



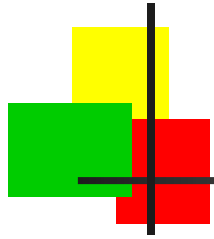
# Assimilation de données images pour l'océanographie

---

Etienne Huot\*  
Gennady Korotaev\*\*  
Jean-Paul Berroir\*  
Isabelle Herlin\*  
Till Isambert\*

\*CLIME – INRIA/CEREA-ENPC

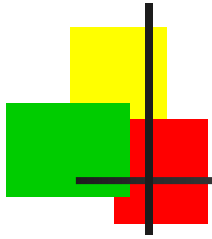
\*\* MHI -- Ukraine



# Problèmes

---

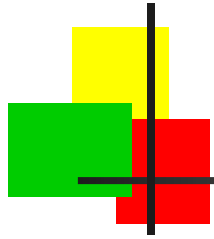
- **Quelles images** : statiques ou dynamiques.
- **Espace image** : adapté à la représentation des frontières de structures, trajectoires lagrangiennes, champ de vitesse, *etc.*
- **Opérateur** pour passer de l'espace image à l'espace d'état.
- **Contrainte de régularité**: extraire une information à partir d'images est souvent un problème mal posé, d'où la nécessité de définir une contrainte supplémentaire.



# Application à l'océanographie

---

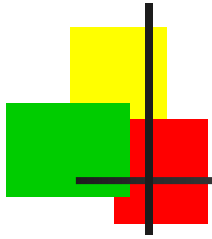
- Assimilation de :
  - **Vitesse de circulation,**
  - **Trajectoires lagrangiennes**
    - obtenues par détection et suivis de structures,
    - par intégration d'un champ de vitesses.



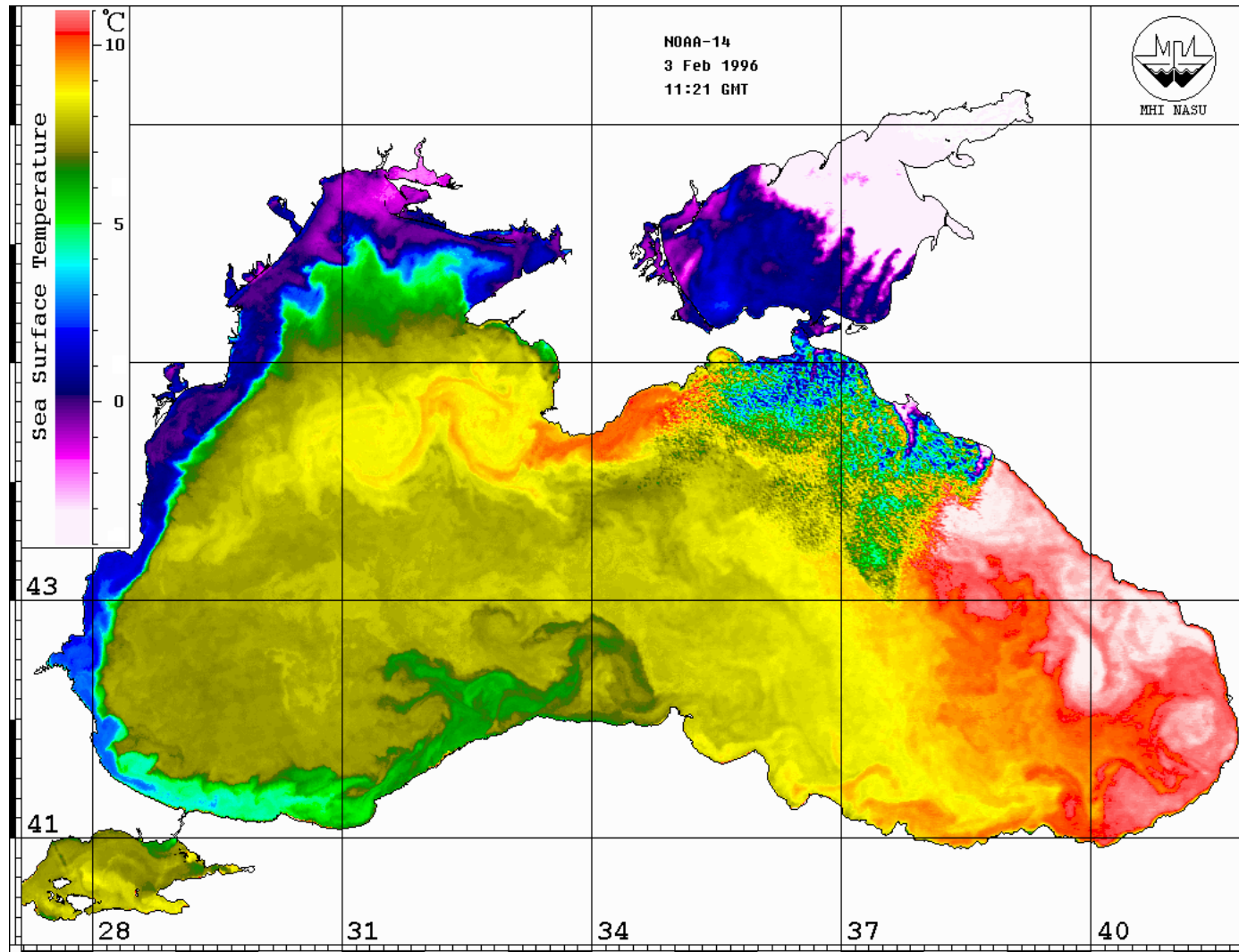
# Données images satellitaires

---

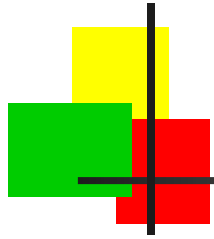
- SST (*Sea Surface Temperature*) : estimées à partir de de mesures infrarouges.
- Caractéristiques des capteurs :
  - Géostationnaires (GOES, Meteosat, ...) : plusieurs acquisitions par jour, 5 à 20km de résolution.
  - Orbites polaires, mésoéchelle :
    - AVHRR: quotidien, résolution 1-5km,
    - MODIS: 2/jour, résolution 250m-1km.



# Image SST : Mer Noire



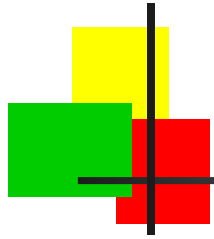
Marine Hydrophysical Institute - Ukraine



# Notre stratégie

---

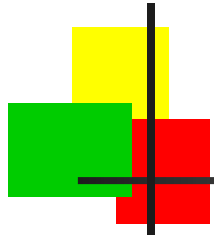
- Estimation de la vitesse de circulation de surface à partir d'images satellites.
  - Assimilation de la vitesse estimée dans un modèle de circulation.
- Il faut définir la méthode **la plus appropriée** pour l'estimation de la vitesse.



# Données simulées

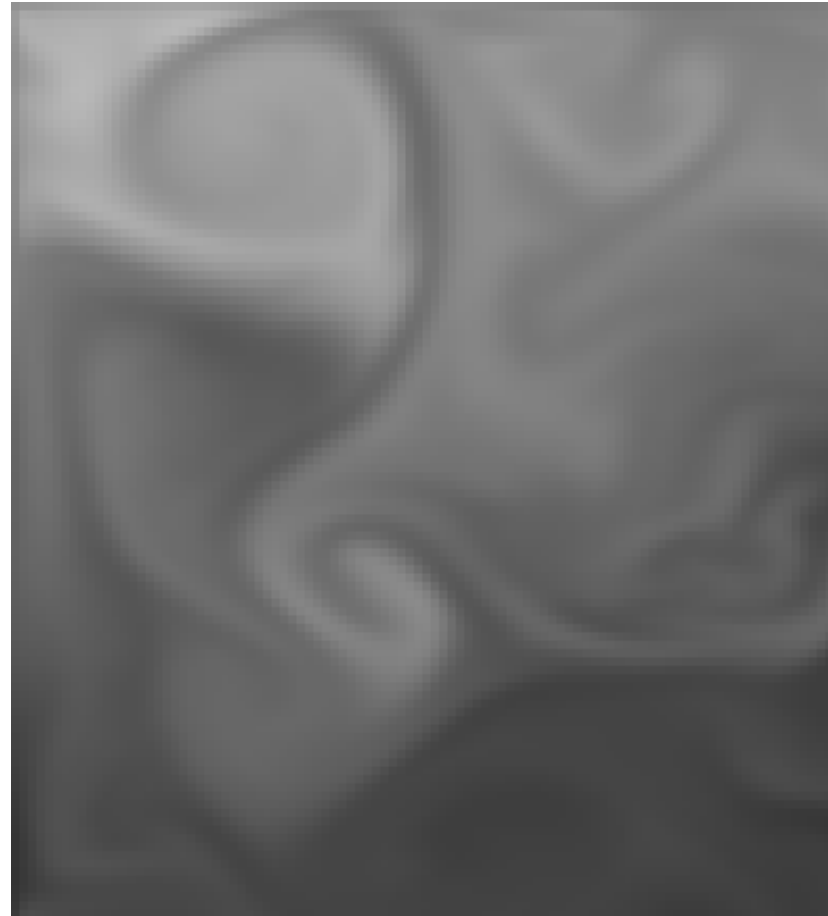
---

- Modèle 3D OPA.
- SST
- Champ de vecteurs vitesse.
- Résolution spatiale de 5km et temporelle de 24h.
- Zone de 500km<sup>2</sup>



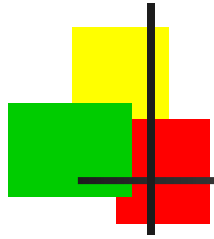
# Données simulées

---

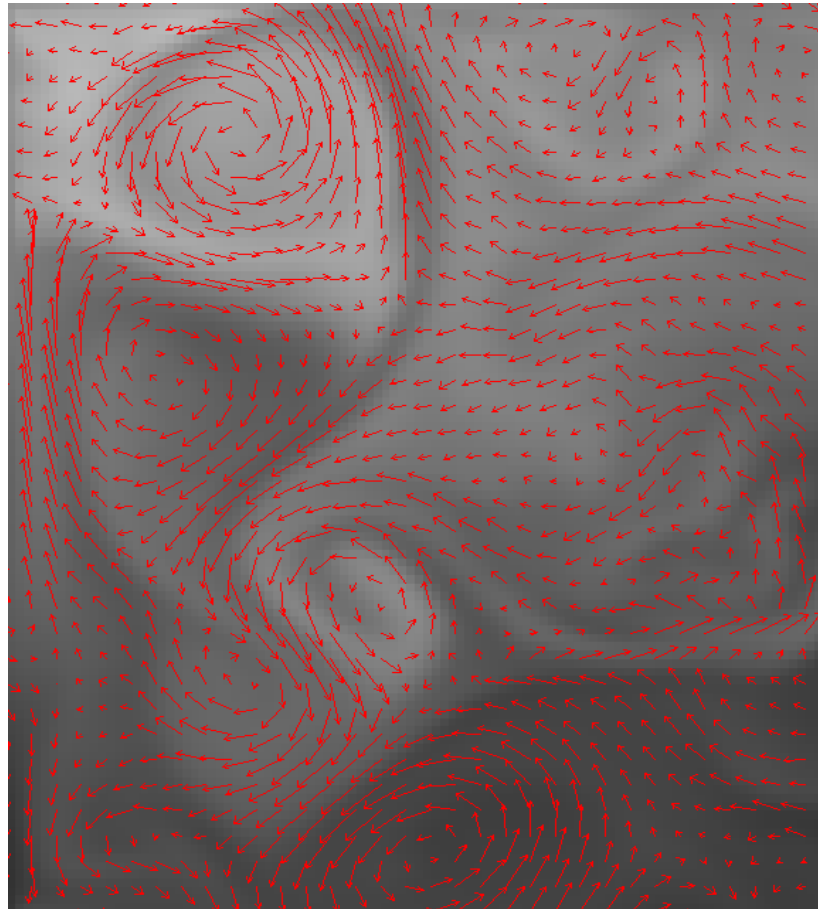


SST

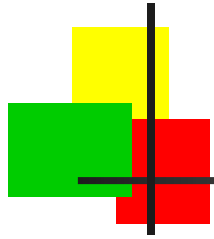




# Données simulées



SST et Champ de vitesses

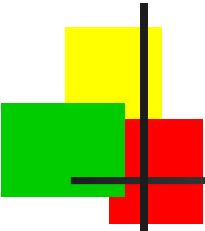


# Estimation de la vitesse

- Equation de conservation :

$$\frac{\partial I}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \Leftrightarrow \nabla I \cdot \mathbf{w} + I_t = 0$$

- Contrainte de régularité pour résoudre le problème d'ouverture.



# Quelle équation de conservation ?

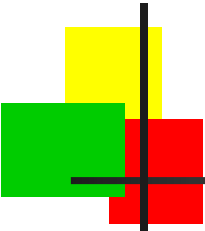
---

1. Conservation de la luminance : les points en mouvements conservent le même niveau de gris:

$$\nabla I \cdot \mathbf{w} + I_t = 0$$

2. Conservation de la masse: conservation de la densité pour un fluide compressible:

$$\nabla I \cdot \mathbf{w} + I_t + I \operatorname{div} \mathbf{w} = 0$$



# Quelle équation de conservation ?

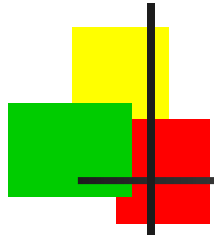
---

3. Conservation de la température avec approximation Boussinesq

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla T \cdot \mathbf{w} = K_T \Delta T$$

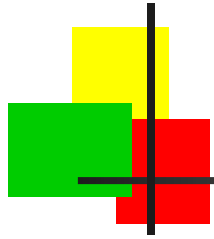
4. Equation d'advection-diffusion

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla C \cdot \mathbf{w} = K_C \Delta C + Src - Snk.$$



# Conclusion pour la SST

1. Conservation de la luminance : **pas si mal!**  
**Mais pas respectée partout ;**
2. Conservation de la masse **inadéquate pour la SST ;**
3. Conservation de la température : **équivalente à conservation de luminance**, diffusivité horizontale très petite ;
4. Advection diffusion : **équivalente à conservation de temperature**, excepté qu'on doit considérer des termes Source/Puit dues aux forçages radiatifs et au vent.

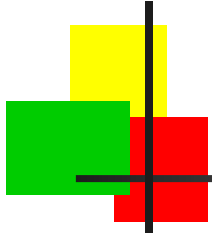


# Sélection de points

---

1. Masques de structures spécifiques: **filaments** où le mouvement est parallèle à la structure.
2. Ne pas considérer les points sans suffisamment d'information image :

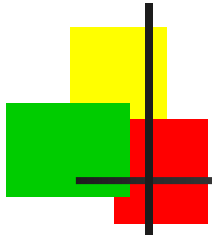
$$\nabla I \quad \text{et} \quad I_t \simeq 0$$



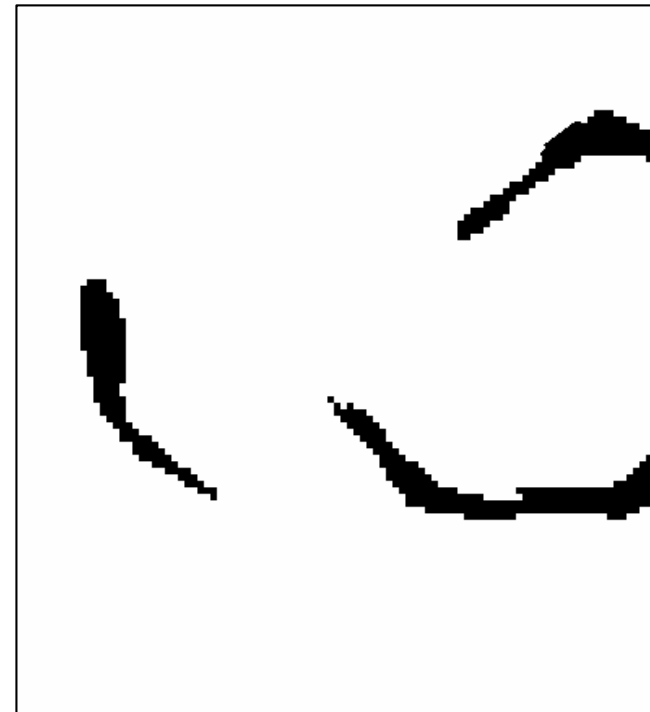
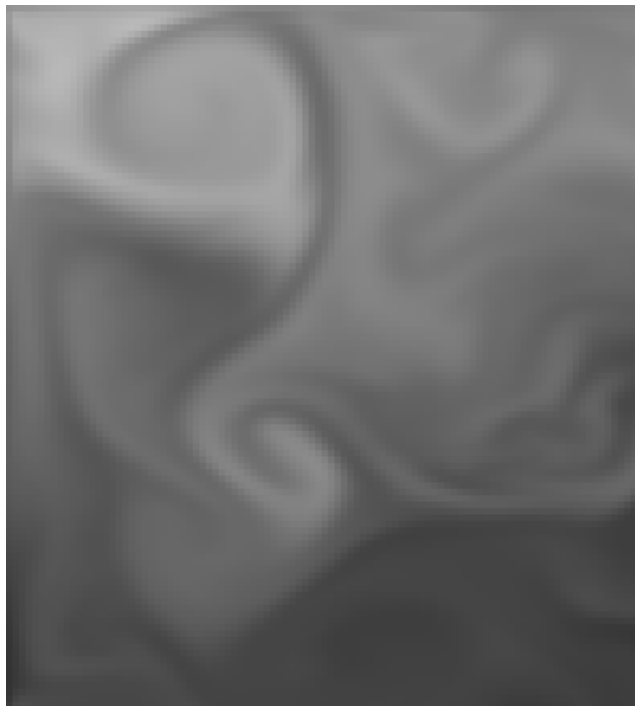
# Propriétés des filaments

---

- Forme allongée
  - Température constante
  - Contraste significatif
  - Déplacement parallèle
- Morphologie mathématique



# 1. Detection des filaments



SST → opérateur Pic → Seuillage → Matrice d'inertie

→ Structures allongées → Déplacement parallèle → Filaments clairs

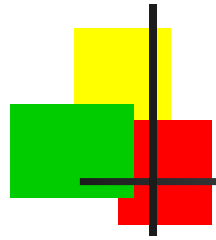


## 2. Pas d'information image

- On masque les points :
  - Sans gradient spatial significatif :  $|\nabla I|^2 < \text{Threshold1}$
  - Sans dérivée temporelle significative :  $I_t < \text{Threshold2}$



Masque faibles  $\nabla I$  et  $I_t$



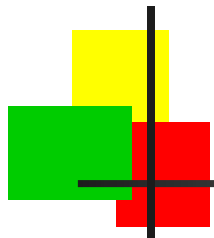
# Quelle contrainte de régularité ?

- Possibilités venant de la vision par ordinateur
  1. Régularité sur la norme du gradient

$$E_2(\mathbf{w}) = \int_{image} \|\nabla \mathbf{w}\|^2$$

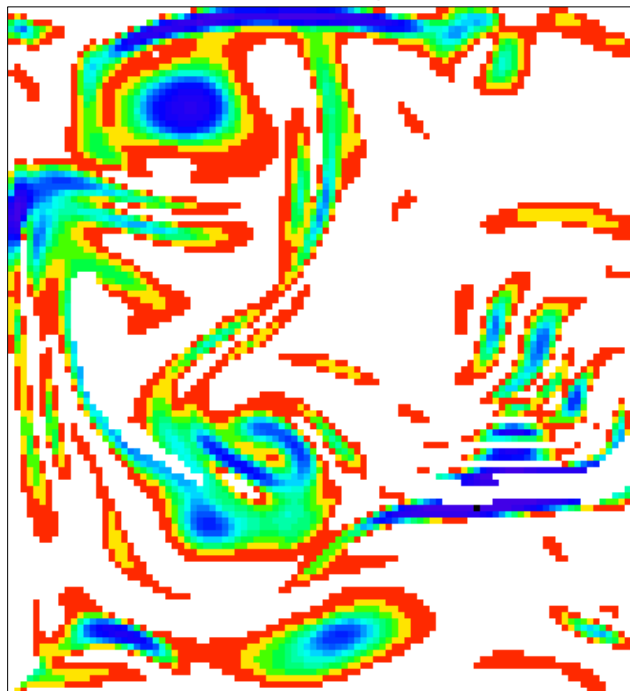
2. Régularité Div/Curl

$$E_2(\mathbf{w}) = \int_{image} \alpha \|\nabla \operatorname{div} \mathbf{w}\|^2 + \beta \|\nabla \operatorname{curl} \mathbf{w}\|^2$$



# Contraintes de régularité

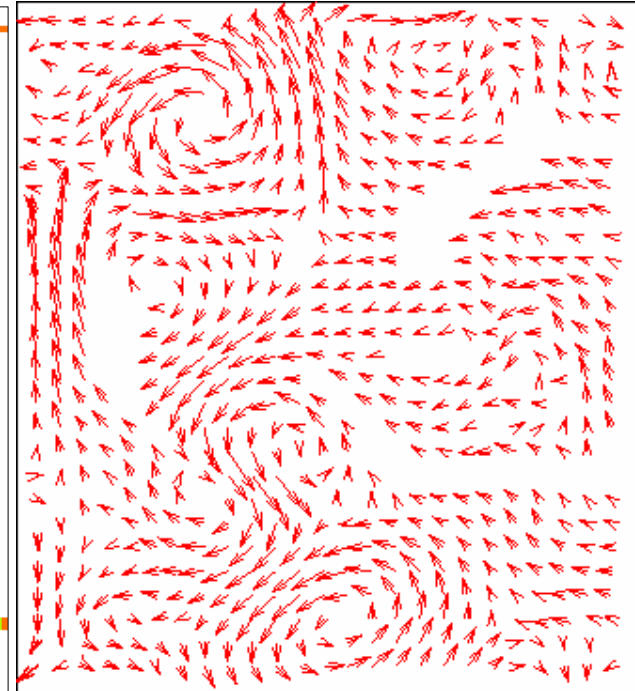
Norme du gradient



Div / Curl



w



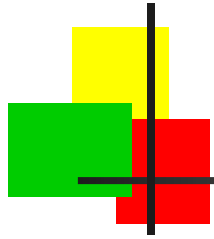
1e-7

1e-5

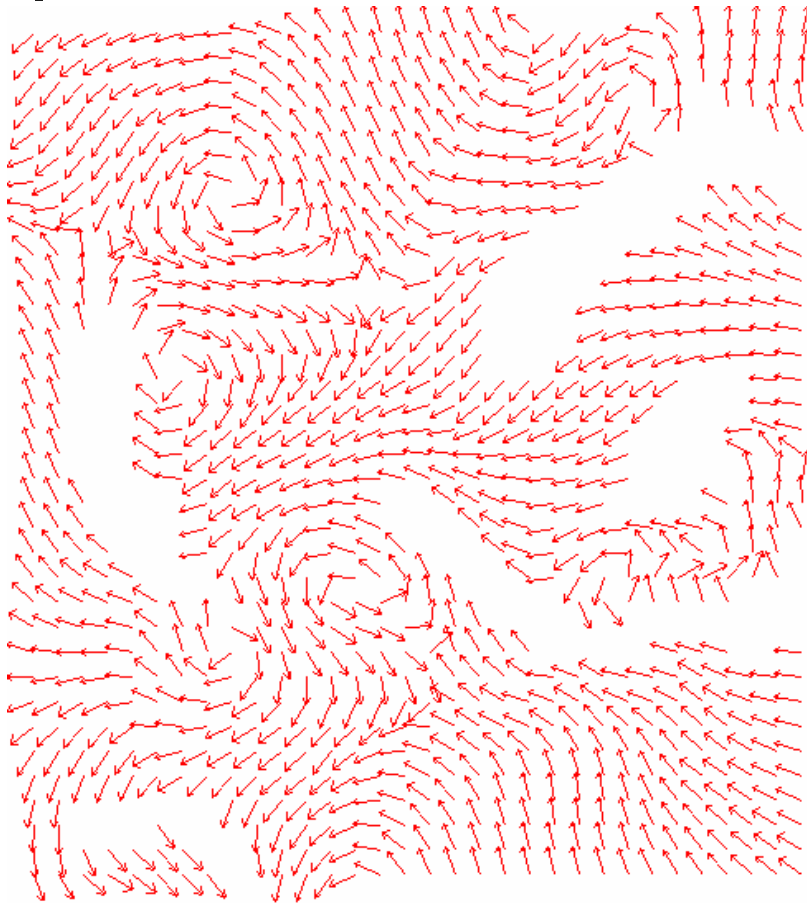


1e-13

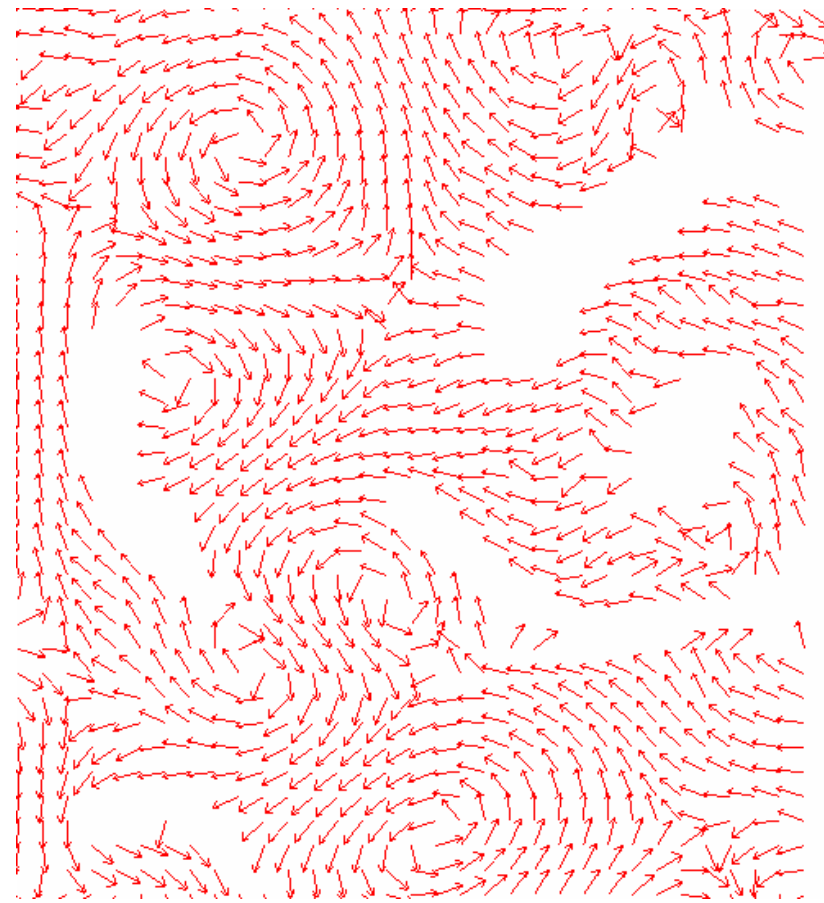
1e-11



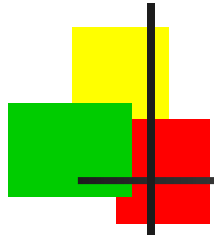
# Résultats



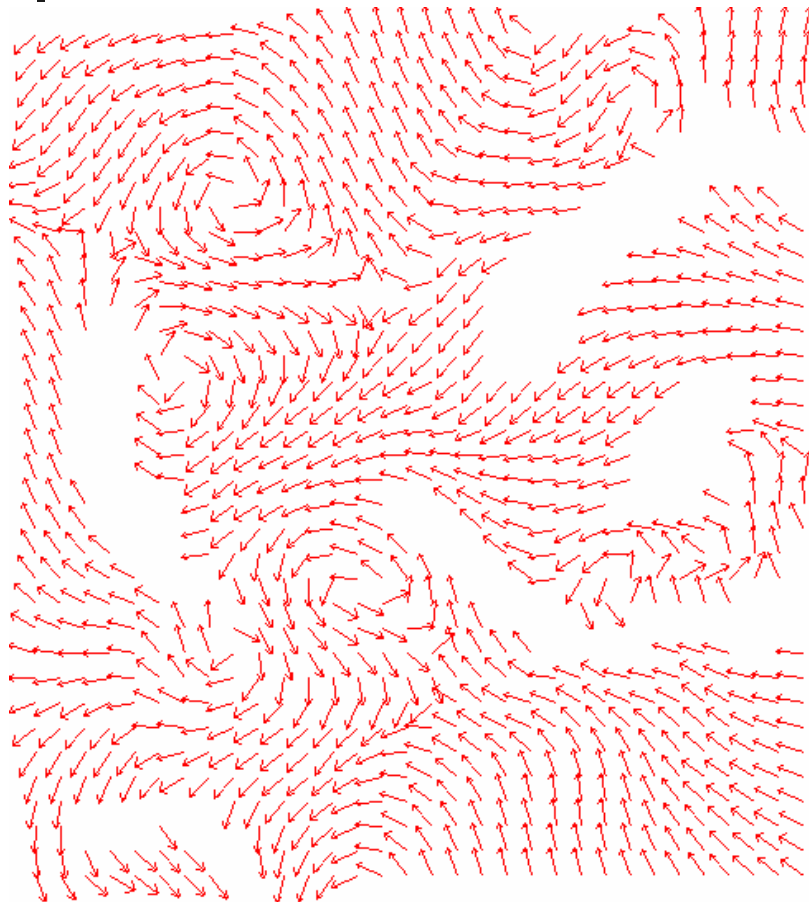
Mouvement non calculé à l'intérieur des filaments



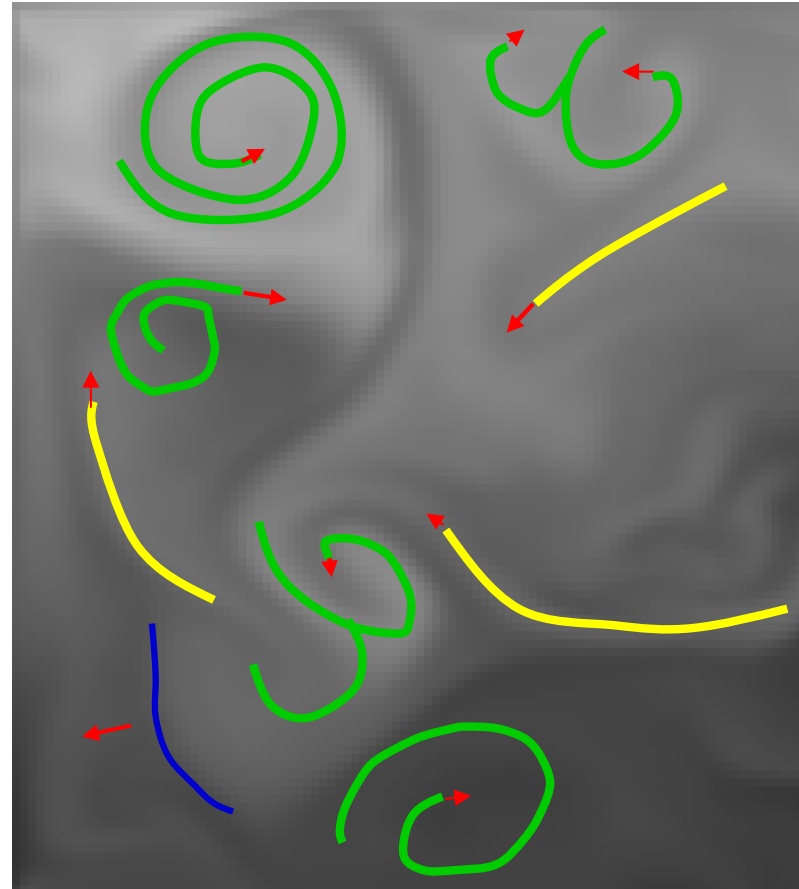
Mouvement réel, masqué sur les filaments

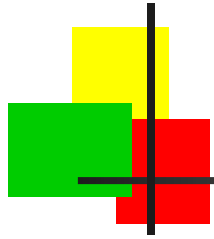


# Résultats

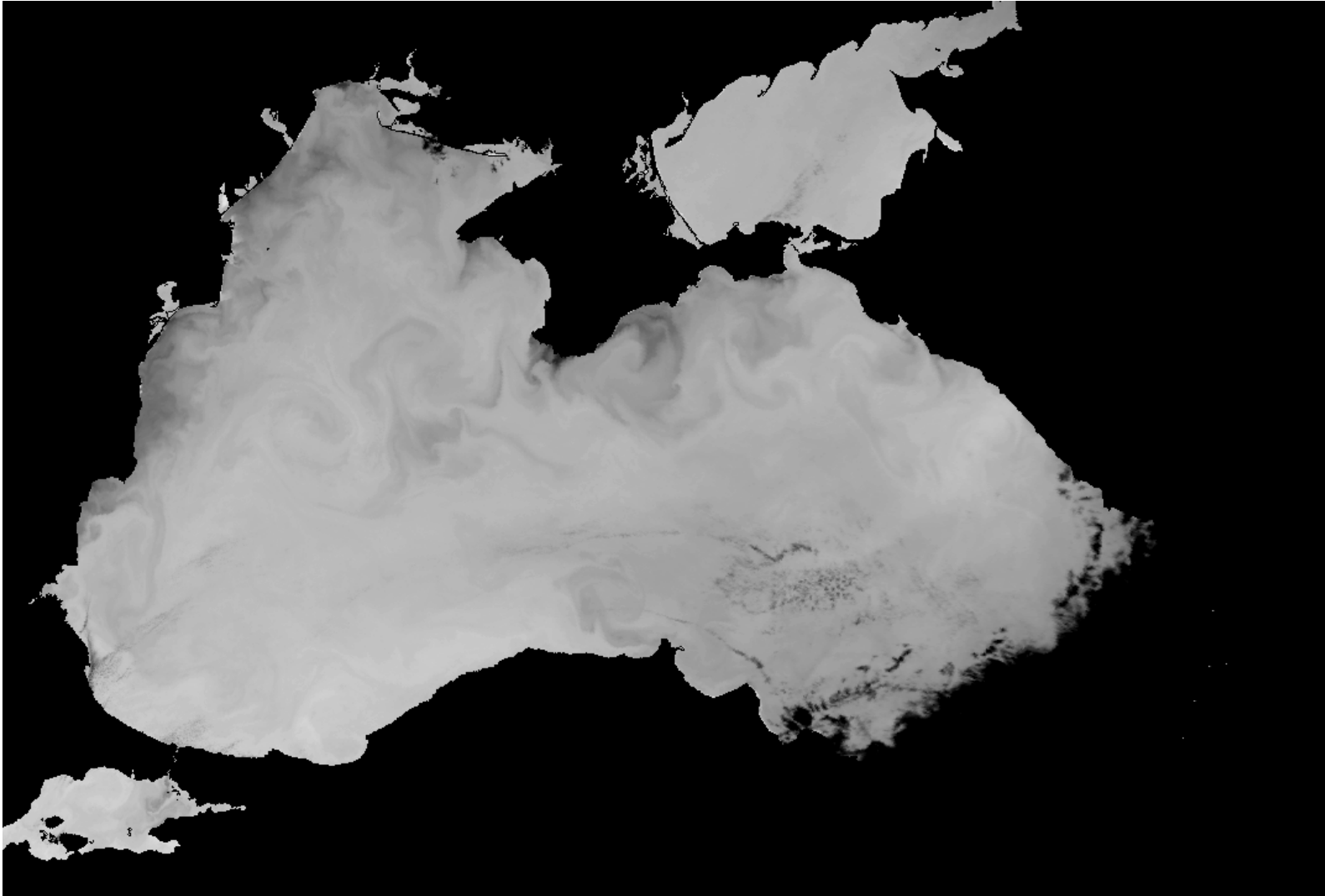


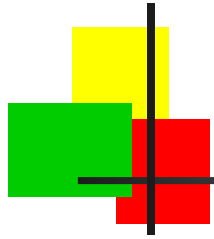
Mouvement non calculé à l'intérieur des filaments





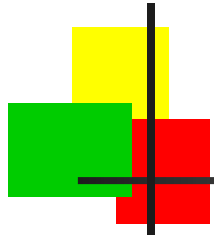
# Données réelles : Mer Noire





# Les images de la Mer Noire

- Liste des problèmes sur les images réelles :
  - Les rapides variations globales de la température,
  - Les variations de grande échelle spatiale de la température,
  - Les nuages,
  - Les zones de saturation,
  - Les échauffements/refroidissements soudains et localisés, qui ne sont pas dus au transport.



# Modèle de circulation

## ■ *Shallow-water*

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du}{dt} - fv = g' \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau^{(x)}}{\rho_0 h} + A_h \Delta u \\ \frac{dv}{dt} + fu = g' \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\tau^{(y)}}{\rho_0 h} + A_h \Delta v \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0. \end{array} \right.$$

$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$  Vitesse horizontale

$h$  Épaisseur de la couche de mélange

$\vec{\tau} = (\tau^{(x)}, \tau^{(y)})$  Tension du vent

$g' = g(\rho_0 - \rho_1)/\rho_0$  Gravité réduite

$f = f_0 + \beta y$  Paramètre de Coriolis





# Assimilation de l'élévation de surface

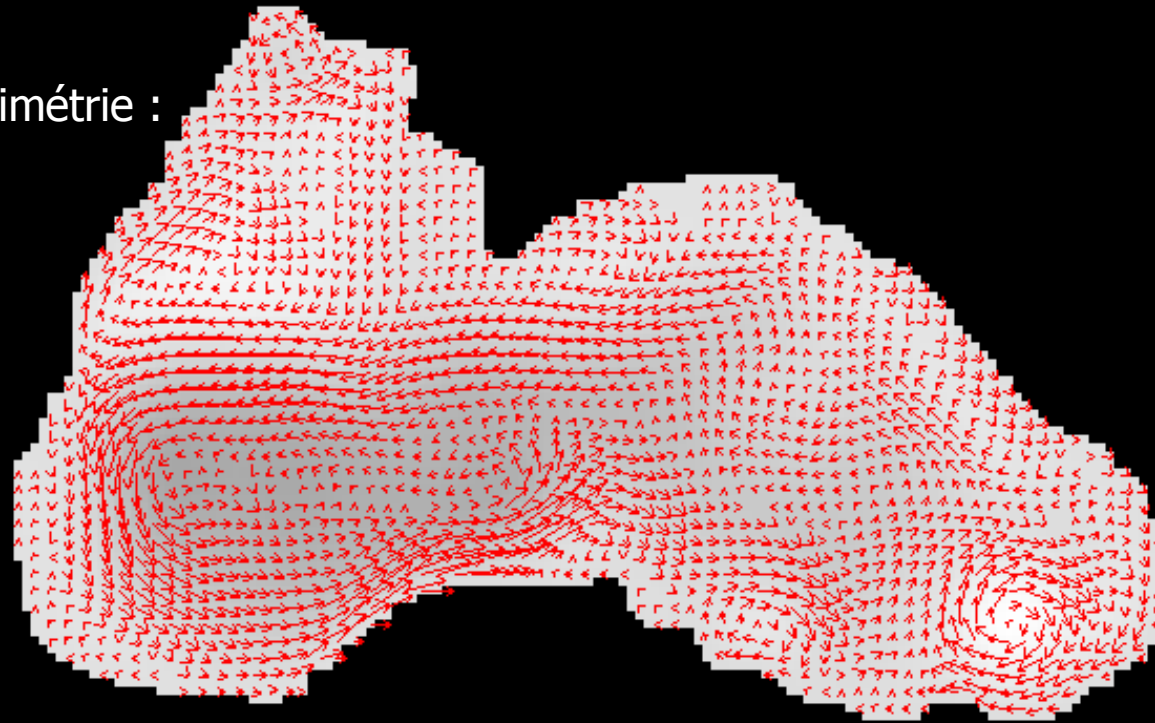
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du}{dt} - fv = g' \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau^{(x)}}{\rho_0 h} + A_h \Delta u \\ \frac{dv}{dt} + fu = g' \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\tau^{(y)}}{\rho_0 h} + A_h \Delta v \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = \lambda[\xi_d - \xi_m] \end{array} \right.$$

avec  $\lambda[\xi_d - \xi_m] = \lambda[h_{obs} - h_{mod}]$

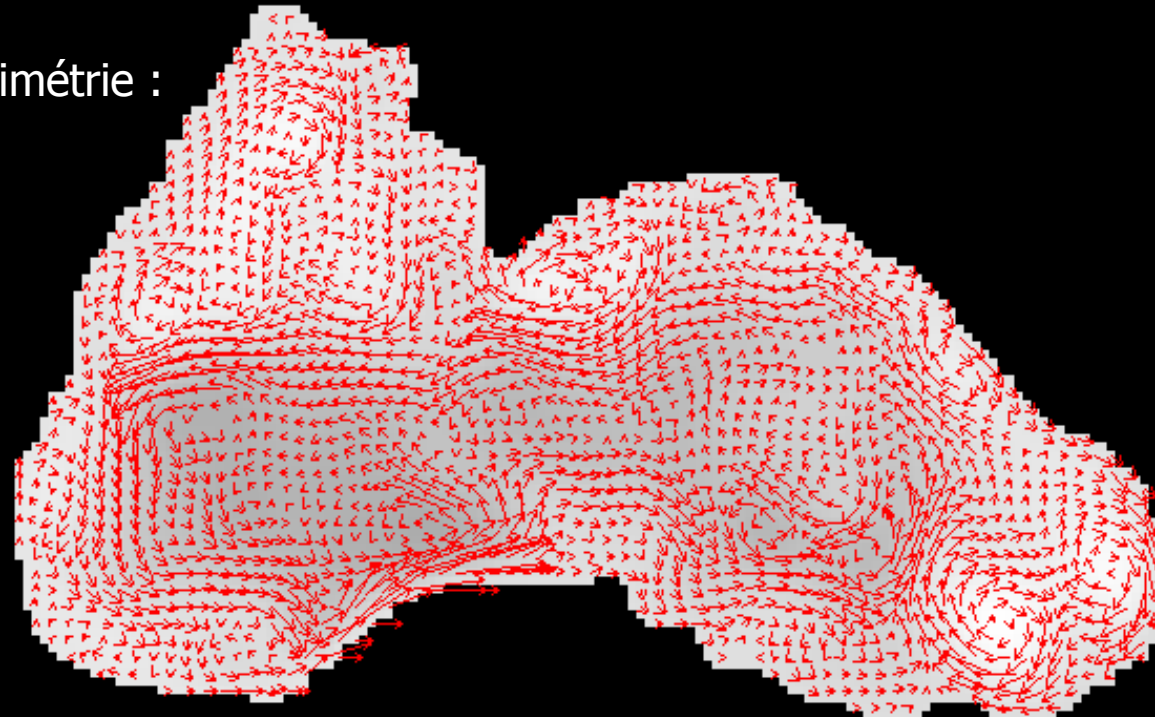
où  $\xi_d$  est la valeur observée par l'altimètre de TOPEX/POSEIDON

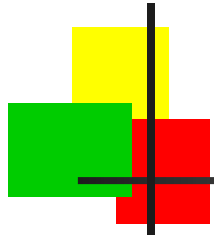
et  $\xi_m = h_{mod} - h_0$

Sans assimilation de l'altimétrie :



Avec assimilation de l'altimétrie :





# Objectifs

---

- Assimiler la vitesse calculée avec le traitement d'image.
  - Correction des artefacts sur les images
- Première étape : utiliser la même technique de *nudging* pour l'assimilation de la vitesse.