

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

Ont participés à cette présentation

- LMD – IMAG – Projet IDOPT
 - **François-Xavier Le Dimet**
 - Anestis Antoniadis
 - Jianwey Ma
 - Jérôme Monnier
 - Marc Honorat
- 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**

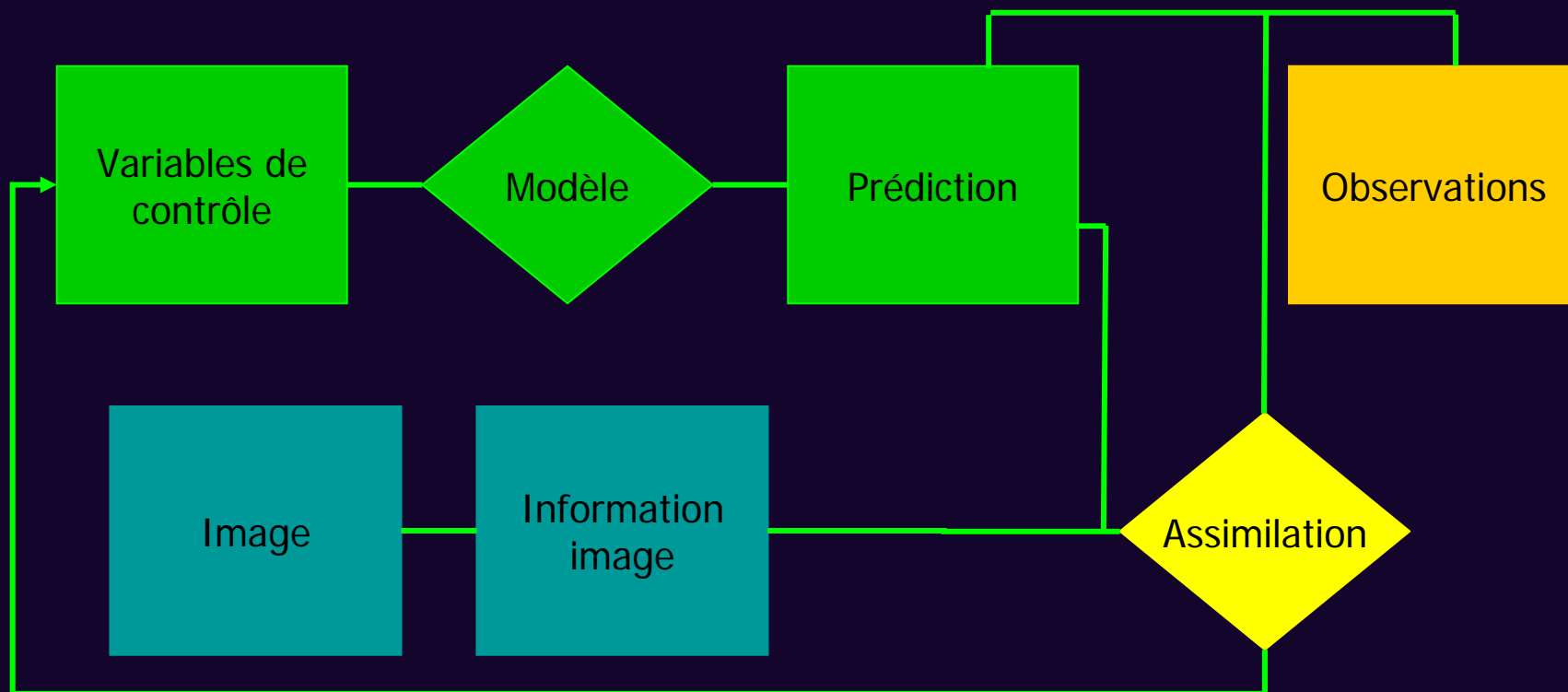
Assimilation de Données

- 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 ?

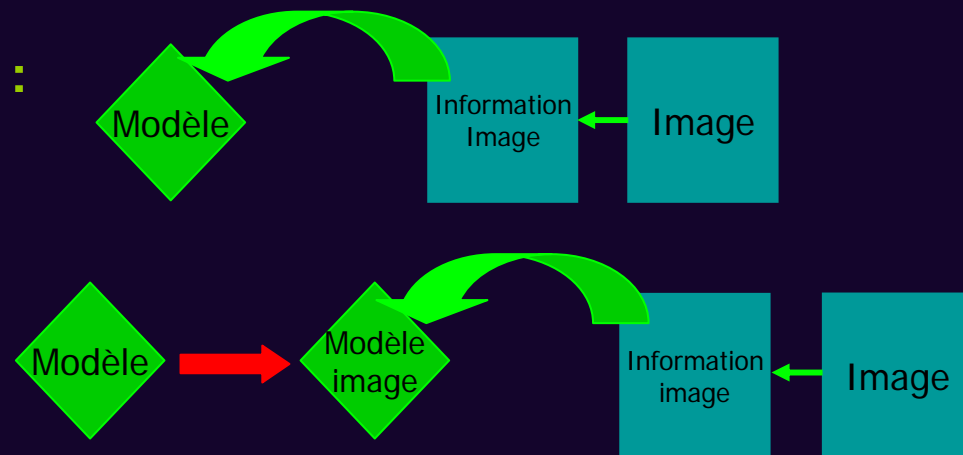
- Classiquement, les données utilisées en assimilation sont des mesures *in situ* et/ou à distance des variables d'état.
- Les images apportent une information complémentaire :
 - Fonction des variables d'état,
 - Structurée spatialement et temporellement.
- Exemple en météo :
 - *Identification visuelle*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

Assimilation de données images

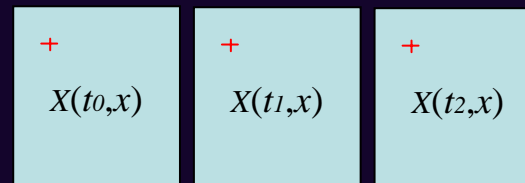


Classifications possibles

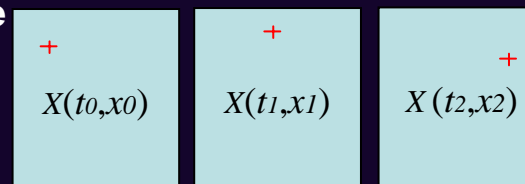
• Typologie 1 :



• 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

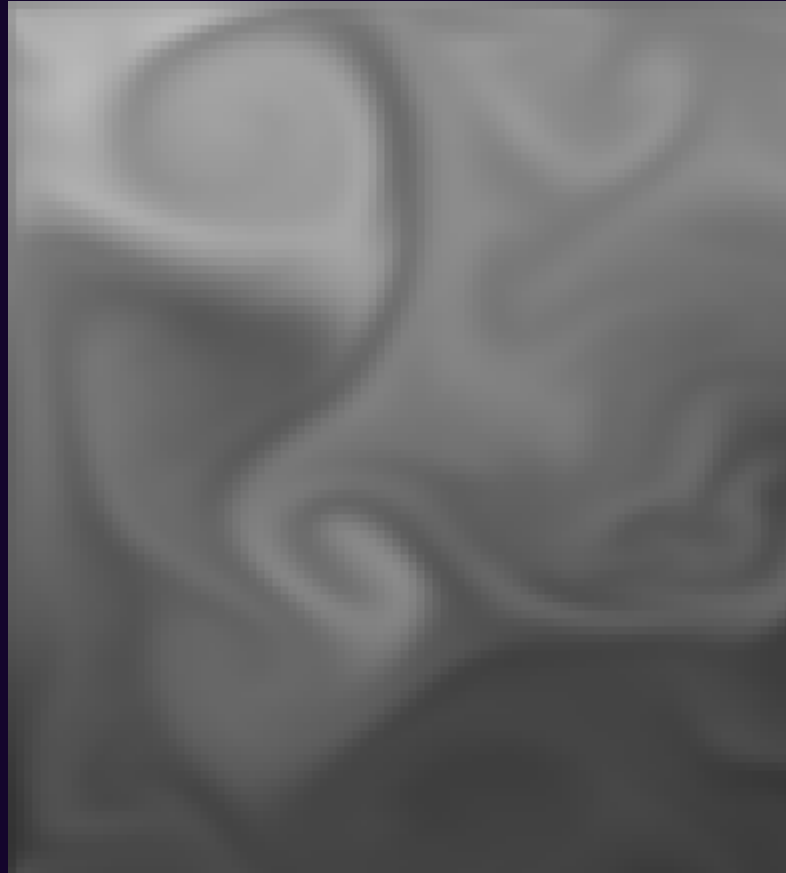
- ➔ Données manquantes

- ➔ 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).

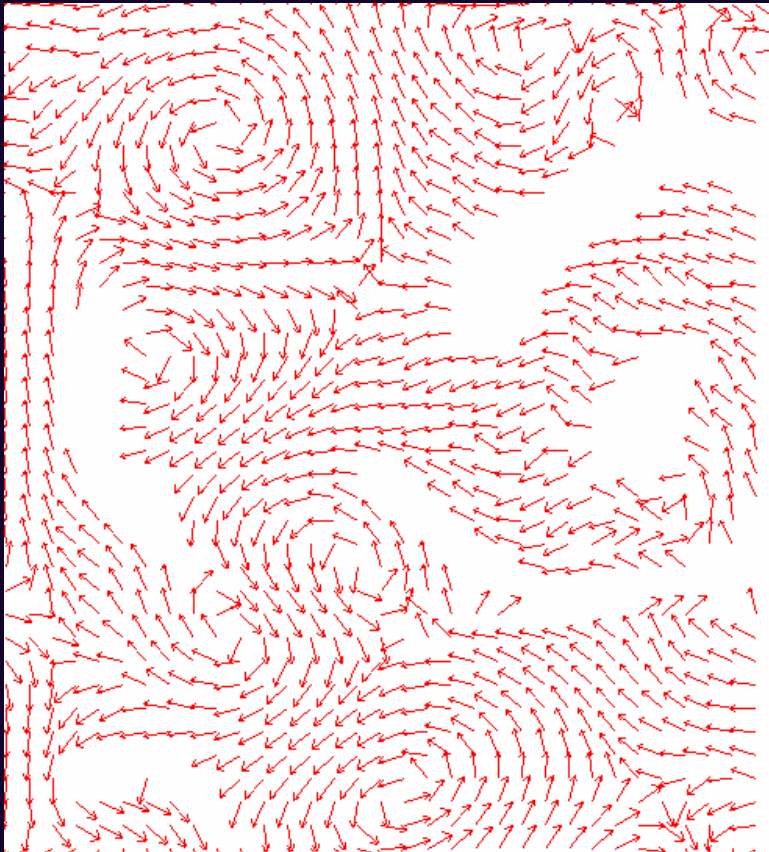
Image température simulée



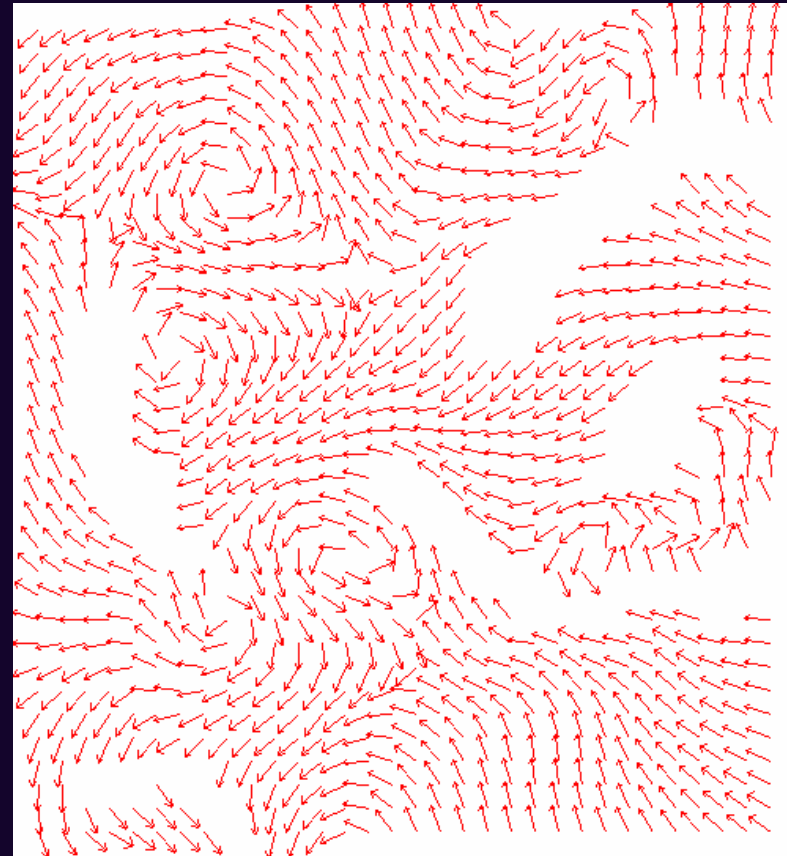
Modèle OPA - LOCEAN



Résultats

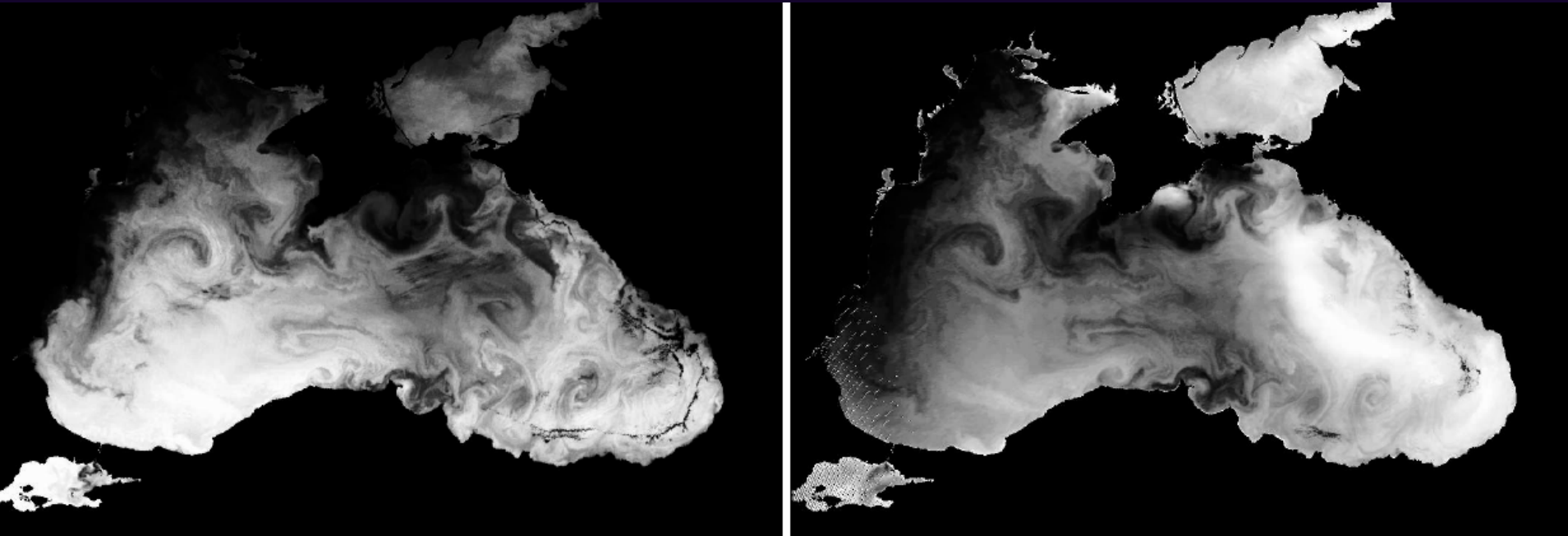


Vitesse simulée

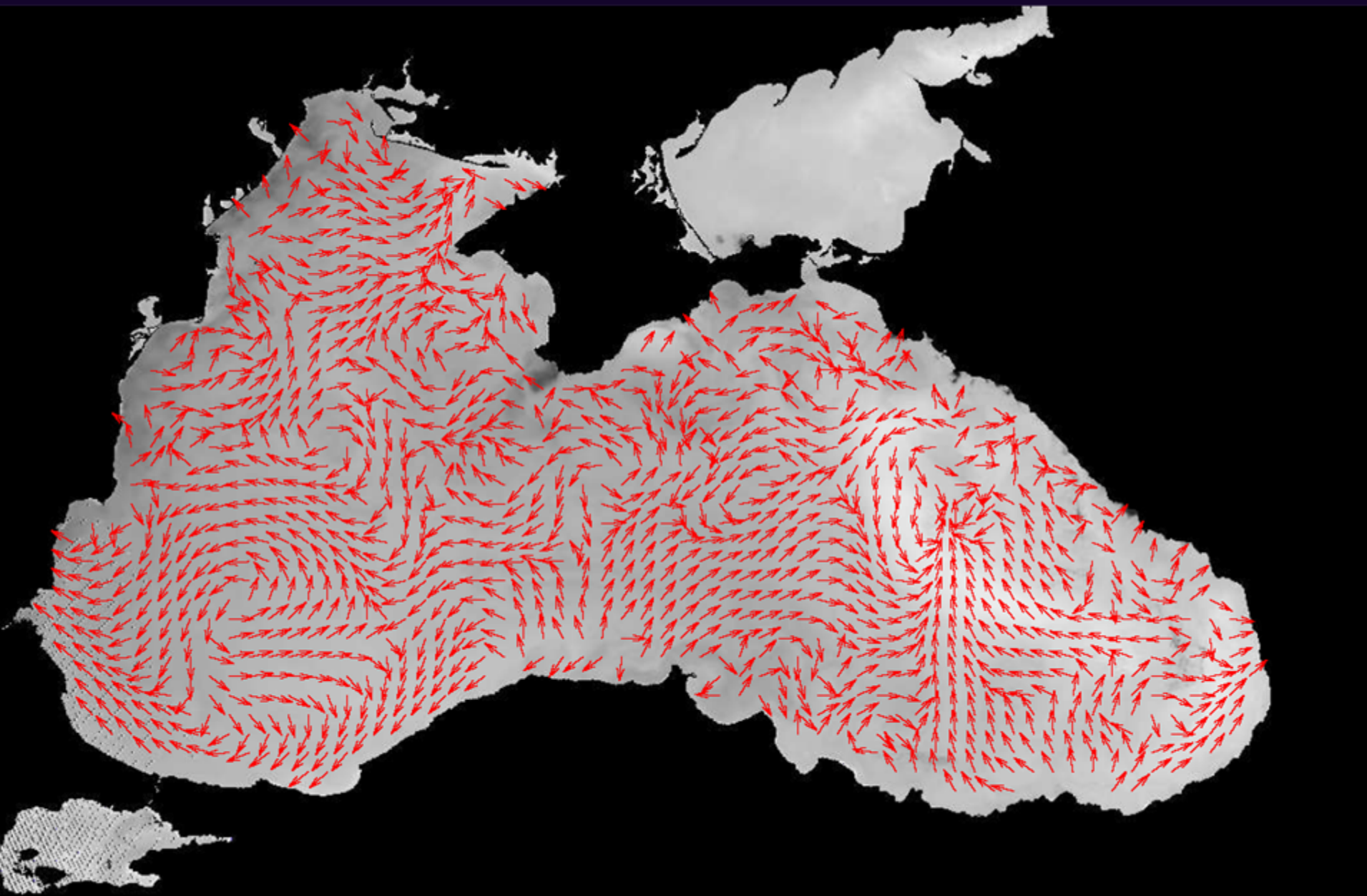


Vitesse estimée

Deux images consécutives



Résultat 14 juillet 1998



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.

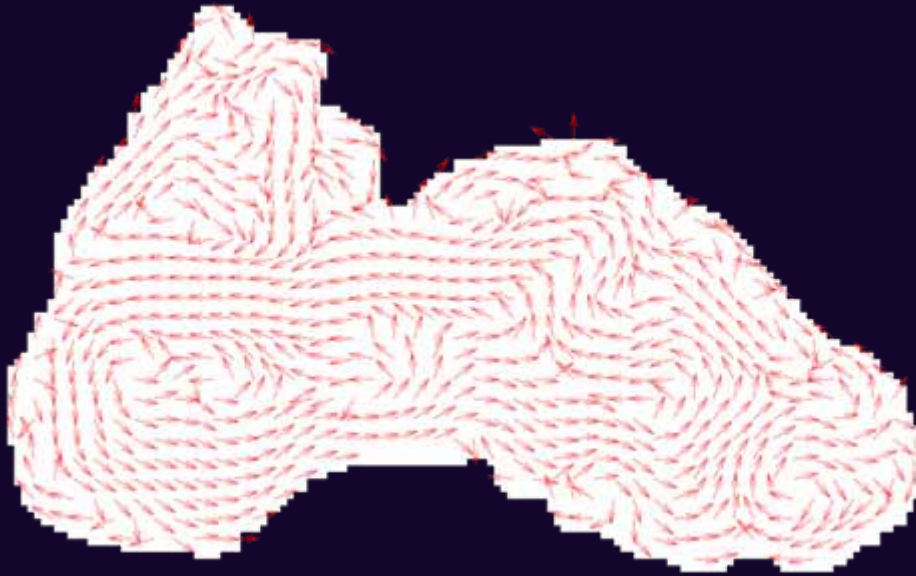
- Les méthodes de **Nudging** simplifient et \mathbf{K} est remplacée par le terme constant λ :

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

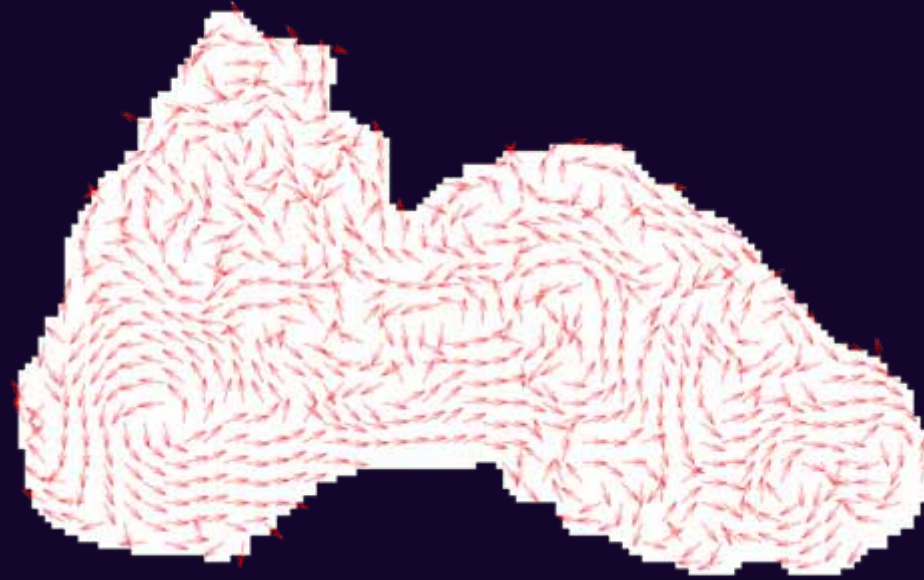
Assimilation de la vitesse estimée dans le modèle *shallow-water*

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

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 :

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

Loi d'évolution du champ des vitesses :

⇒ Formulation vorticité-vitesse :

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

⇒ Mouvement Brownien pour la divergence :

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

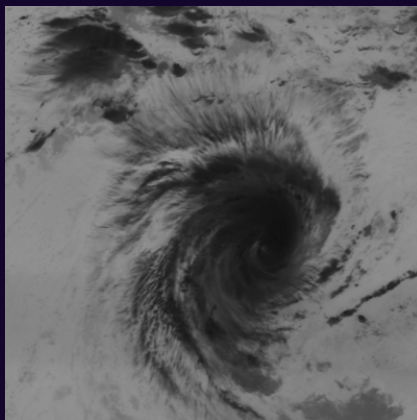


Suivi de courbe et de champ de vitesses

Observations Y :

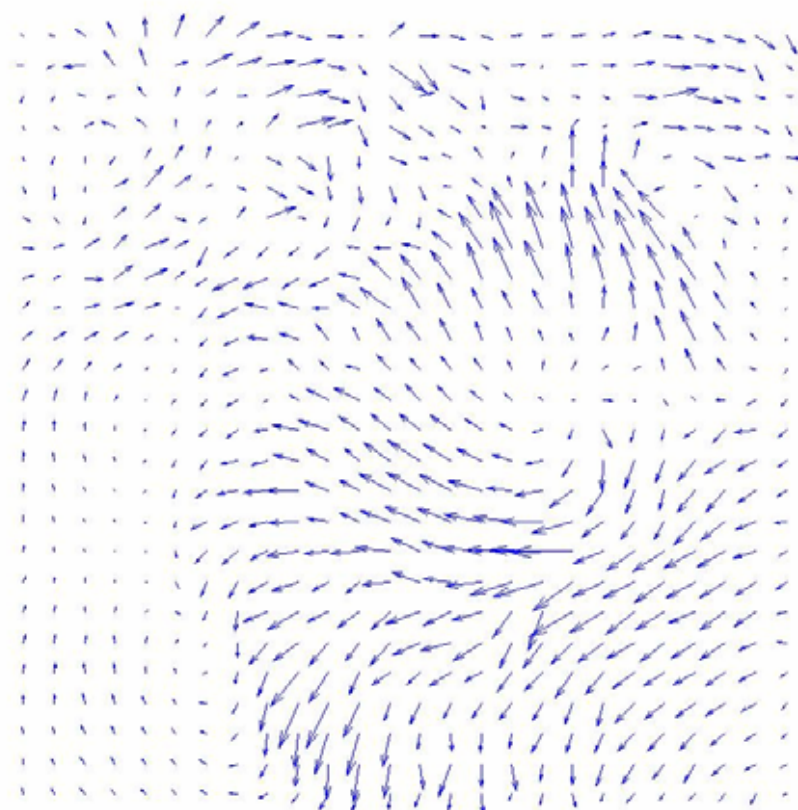
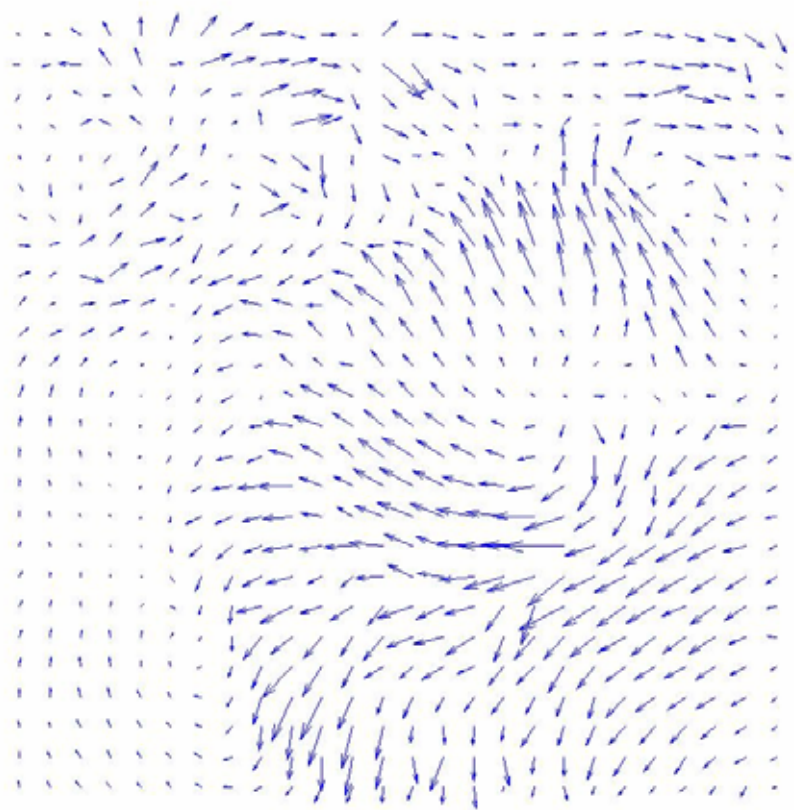
Une courbe de niveau photométrique (i.e. une courbe isotherme sur canal I.R.)

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

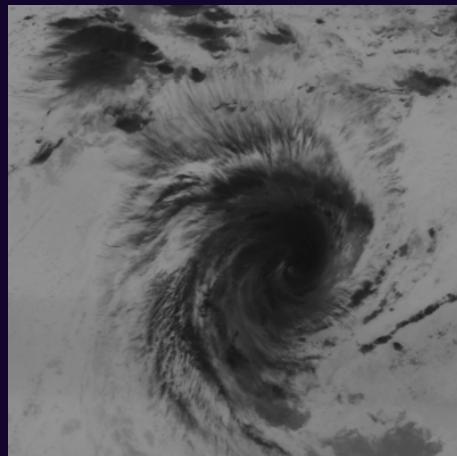


Champ observé

Champ assimilé

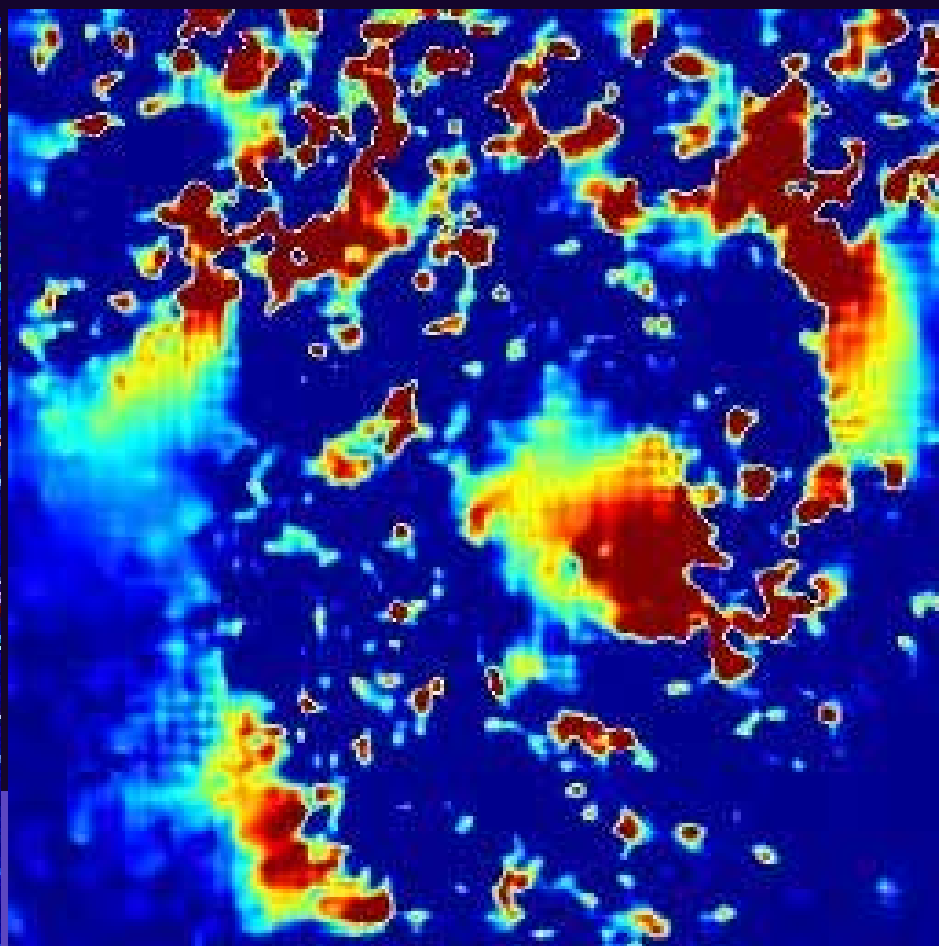
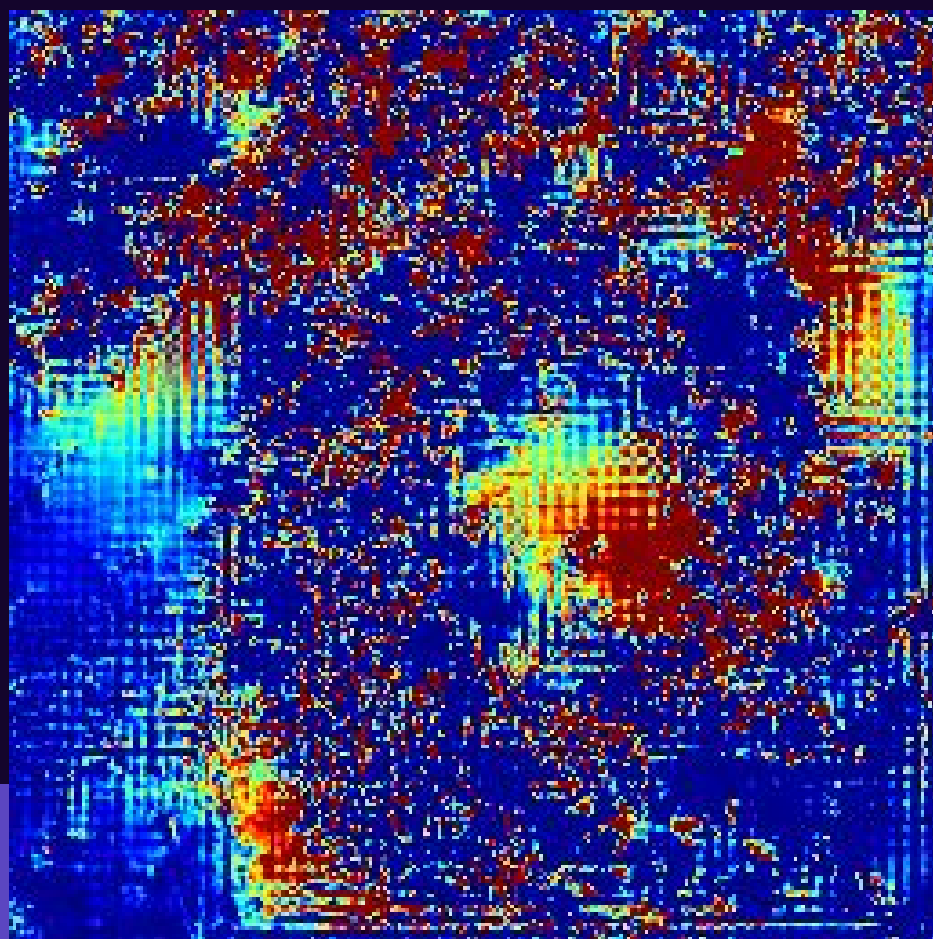


Résultats



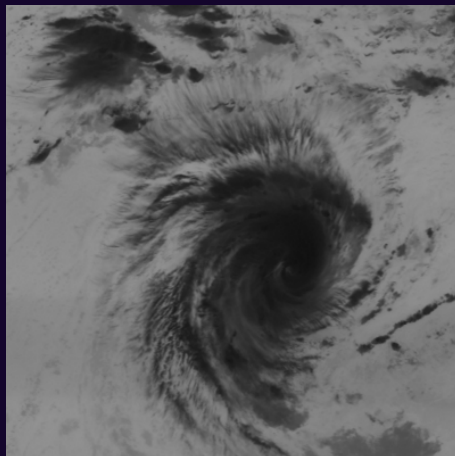
Vorticités observées

Vorticités assimilées

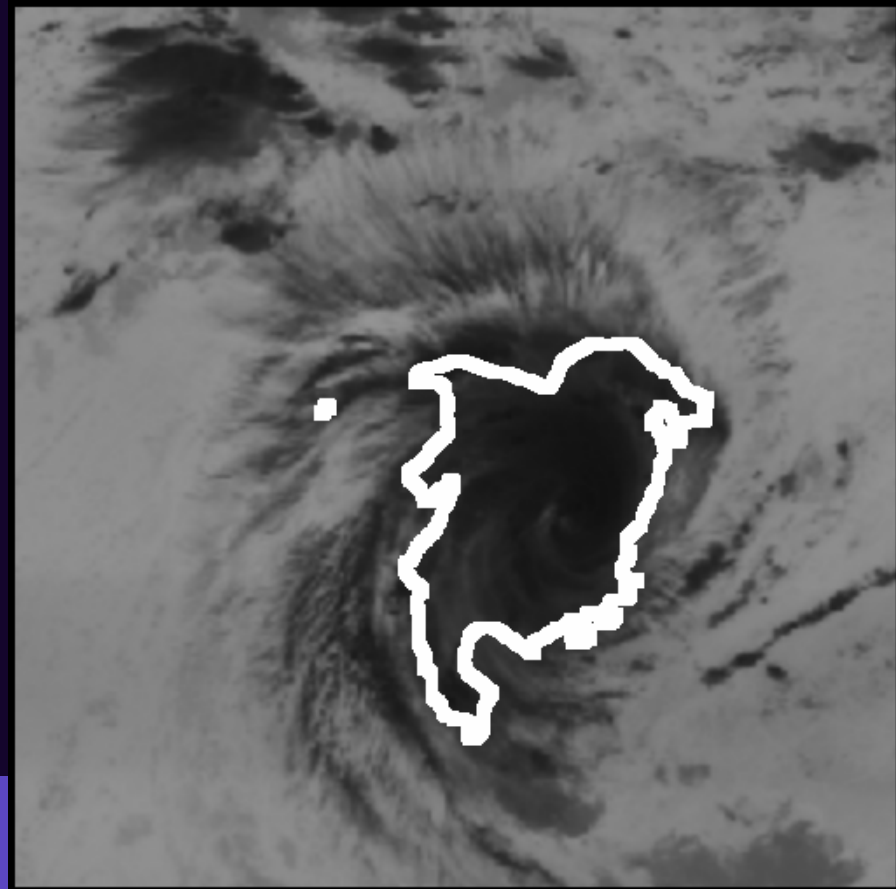


Résultats

Courbe observée



Courbe assimilée



Assimilation de Données Lagrangiennes pour l'hydraulique fluviale

Sur les rivières actuellement :

- mesures de **hauteurs d'eau** sur des sections instrumentées
- mesures de **vitesse**s rares / difficiles
- **MAIS** observations de vitesses nécessaires pour l'identification de **paramètres** de modèle numériques.

→ observation de **trajectoires** de **particules** / de structures entraînées à la surface de l'écoulement.

→ assimilation variationnelle grâce à un **modèle de transport** :

données eulériennes (hauteurs)

+ données lagrangiennes (trajectoires)

Assimilation de Données Lagrangiennes pour l'hydraulique fluviale

Expériences jumelles (observations créées par le modèle numérique)

- mise au point et validation des méthodes
- vitesse de transport = vitesse du modèle

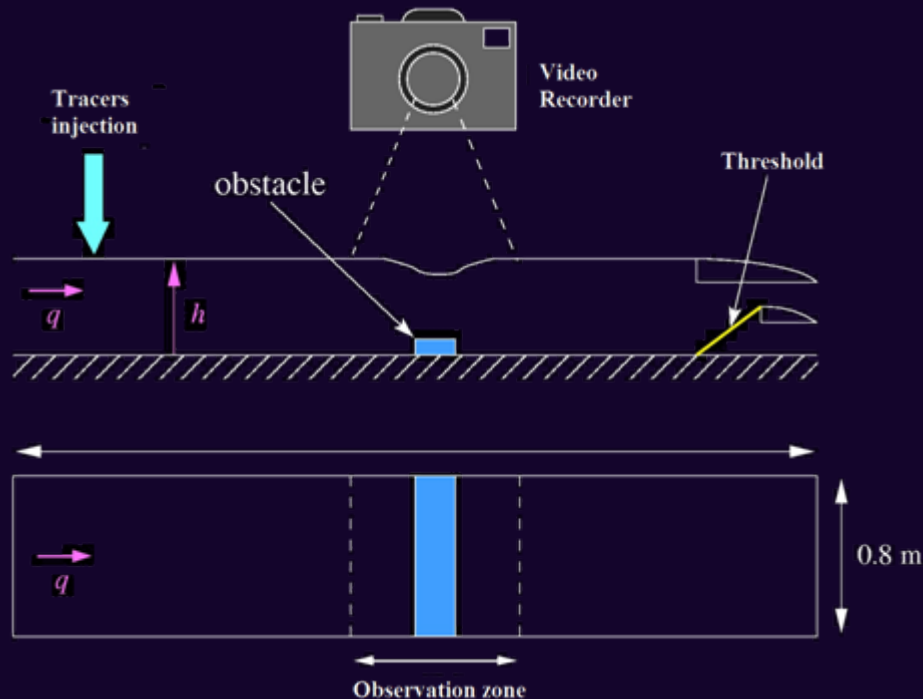
Données réelles

- acquisition vidéo sur banc d'essai
- vitesse de transport = vitesse de surface de l'écoulement
- filtrage des trajectoires observées

Assimilation de Données Lagrangiennes

montage expérimental : prise de vue vidéo

Expérience effectuée au laboratoire LMFA (EC/INSA Lyon)



extrait vidéo

Assimilation de Données Lagrangiennes pour l'hydraulique fluviale

Expériences jumelles

- identification de la topographie
- observation de hauteurs
+ observation de trajectoires

