

# Assimilation d'images pour la prévision de l'évolution de fluides géophysiques

I. Herlin, E. Huot, F.X. Le Dimet, E. Mémin

23-Nov-05

INSTITUT NATIONAL  
DE RECHERCHE  
EN INFORMATIQUE  
ET EN AUTOMATIQUE



# Partenaires

- Collaboration entre 8 laboratoires :
  - INRIA
    - IDOPT (Grenoble) – Assimilation de données
    - CLIME (Paris) – Traitement d'image et assimilation de données
    - VISTA (Rennes) – Traitement d'image
  - CEMAGREF
    - ETNA (Grenoble) – Avalanches
    - ENGREF (Montpellier) – Hydrologie
    - Aerobio (Rennes) – Aérologie et mécanique des fluides
  - CNRS
    - LGGE (Grenoble) – Glaciologie
    - LEGI (Grenoble) – Océanographie
- Collaboration extérieure avec le MHI (Ukraine) – Océanographie

# Participants

- LMD – IMAG – Projet IDOPT
  - **François-Xavier Le Dimet**
  - Anestis Antoniadis
  - Jianwey Ma
- IRISA Projet Vista
  - Anne Cuzol
  - **Etienne Mémin**
  - Nicolas Papadakis
- INRIA Projet CLIME
  - Jean-Paul Berroir
  - **Isabelle Herlin**
  - Etienne Huot
  - Till Isambert
- National Institute of Science of Ukraine (MHI)
  - **Gennady Korotaev**

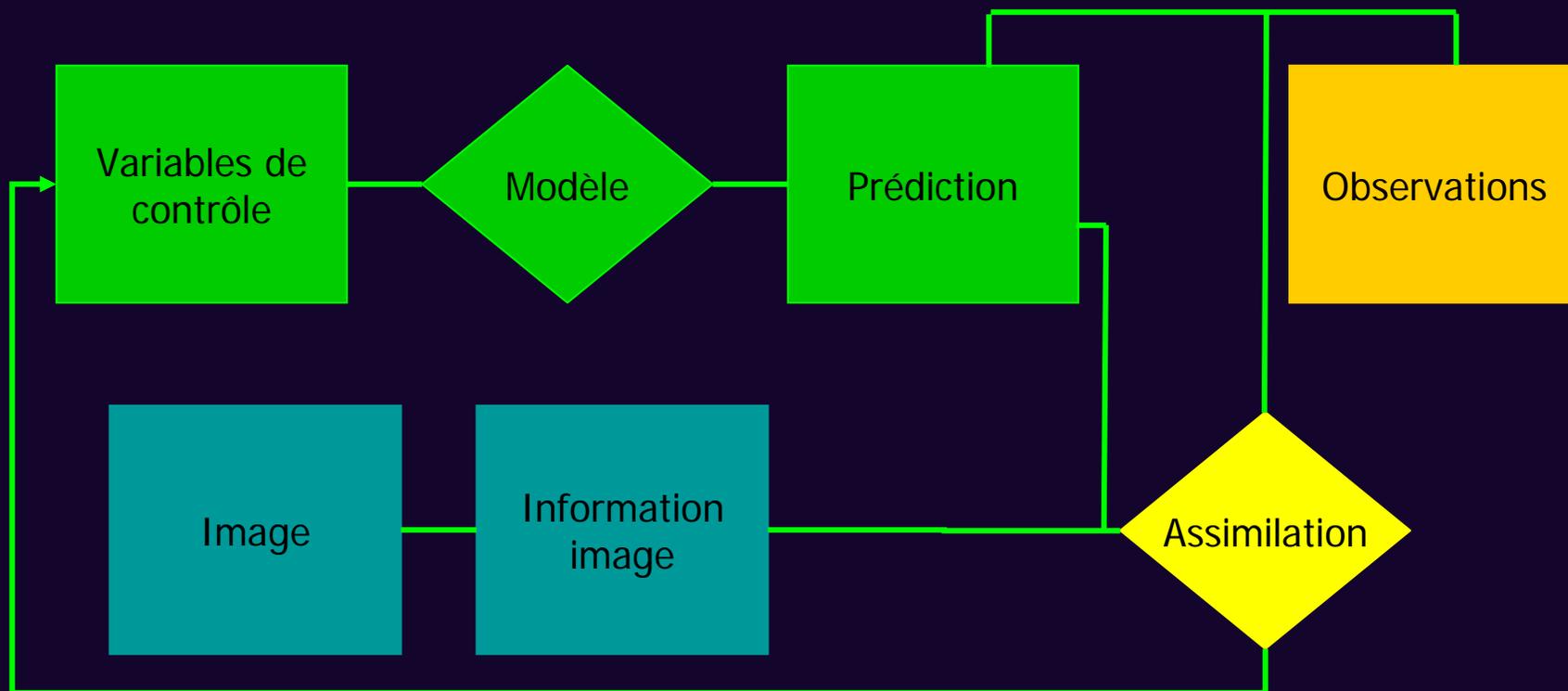
# Assimilation de Données

- Un modèle numérique sans donnée d'observation n'est que de peu d'utilité.
- Des données seules ne suffisent pas pour établir une prévision fiable.
- Les modèles mathématiques contiennent des paramètres inaccessibles à la mesure (exemple : paramétrisation sous-maille).
- Beaucoup de phénomènes géophysiques requièrent une condition initiale précise.

# Pourquoi utiliser des images ?

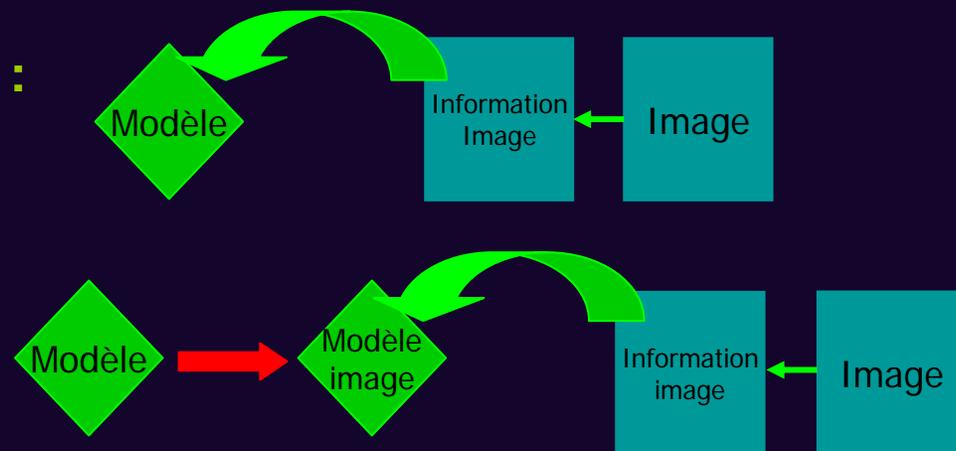
- Classiquement, les données utilisées en assimilation sont des mesures *in situ* et/ou à distance des variables d'état.
- Les images apportent une information complémentaire :
  - Fonction des variables d'état,
  - Structurée spatialement et temporellement.
- Exemple en météo :
  - *Identification visuelle* des cyclones tropicaux,
  - Calcul *à la main* de pseudo-observations de la pression dans ces dépressions.

# Assimilation de données images

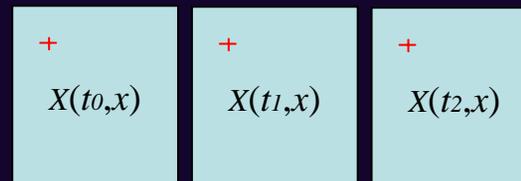


# Classifications possibles

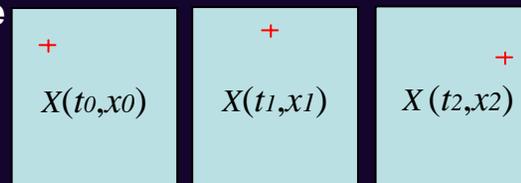
- **Typologie 1 :**



- **Typologie 2 :** Représentation eulérienne



Représentation langrangienne



- **Typologie 3 :** Approches stochastique

Approches déterministes

# Problèmes

- **Quelles images** : statiques ou dynamiques ?
- **Quelle information image** est utile pour contraindre le modèle ?
- **Espace image** : adapté à la représentation des données : frontières de structures, trajectoires lagrangiennes, champ de vitesses, *etc.*
- Définition d'une **norme** dans l'espace image pour calculer la distance entre les solutions du modèle et les observations.
- **Opérateur** pour passer de l'espace image à l'espace d'état.

# Océanographie

- Données image

- **SST** (*Sea Surface Temperature*) : estimées à partir de mesures infrarouges.
- Capteur **NOAA/AVHRR** : acquisition quotidienne, résolution 1-5km.
- Région géographique : Mer Noire

- Modèle de simulation

- **Shallow-water** : modèle bidimensionnel basé sur les équations de Saint-Venant (MHI – Ukraine)

- Structures d'intérêt

- Champ de **vitesse de circulation**
- **Trajectoires lagrangiennes**

# Image SST : Mer Noire



Marine Hydrophysical Institute - Ukraine



## Modèle *shallow-water*

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

- $u$  et  $v$  : les composantes de la vitesse *shallow-water*
- $h$  : l'épaisseur de la couche de mélange

# Traitement des images

- Recherche de la méthode **la plus appropriée** pour l'estimation de la vitesse de surface.
- **Apprentissage** sur des données simulées et le champ de vitesses associé.

→ Équation de conservation la plus adaptée :  $\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla T \cdot \mathbf{w} = 0$

Mais cette équation n'est **pas respectée partout**.

- Masquage des régions ne respectant pas l'équation (filaments, zones sans contraste).
- Contrainte de régularité la plus adaptée aux vitesses simulées :

$$\min \int_{image} \alpha \|\nabla \operatorname{div} \mathbf{w}\|^2 + \beta \|\nabla \operatorname{curl} \mathbf{w}\|^2$$

# Traitement des images

- Estimation de la vitesse

- ➔ Prétraitement des images réelles pour tenir compte de :

- ➔ Nuages

- ➔ Saturation du capteur

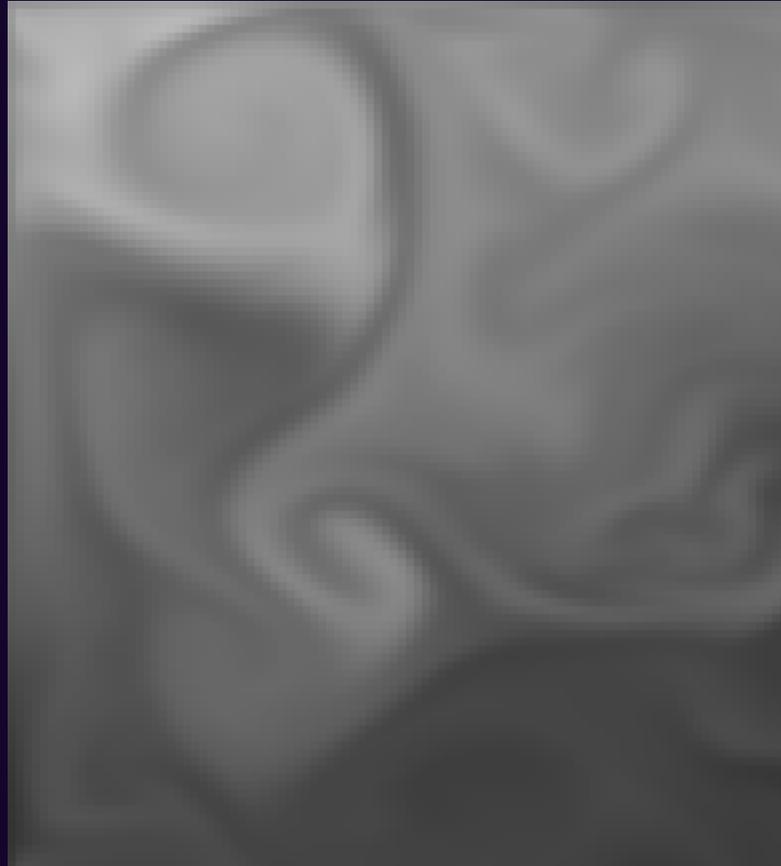
- ➔ Données manquantes

- ➔ Variations spatiales de grande amplitude

- ➔ Rapide variation de la moyenne locale de la température

- ➔ Résolution par champ de vecteurs *spline* afin de s'appuyer sur des points de contrôle (zones non masquées).

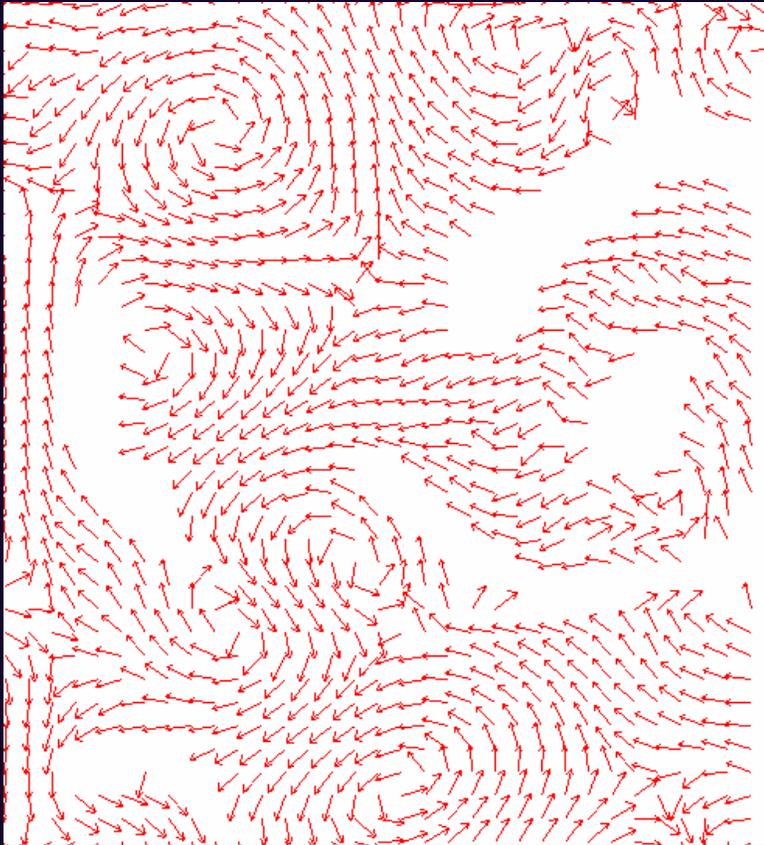
# Image température simulée



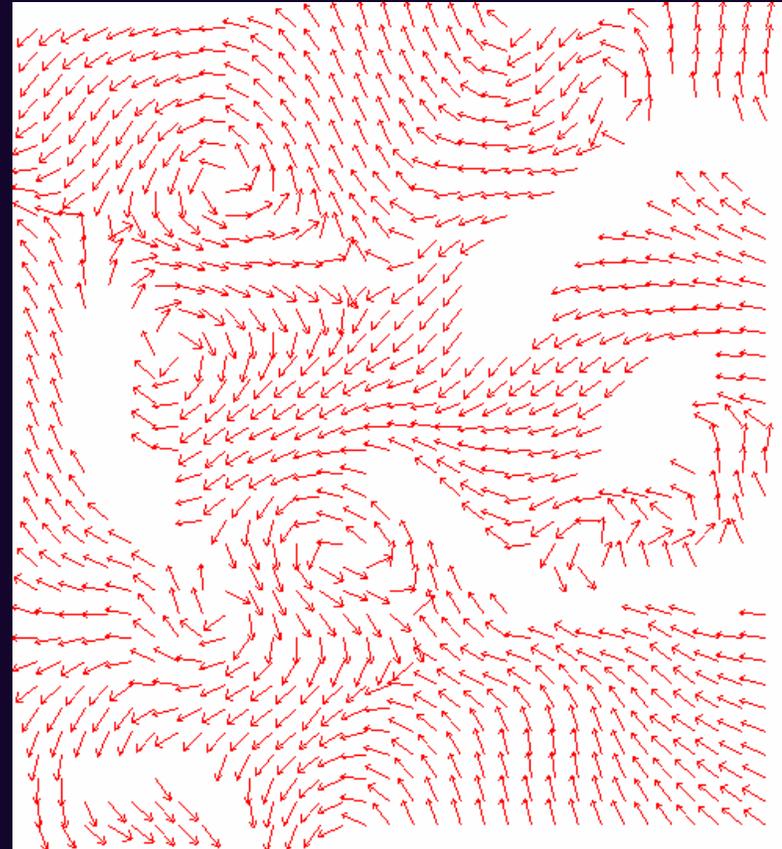
Modèle OPA - LOCEAN



# Résultats

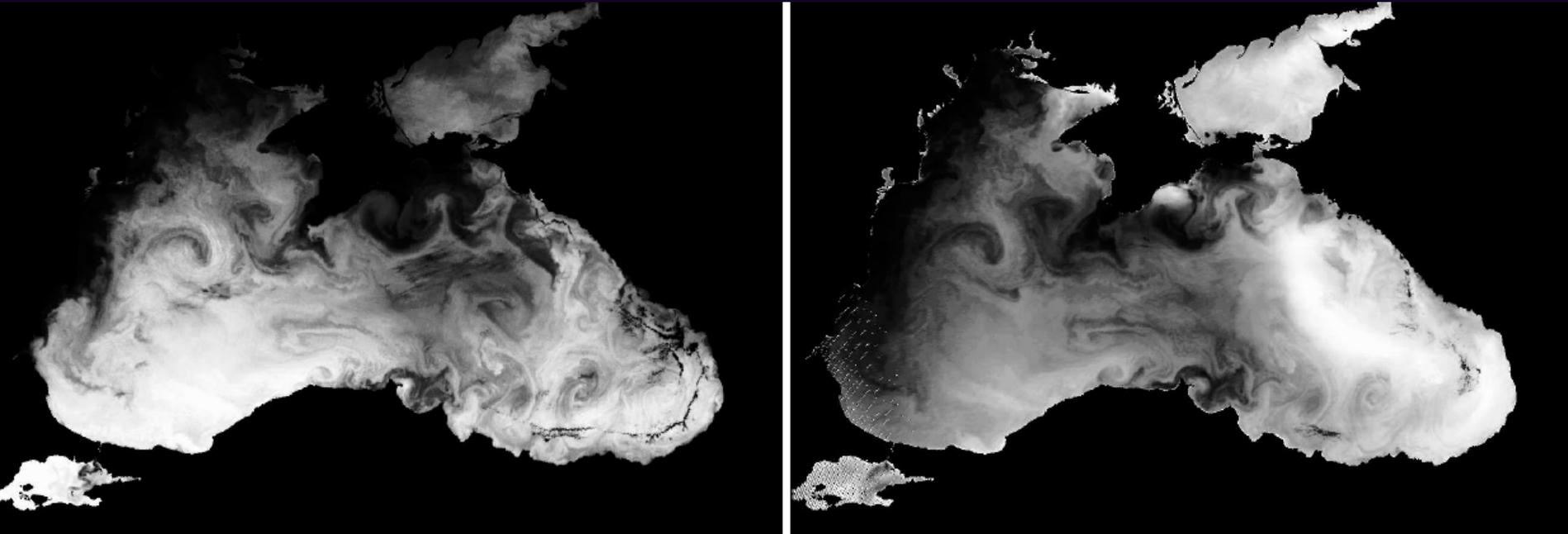


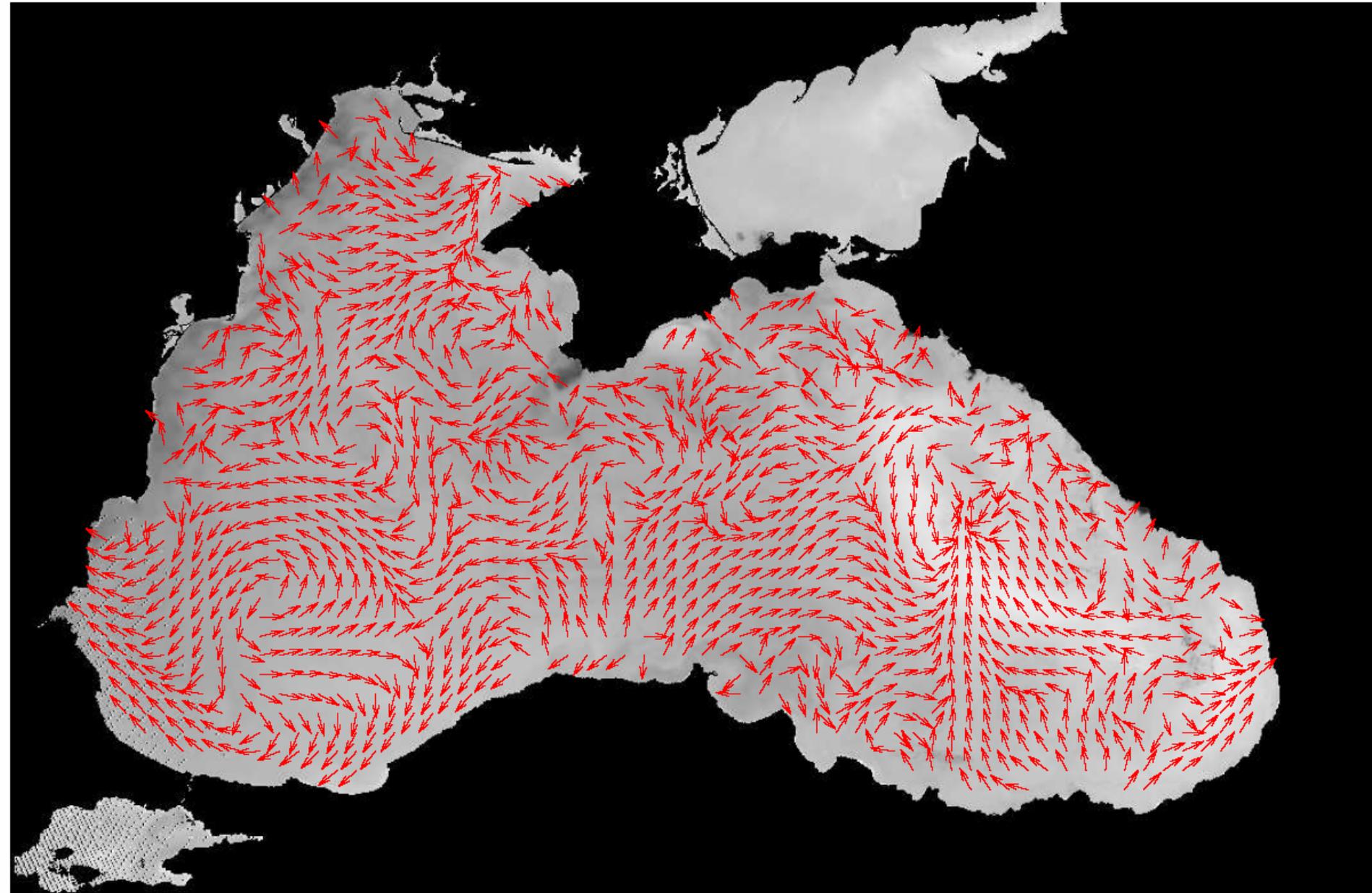
Vitesse simulée



Vitesse estimée

# Deux images consécutives





# Assimilation

- On peut écrire le modèle comme :

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = F(X, C) \\ X(0) = V \end{cases}$$

où :

- $X$  correspond à la variable d'état,
- $C$  est le vecteur de contrôle
- $V$  la valeur initiale

# Assimilation de données séquentielle

- Le **filtre de Kalman** utilise la prédiction  $X$  et l'observation  $X_{obs}$  pour calculer l'analyse :

$$a = \mathbf{K}[X_{obs} - \mathbf{H}X] + X$$

où  $\mathbf{H}$  est l'opérateur d'observation.

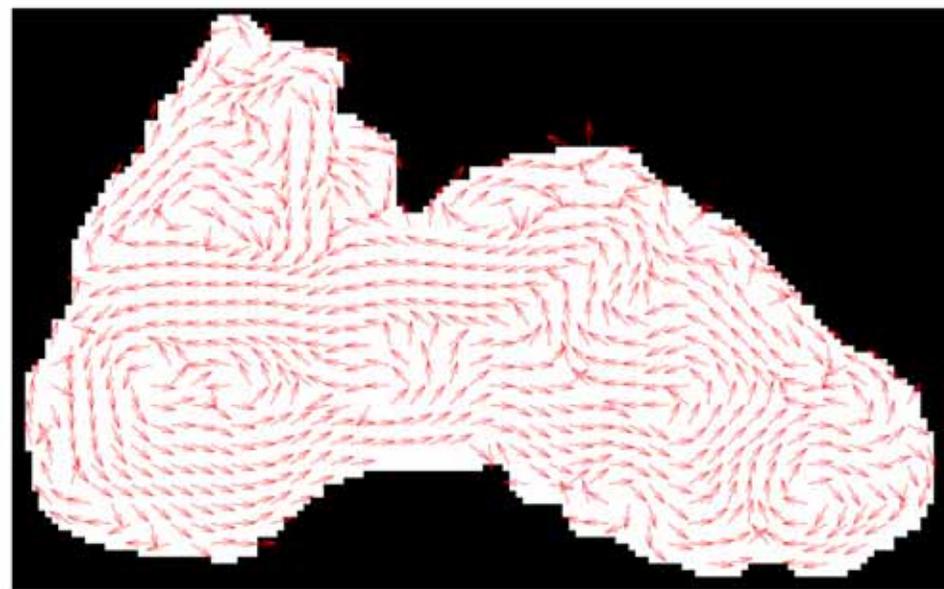
- Les méthodes de **Nudging** simplifient et  $\mathbf{K}$  est remplacée par le terme constant  $\lambda$  :

$$a = \lambda[X_{obs} - \mathbf{H}X] + X$$

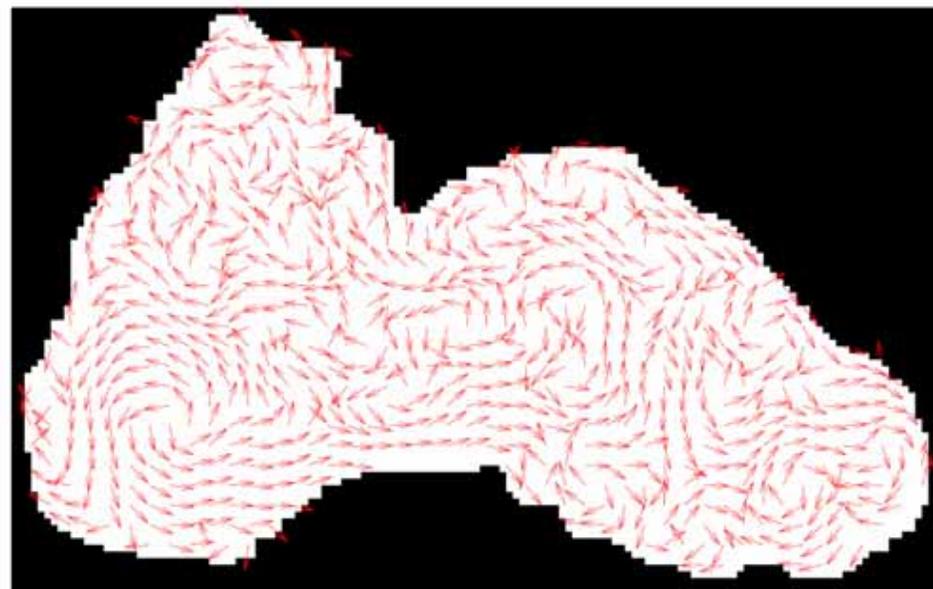
# Assimilation de la vitesse estimée dans le modèle *shallow-water*

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{du}{dt} - fv = g' \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau^{(x)}}{\rho_0 h} + A_h \Delta u \\
 + \lambda \left[ \frac{u_{obs}}{\sqrt{u_{obs}^2 + v_{obs}^2}} - \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right] \times (\sqrt{u^2 + v^2}) \\
 \\
 \frac{dv}{dt} + fu = g' \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\tau^{(y)}}{\rho_0 h} + A_h \Delta v \\
 + \lambda \left[ \frac{v_{obs}}{\sqrt{u_{obs}^2 + v_{obs}^2}} - \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right] \times (\sqrt{u^2 + v^2}) \\
 \\
 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0.
 \end{array} \right.$$

# Résultats avec et sans assimilation



Prédiction



Résultat après assimilation des vitesses estimées

L'assimilation des vitesses estimées apporte :

- Structures plus fines : courant large remplacé de la prédiction par des *jets* plus étroits.
- Structures meso-échelles qui apparaissent ou qui sont mieux spécifiées : tourbillons.

# Suivi de courbe et de champ de vitesses par assimilation variationnelle

Ingrédient du système :

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t} + \mathbb{M}(\mathbf{X}) = \nu(\mathbf{x}, t) \\ \mathbf{X}(\mathbf{x}, t_0) = \mathbf{X}_0(\mathbf{x}) + \eta(\mathbf{x}) \\ Y(\mathbf{x}, t) = \mathbb{H}(\mathbf{X}(\mathbf{x}, t)) + \epsilon(\mathbf{x}, t) \end{cases}$$

Vecteur d'état  $\mathbf{X}$  : une surface implicite représentant une courbe + un champ de vitesses

# *Suivi de courbe et de champ de vitesses*

Loi d'évolution de la courbe :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + (w \cdot n - \epsilon \kappa) \|\nabla \Phi\| = \eta_1$$

Loi d'évolution du champ des vitesses :

⇒ Formulation vorticité-vitesse :

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + w \cdot \nabla \xi - \nu_\xi \Delta \xi = \eta_2$$

⇒ Mouvement Brownien pour la divergence :

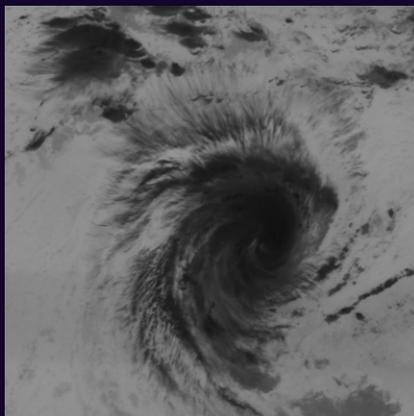
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \nu_\zeta \Delta \zeta = \eta_3$$

# Suivi de courbe et de champ de vitesses

Observations  $Y$  :

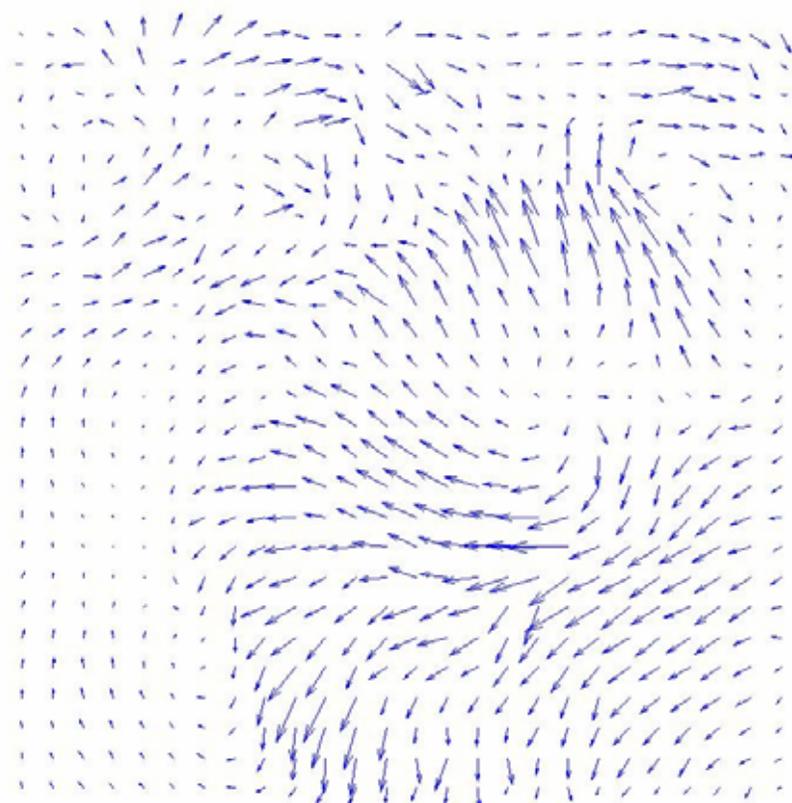
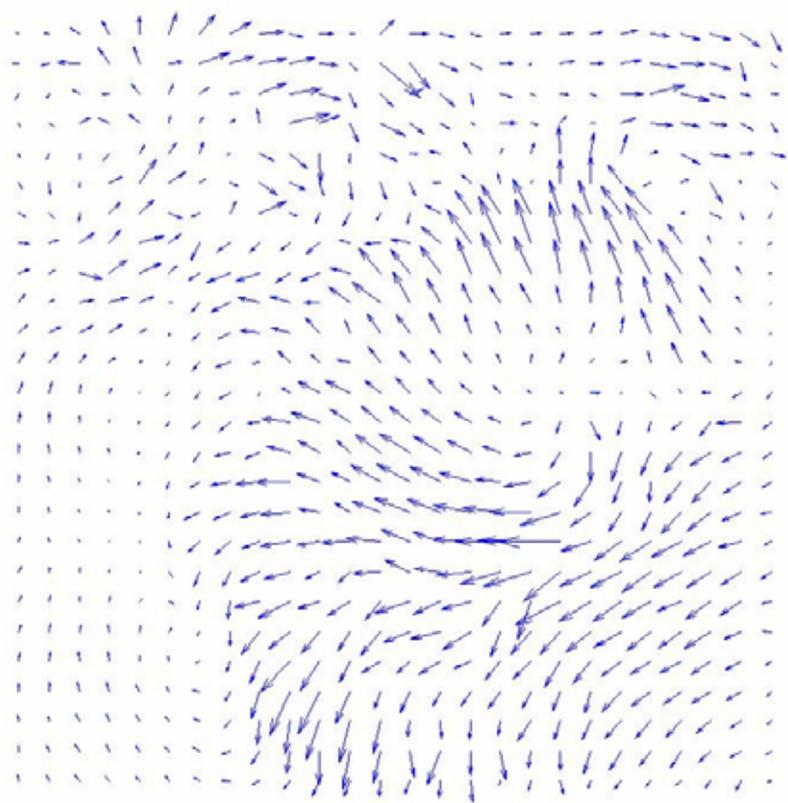
Une courbe de niveau photométrique (i.e. une courbe isotherme sur canal I.R.)

Un champ de mouvement dense estimé au moyen d'un estimateur de mouvement grossier

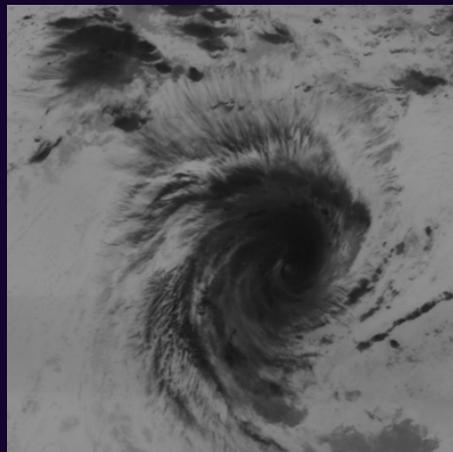


Champ observé

Champ assimilé

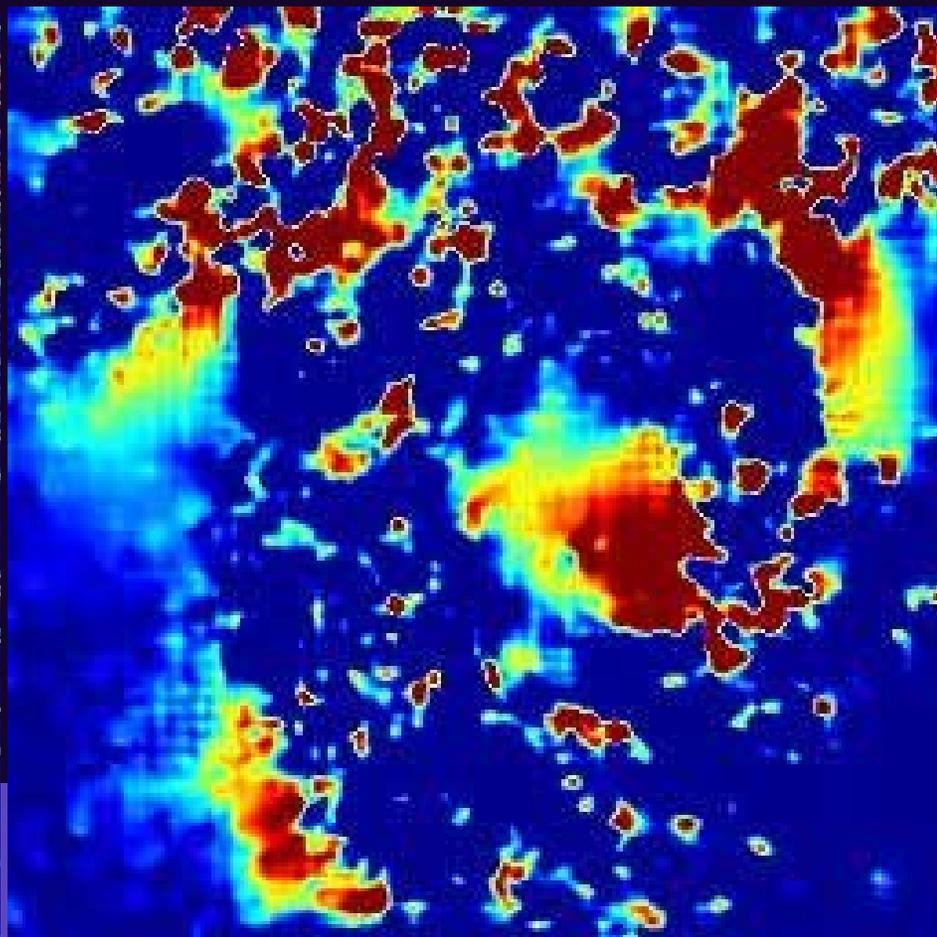
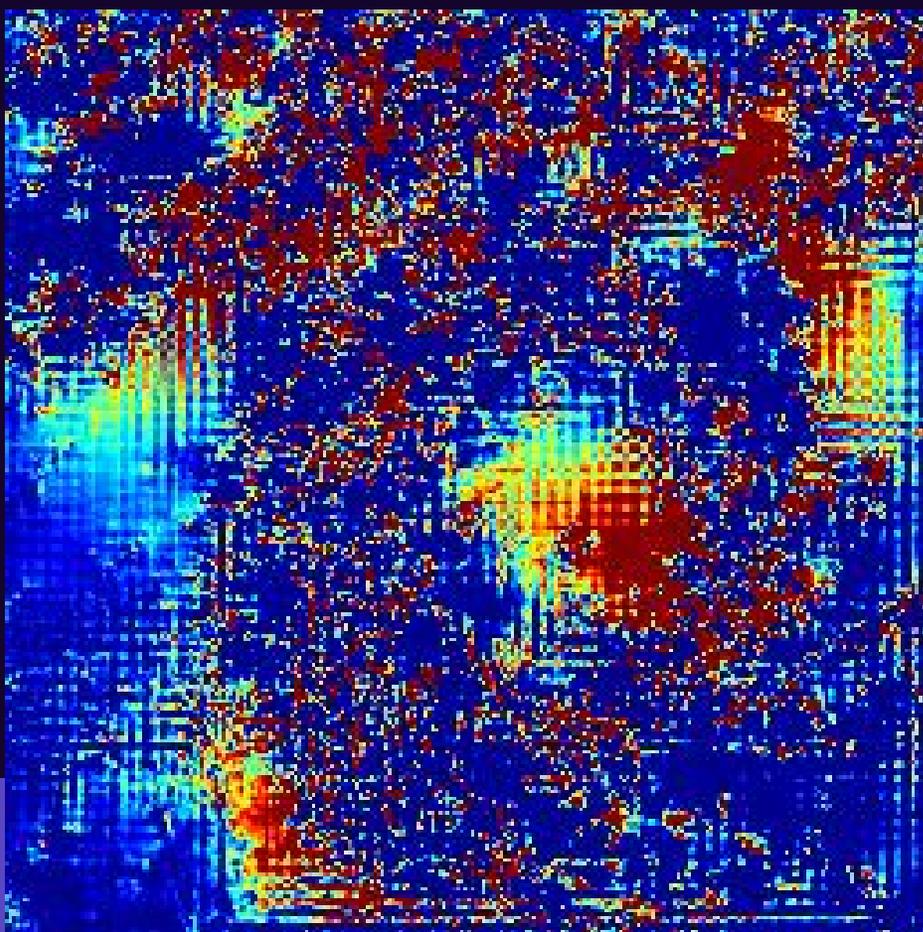


# Résultats



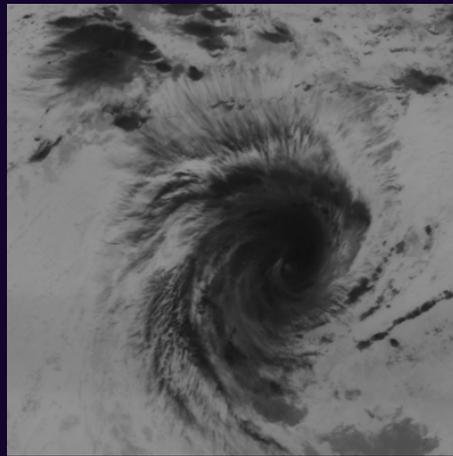
Vorticités observées

Vorticités assimilées



# Résultats

Courbe observée



Courbe assimilée

