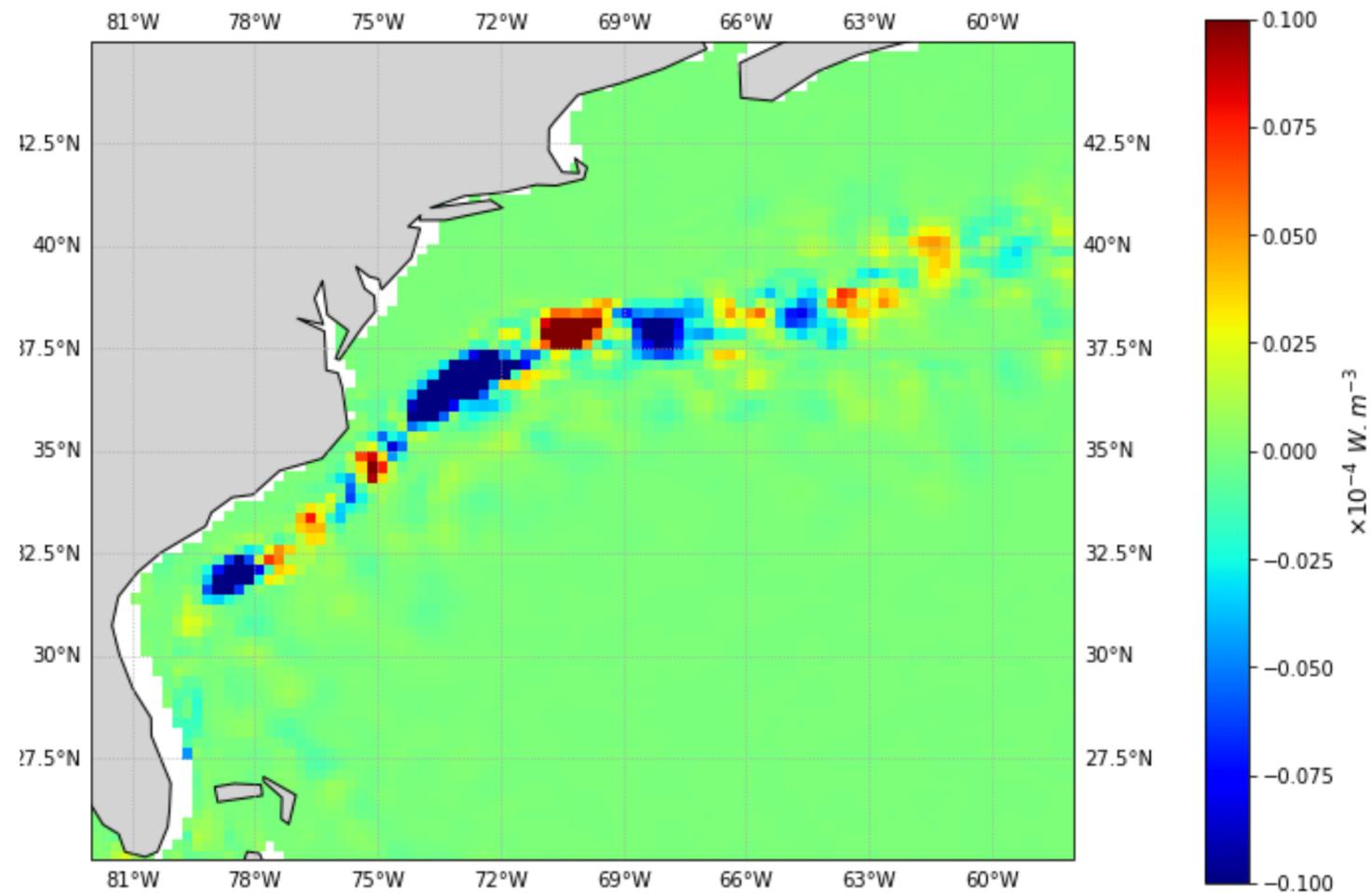


**EKE :**



# Annexe

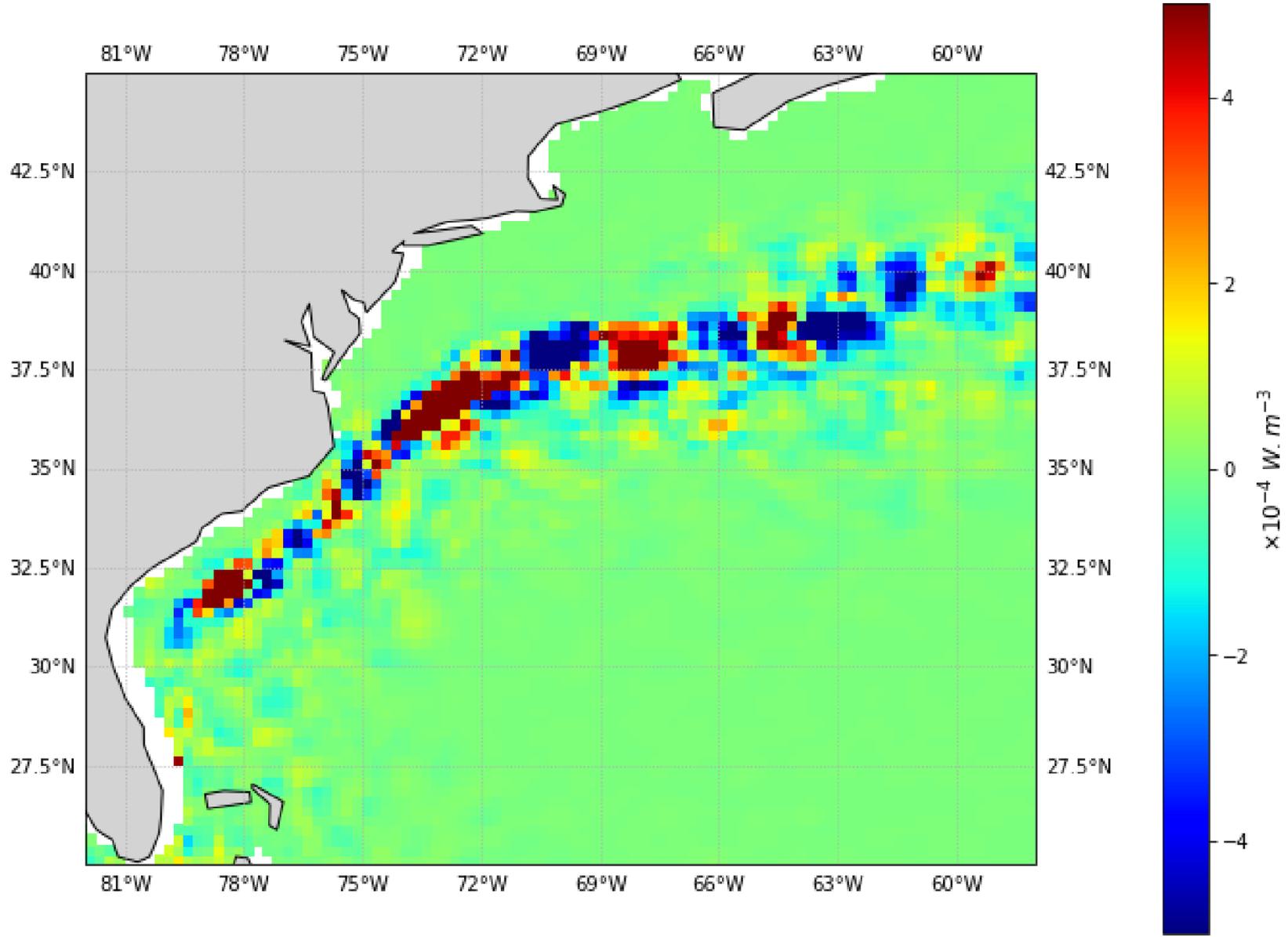
## EDDYFLX :



## MEC :

# Annexe

## DIVEF :



# Annexe

## Quantification de la non-localité

