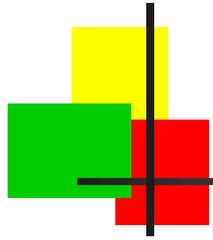


Assimilation de données images pour l'océanographie

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

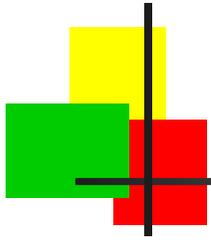
*CLIME – INRIA/CEREA-ENPC

** MHI -- Ukraine



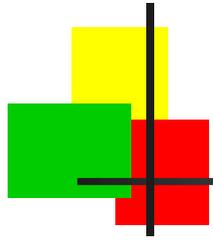
Problèmes

- **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.

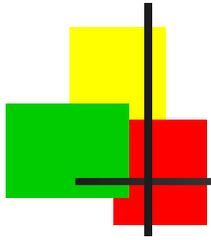
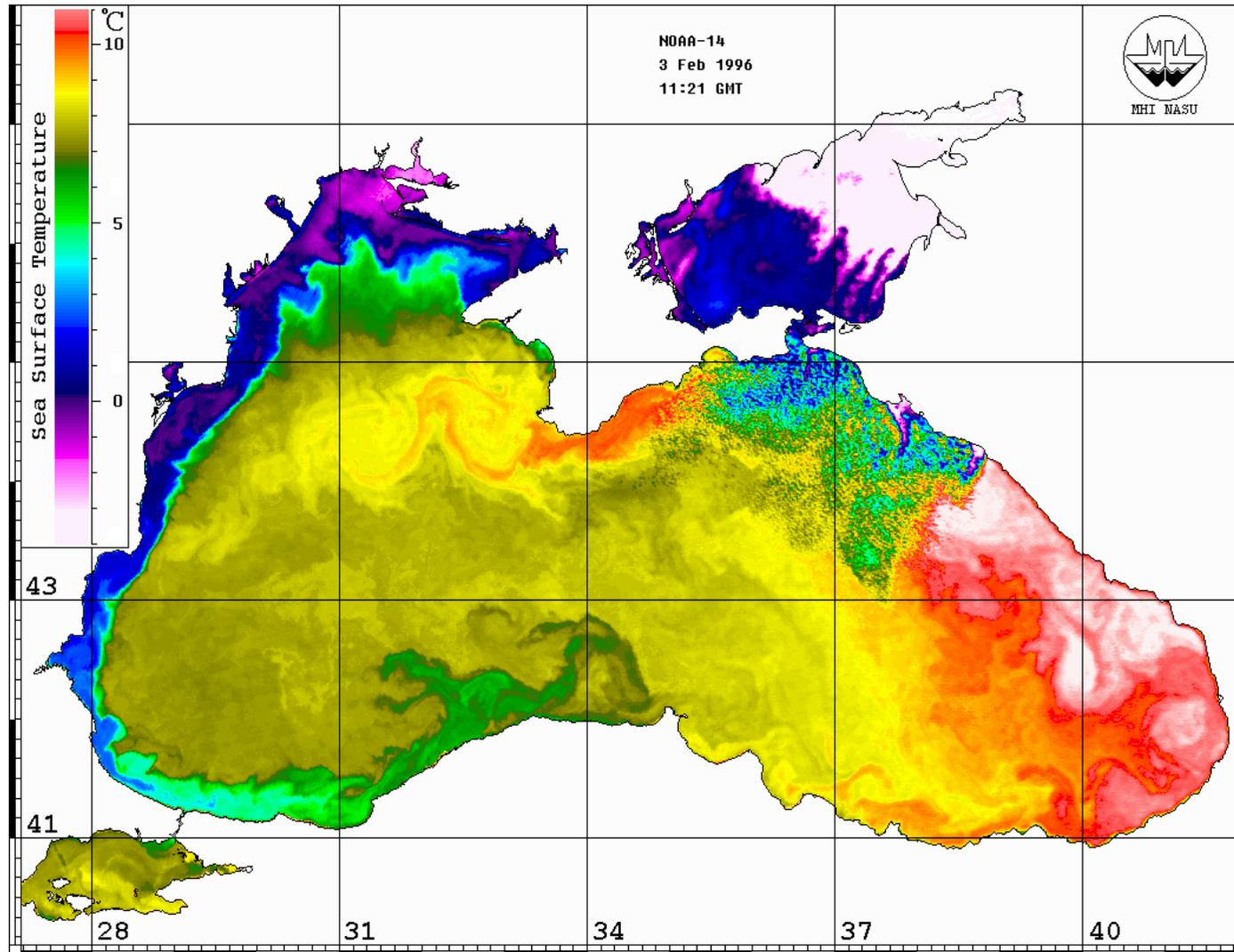
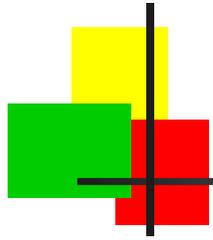


Image SST : Mer Noire

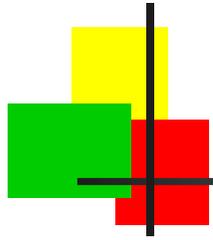


Marine Hydrophysical Institute - Ukraine



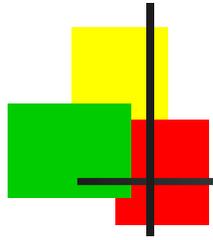
Notre stratégie

- 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.

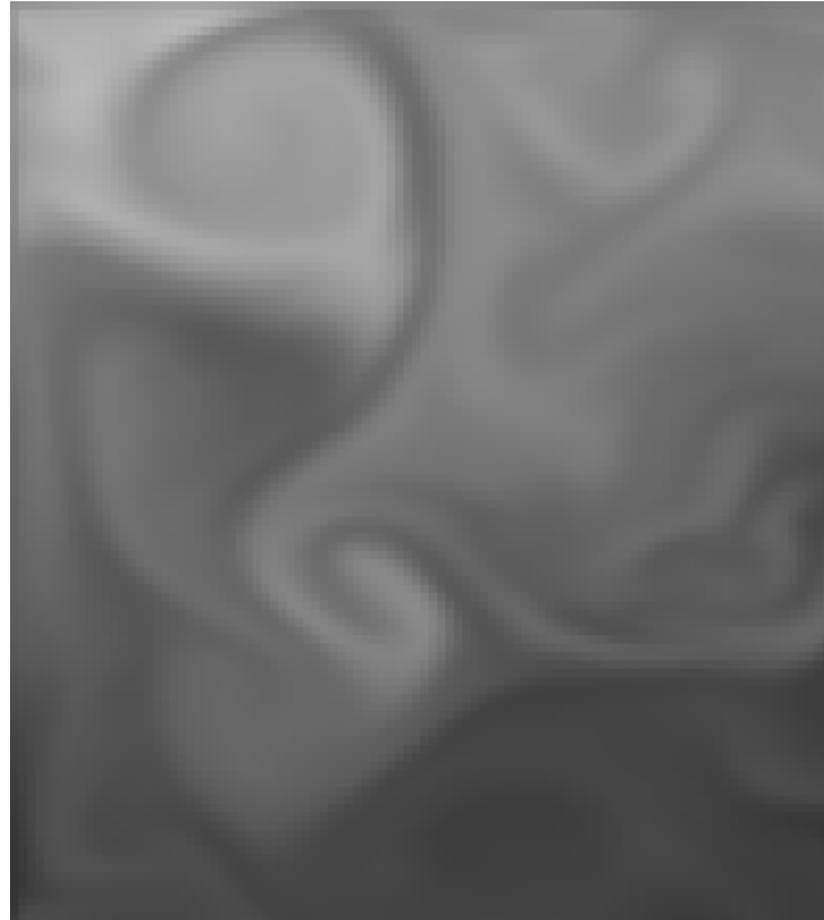


Données simulées

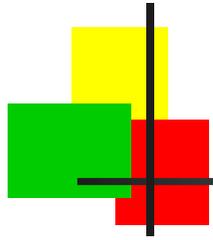
- Modèle 3D OPA.
- SST
- Champ de vecteurs vitesse.
- Résolution spatiale de 5km et temporelle de 24h.
- Zone de 500km²



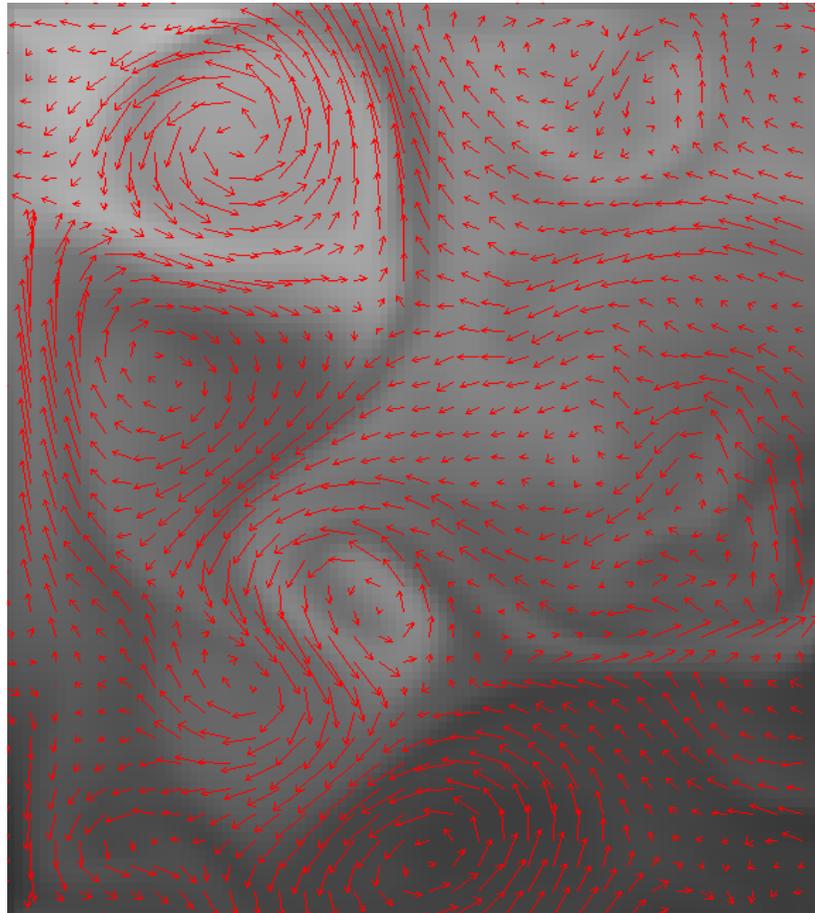
Données simulées



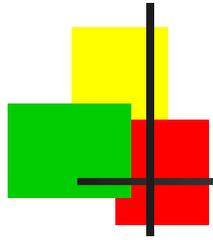
SST



Données simulées



SST et Champ de vitesses

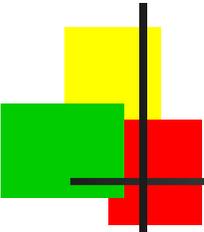


Estimation de la vitesse

- 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.



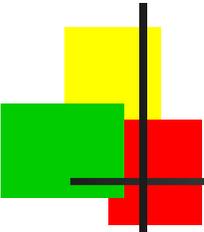
Quelle équation de conservation ?

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:

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



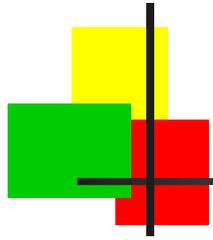
Quelle équation de conservation ?

3. Conservation de la température avec approximation Boussinesq

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

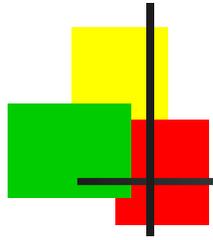
4. Equation d'advection-diffusion

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



Conclusion pour la SST

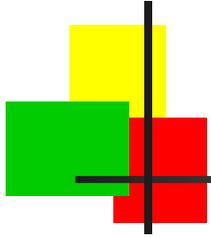
1. Conservation de la luminance : **pas si mal!**
Mais pas respectée partout ;
2. Conservation de la masse **inadéquate pour la SST ;**
3. Conservation de la température : **équivalente à conservation de luminance**, diffusivité horizontale très petite ;
4. Advection diffusion : **équivalente à conservation 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 :

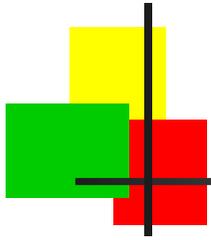
$$\nabla I \quad \text{et} \quad I_t \simeq 0$$



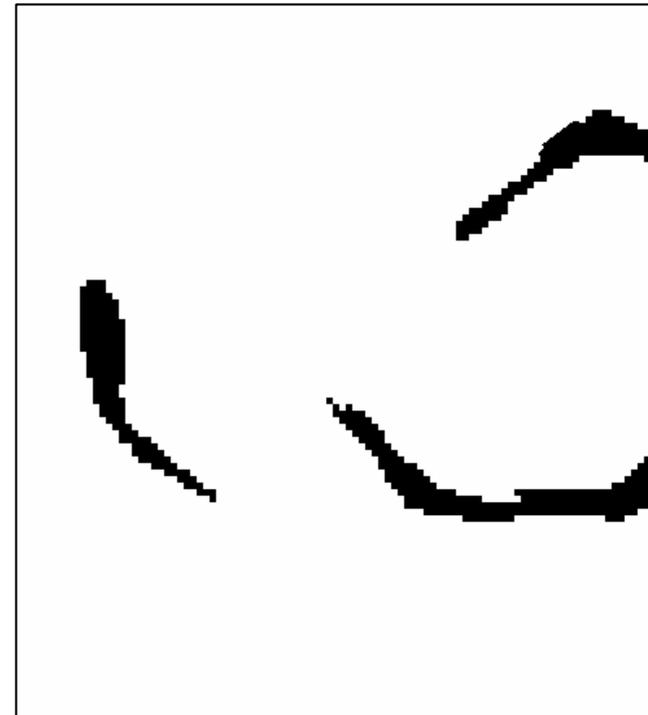
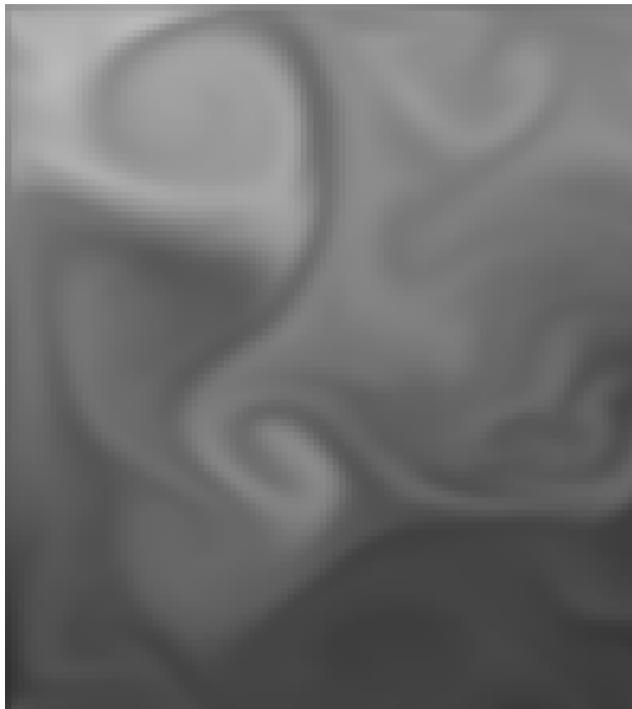
Propriétés des filaments

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

➔ Morphologie mathématique



1. Detection des filaments



SST → opérateur Pic → Seuillage → Matrice d'inertie

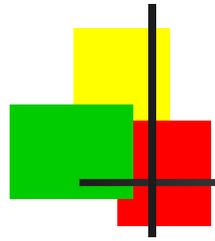
→ Structures allongées → Déplacement parallèle → Filaments clairs

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 ∇I et I_t



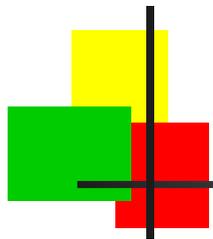
Quelle contrainte de régularité ?

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

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

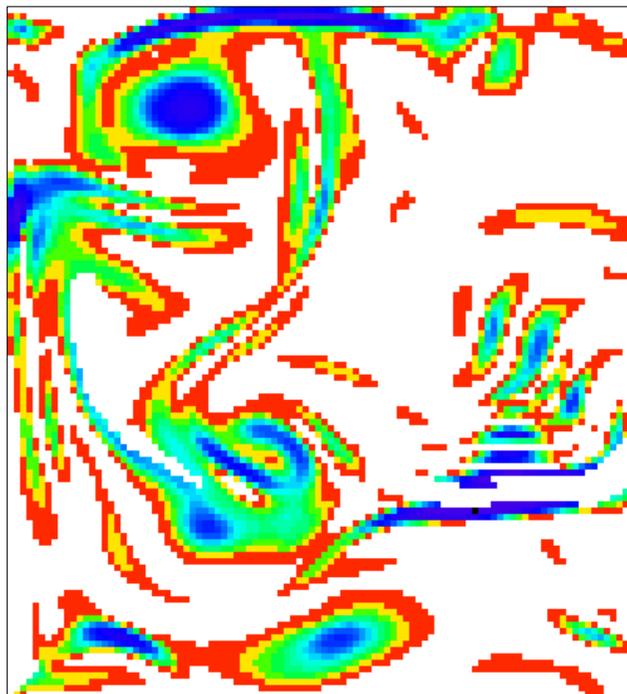
2. Régularité Div/Curl

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



Contraintes de régularité

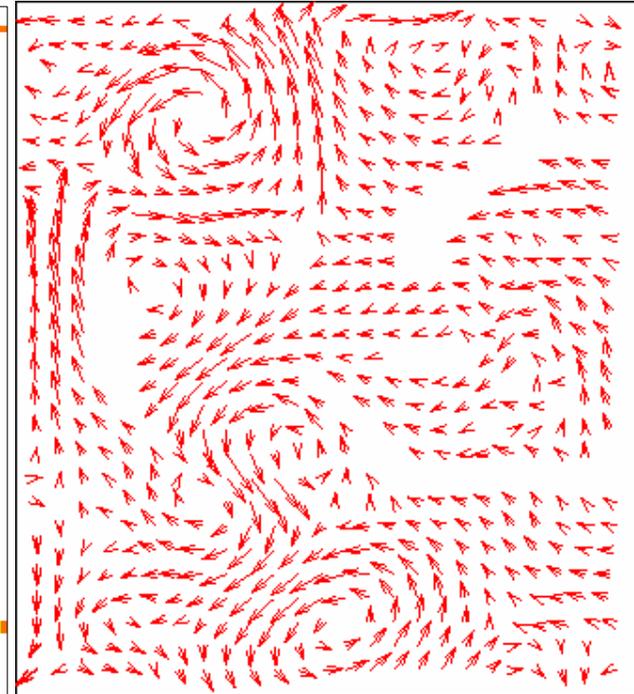
Norme du gradient



Div / Curl



w



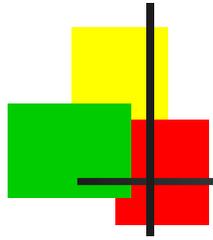
1e-7

1e-5

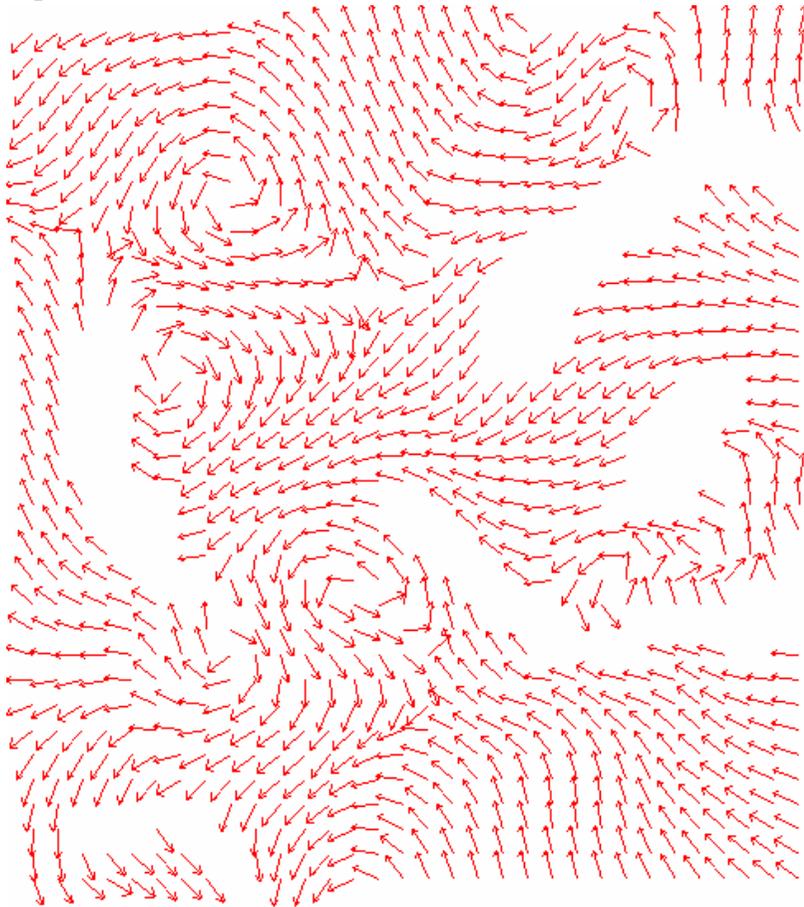


1e-13

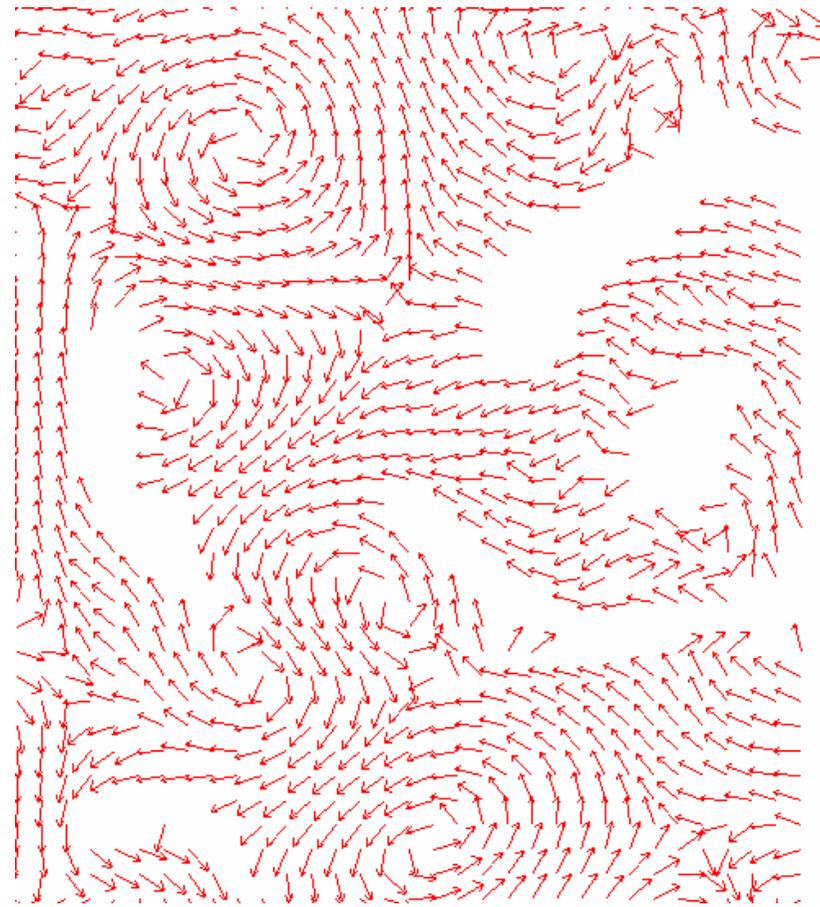
1e-11



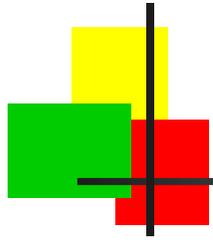
Résultats



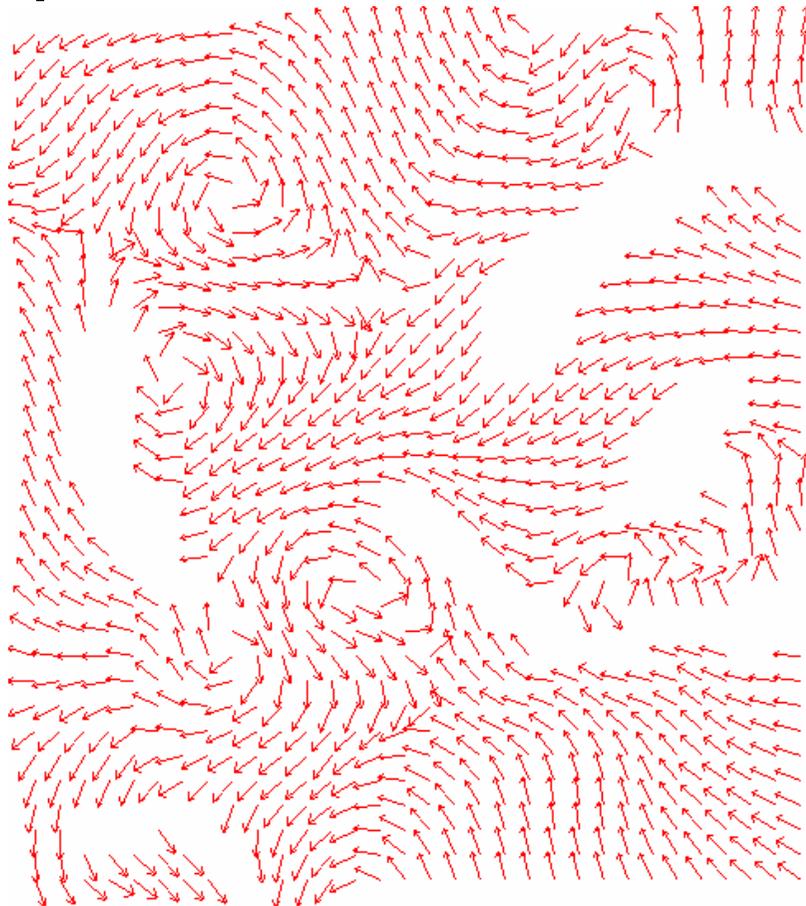
Mouvement non calculé à l'intérieur des filaments



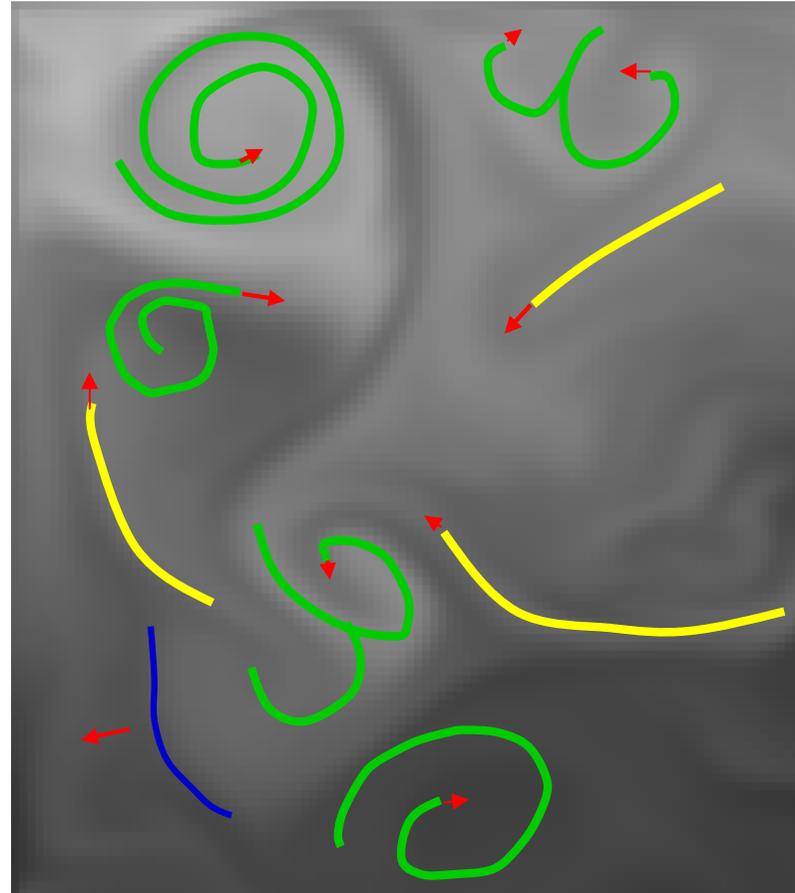
Mouvement réel, masqué sur les filaments

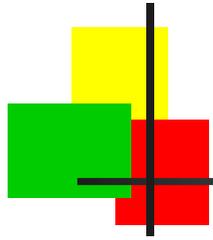


Résultats



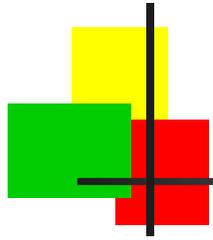
Mouvement non calculé à l'intérieur des filaments





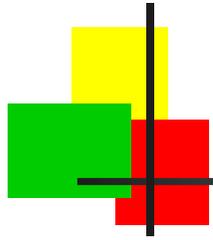
Données réelles : Mer Noire





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*

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

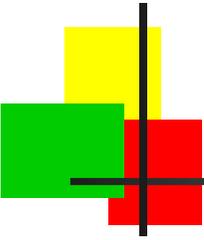
$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$ Vitesse horizontale

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

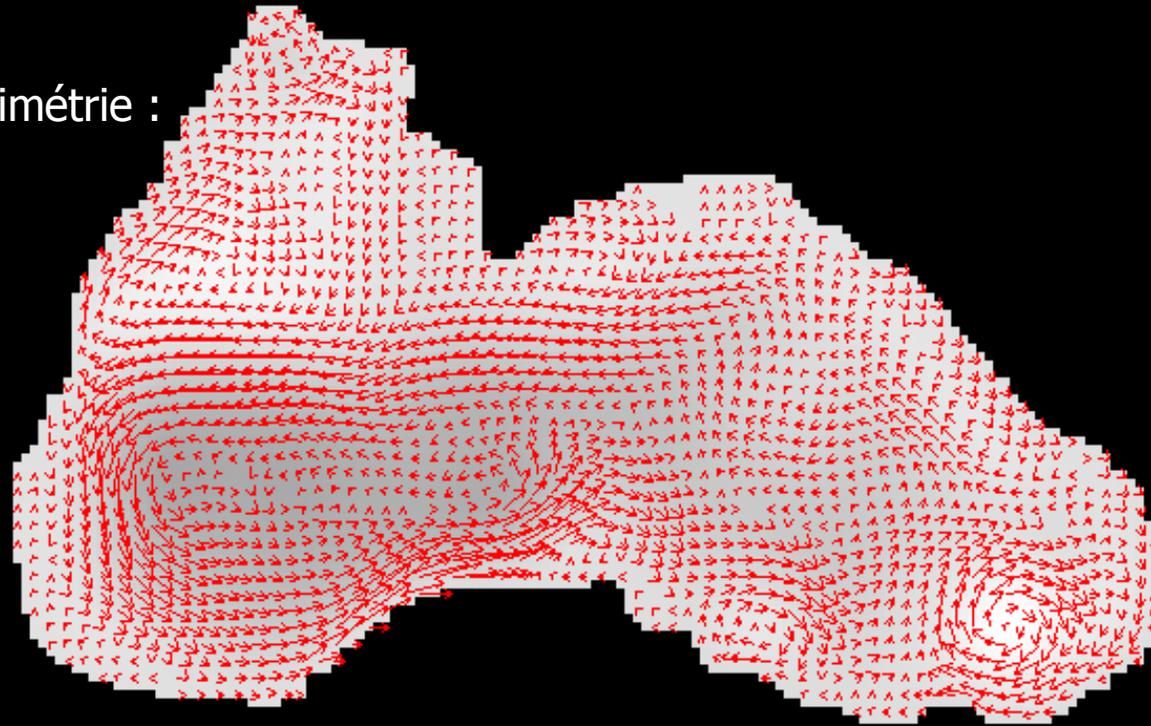
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du}{dt} - fv = g' \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau^{(x)}}{\rho_0 h} + A_h \Delta u \\ \frac{dv}{dt} + fu = g' \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\tau^{(y)}}{\rho_0 h} + A_h \Delta v \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial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

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

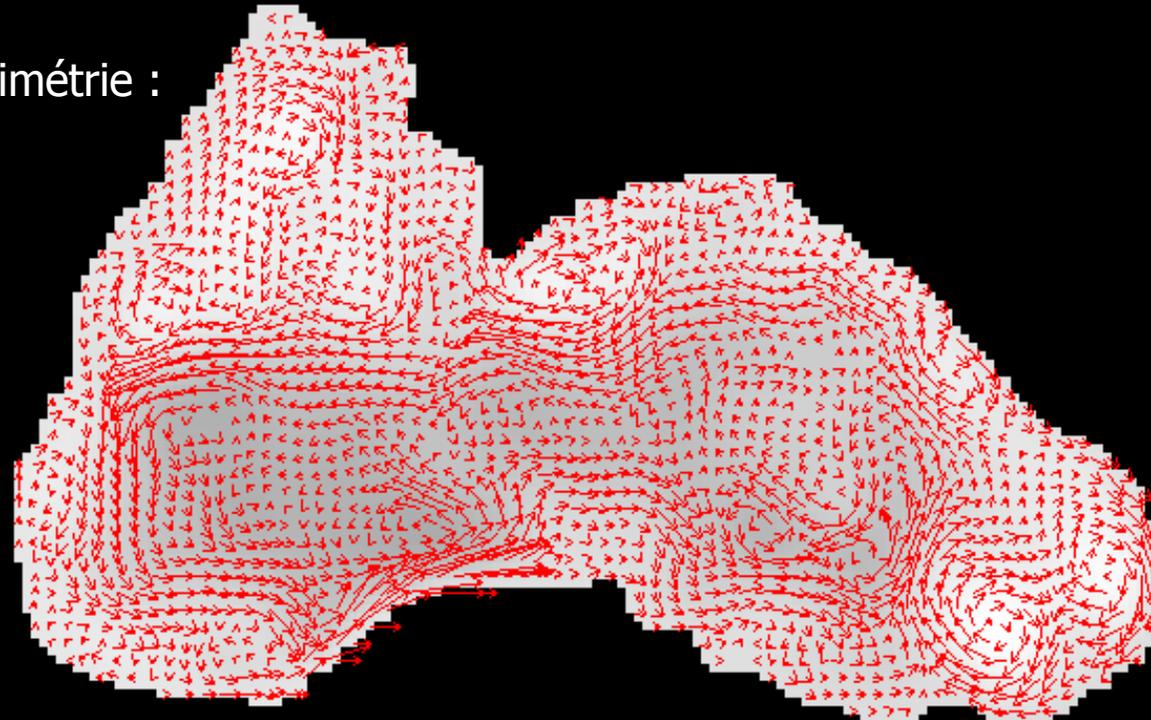
où ξ_d est la valeur observée par l'altimètre de TOPEX/POSEIDON

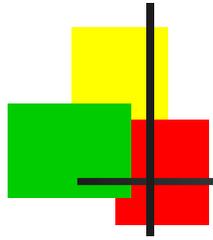
et $\xi_m = h_{mod} - h_0$

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.