

ACI Masses de Données  
**ASSIMAGE**

Réunion Paris

16 et 17 Septembre 2004

# Thème

Combiner l'information apportée par des images et l'information apportée par des modèles mathématiques.

**ASS**imilation d'**IMAGE**s

# Participants

- INRIA Rocquencourt projet CLIME
- IRISA ( Rennes)
- CEMAGREF ( Montpellier , Grenoble et Rennes)
- INRIA Rhône-Alpes projet IDOPT
- Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels ( Grenoble)
- Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement ( Grenoble)
- Collaboration ouvertes : MétéoFrance, Institut d'Océanographie de Sébastopol, Florida State University

# Bilan rapide

- Réunions plénières : Paris, Grenoble.
- Nombreuses réunions biou tripartites
- Workshop prévu vers Grenoble en Janvier
- Thèses : Mazauric, Lauvernet, Honnorat
- Post-doc en recrutement.
- Chercheur : Frédéric Parrenin ( CNRS en glaciologie) travaillera sur ce thème.

# Assimilation de Données

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

# Assimilation de Données

- Formalisme général : comment combiner des sources d'information hétérogènes en vue de la reconstitution de l'état d'un système.
- Première utilisation en météorologie avec de très grand modèles numériques ( environ 6 millions de variables), puis en océanographie et hydrologie.
- Problématique très générale intéressant de nombreux autres domaines.
- Actuellement deux techniques principales
  - Méthodes variationnelles fondées sur les techniques de contrôle optimal
  - Méthodes de type filtre de Kalman

# Assimilation d'Images

- Les données utilisées en assimilation sont des données in situ et/ou des mesures à distance des variables du modèle.
- Les images apportent beaucoup d'information ( exemple: météo) , mais cette information est utilisée plus de manière qualitative que quantitative.
- Comment utiliser cette information?

# Assimilation Variationnelle

Modèle

$$\frac{dX}{dt} = F(X, K)$$

$$X(0) = V$$

$$J(V, K) = \frac{1}{2} \int_0^T \|CX - X_{obs}\|^2 dt$$

Déterminer  $V$  et  $K$  minimisant  $J$

# Condition d'optimalité et algorithmes

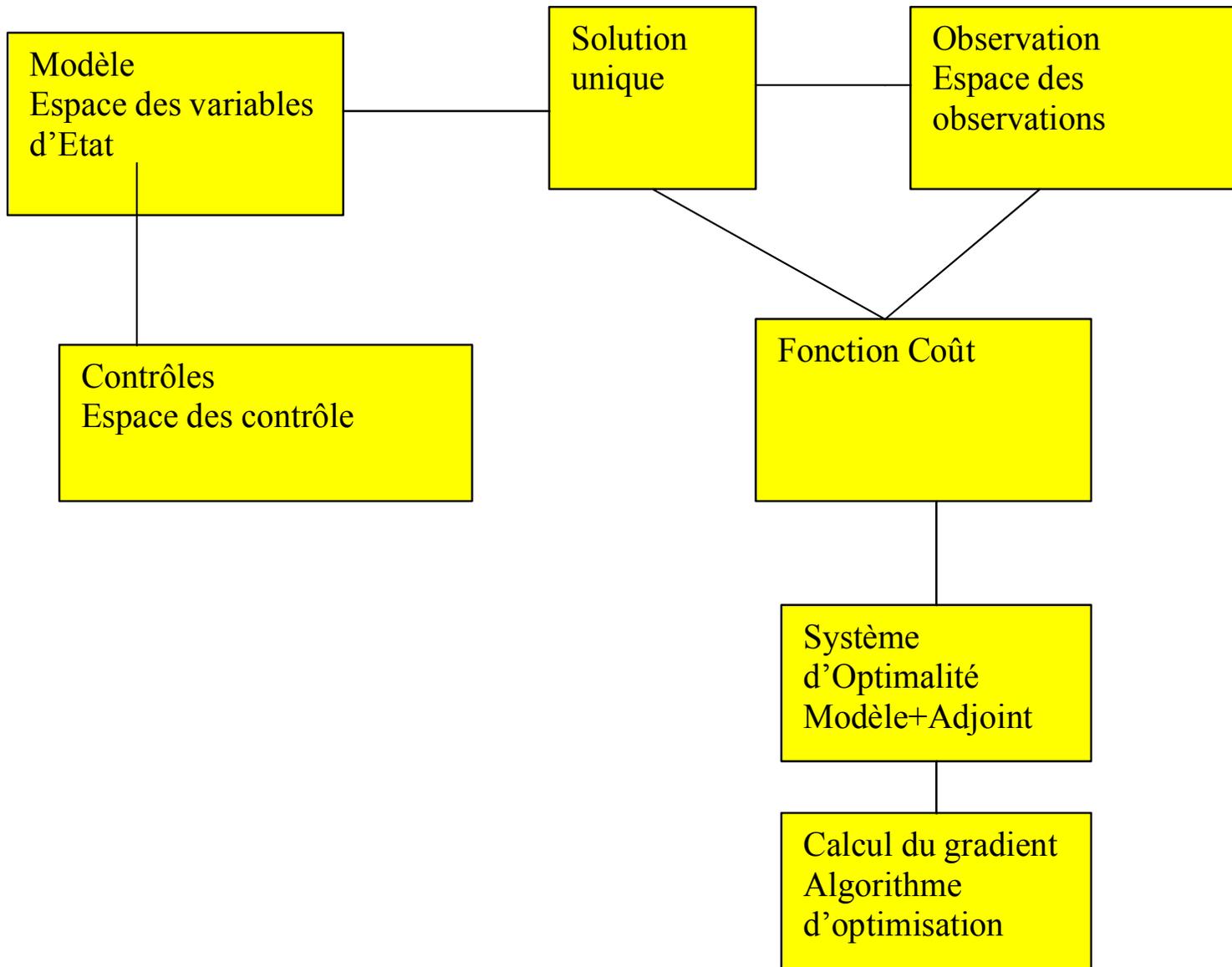
## Modèle adjoint

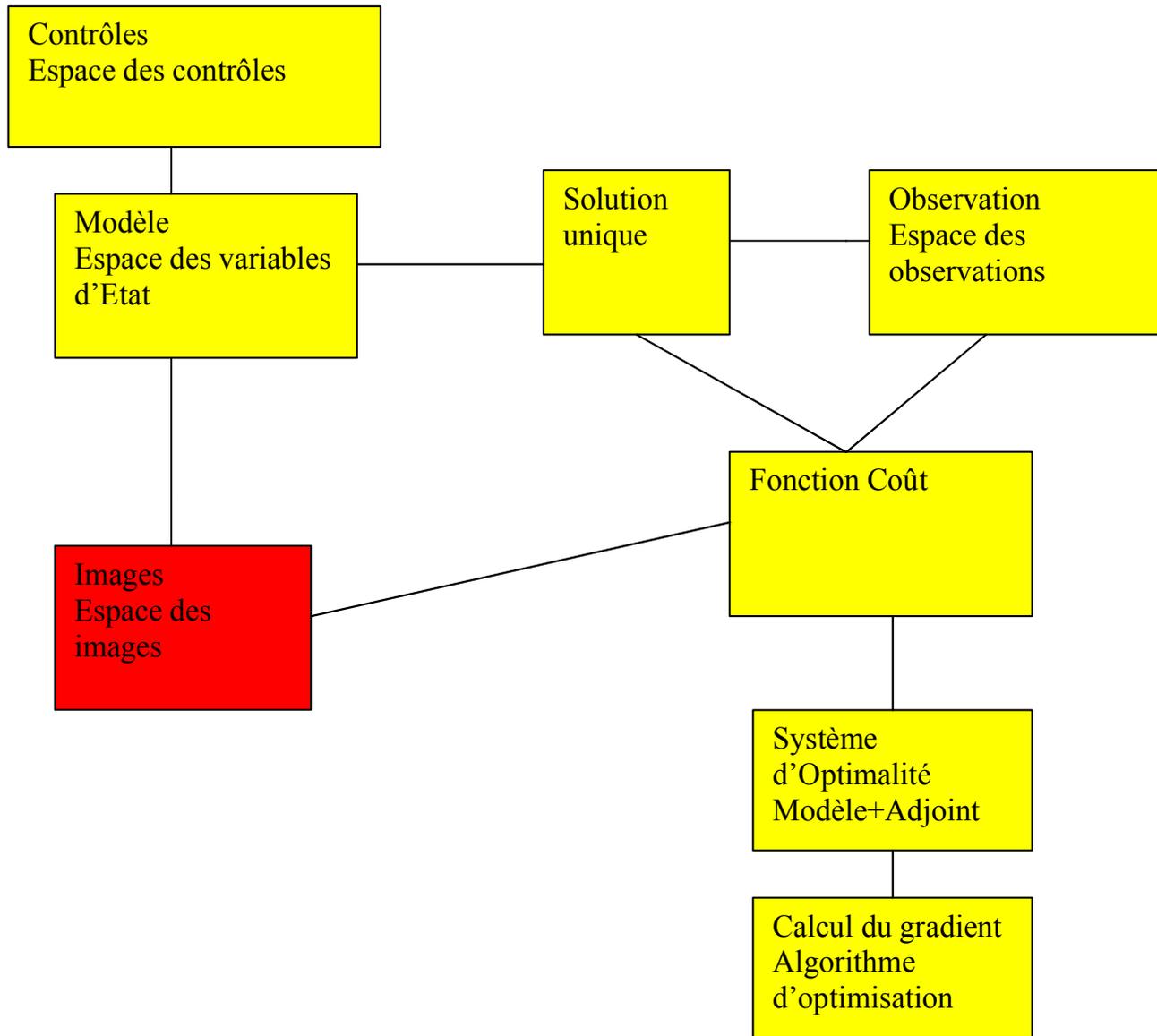
$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} + \left[ \frac{\partial F}{\partial X} \right]^t X^* = C^t (C \cdot X - X_{obs}), \\ P(T) = 0. \end{cases}$$

Calcul des gradients qui sont ensuite insérés dans un code d'optimisation

$$\nabla_V J = -P(0)$$

$$\nabla_K J = - \left[ \frac{\partial F}{\partial K} \right]^t P$$





# Problèmes

- Nature des images ( statiques, dynamiques)
- Nature de l'espace des images : contours, observations lagrangiennes
- Définition de l'opérateur de projection de l'espace d'état vers l'espace image.
- Régularité de l'espace image ( opérateur de régularisation dans la fonction coût.

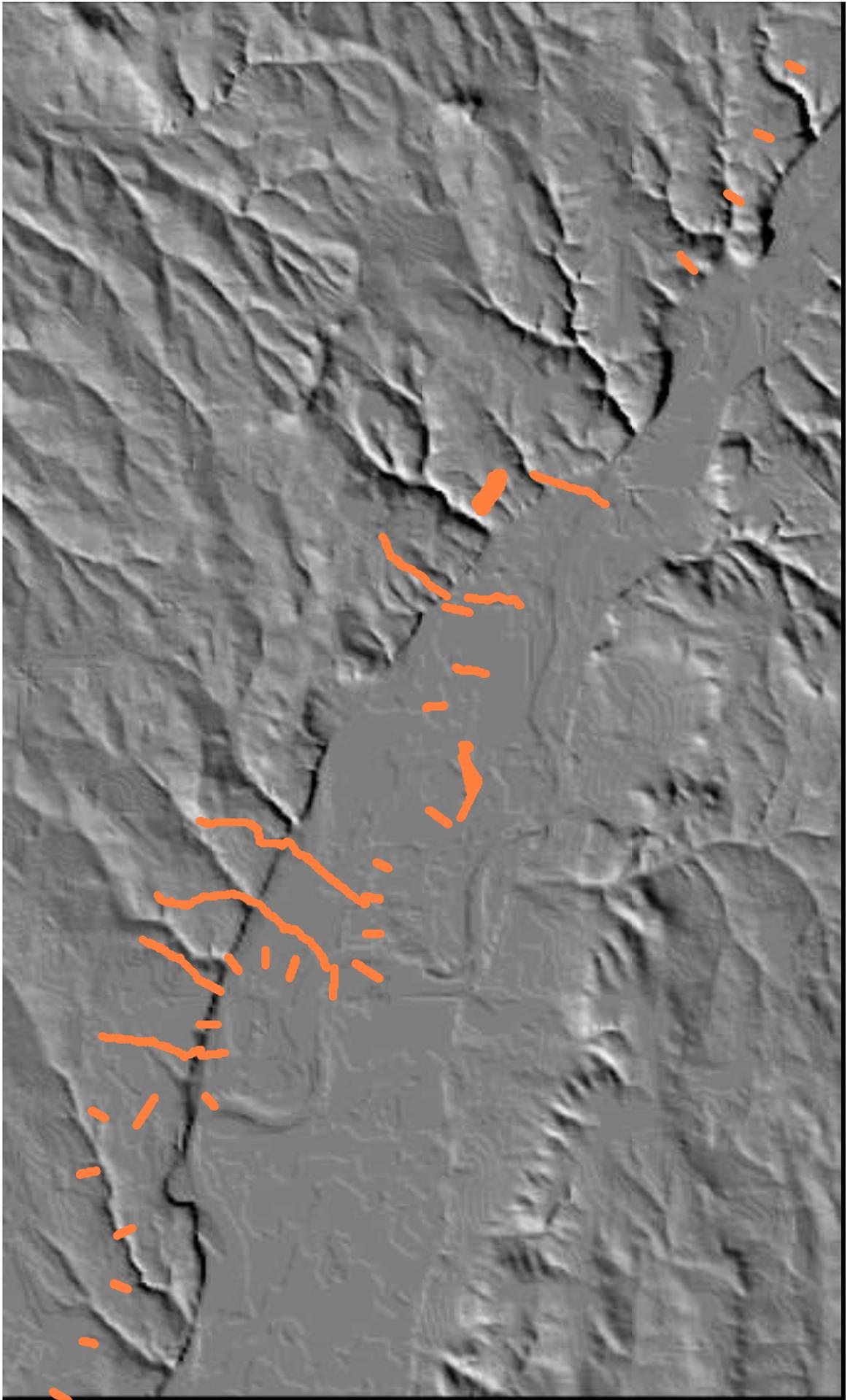
# Une première application : prévision des crues

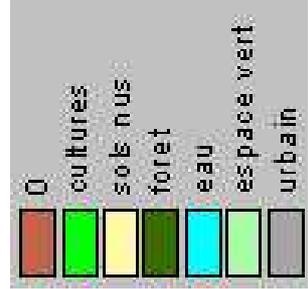
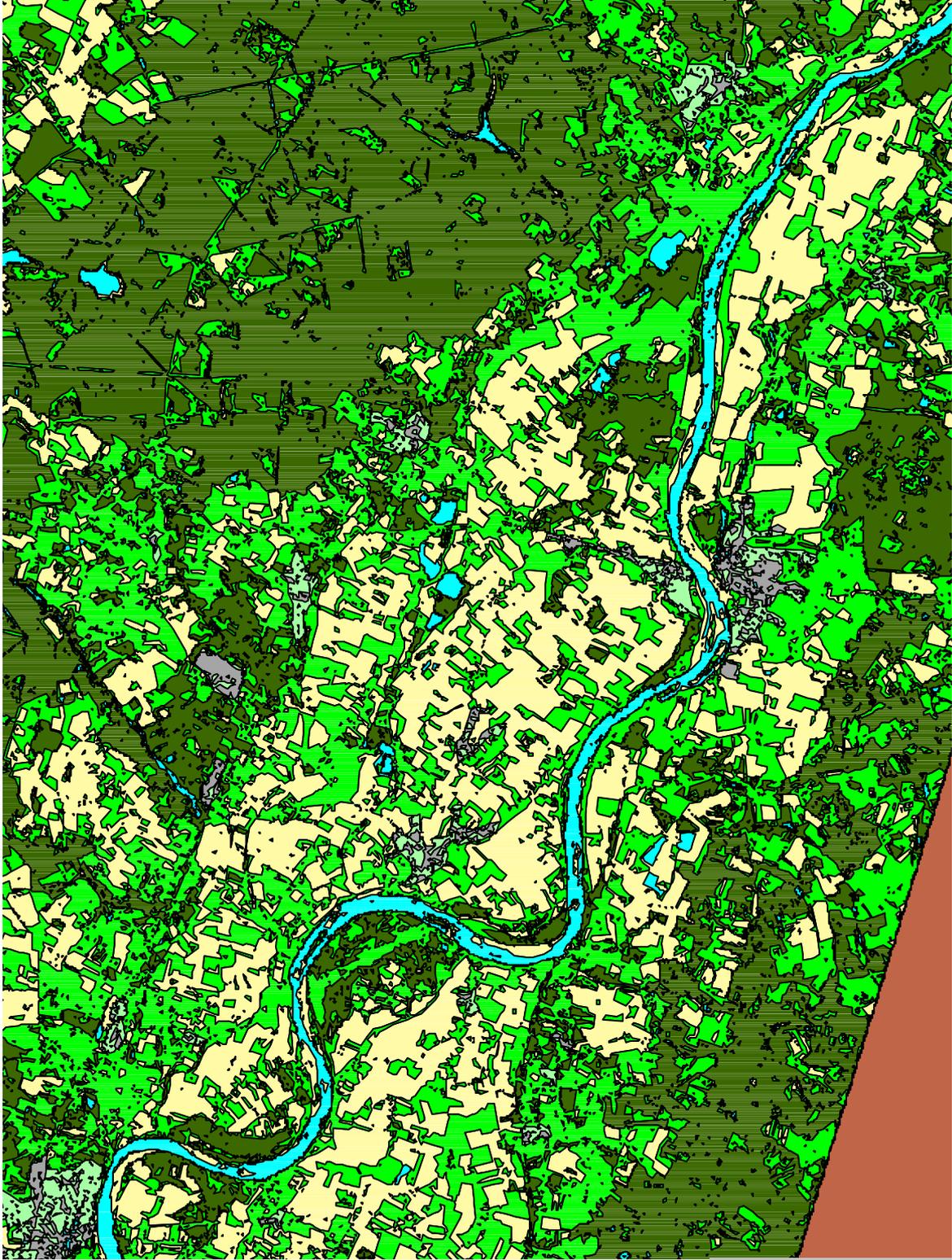
- Modèles : équation de type Saint-Venant
- Difficultés : manque de données
- Images : occupation des sols et relief
- Reconstituer les paramètres du modèles à partir de l'écoulement.
- Thèse Cyril Mazauric

# Données

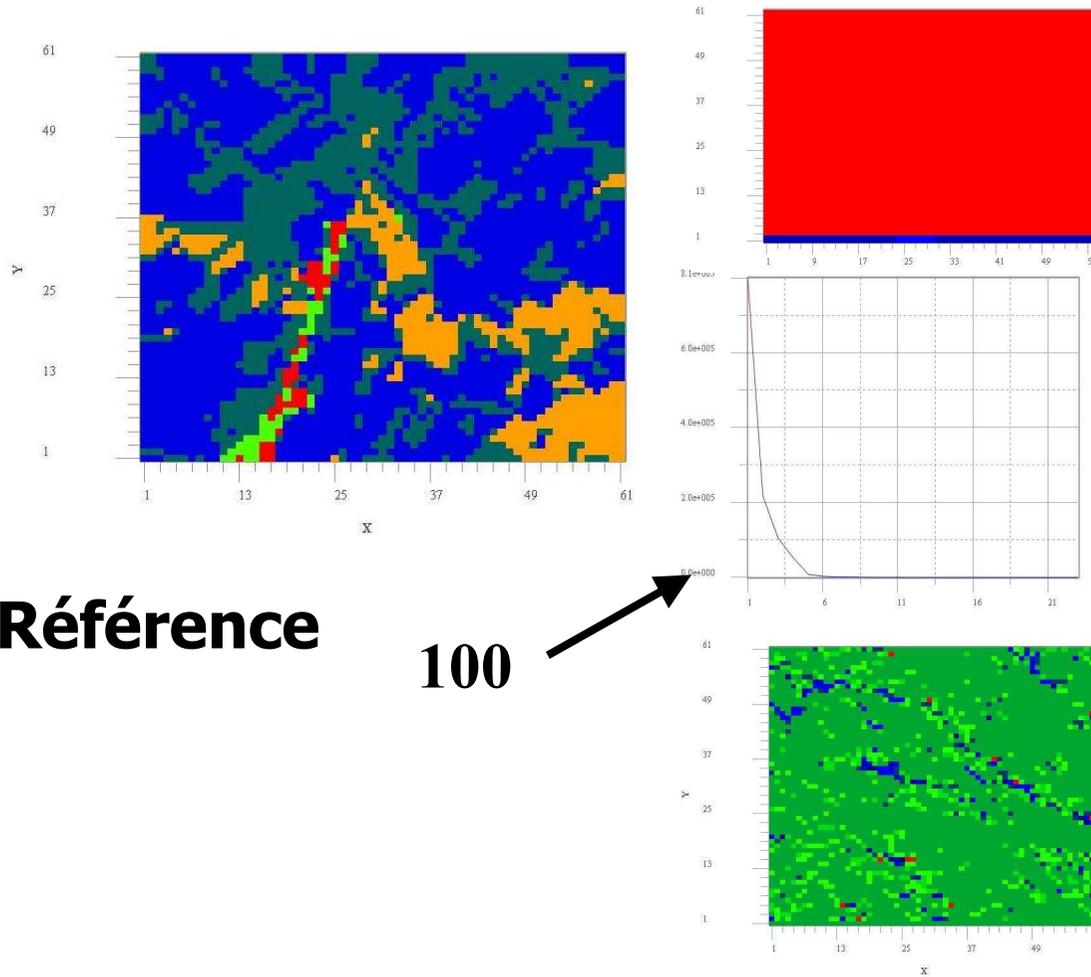
## Données topographiques

- **Topographie des lits majeurs et mineurs**
  - **Modèle Numérique de terrain à partir de mesures aériennes**  
*Résolution horizontale : 20 m*
  - **Images SPOT de l'occupation des sols**  
*Précision verticale: 0,20 m*
- Données issues de l'observation d'images ( hauteur de la végétation pour obtenir le niveau de la crue**





# Evaluation de ruguosité



➤ **Référence**

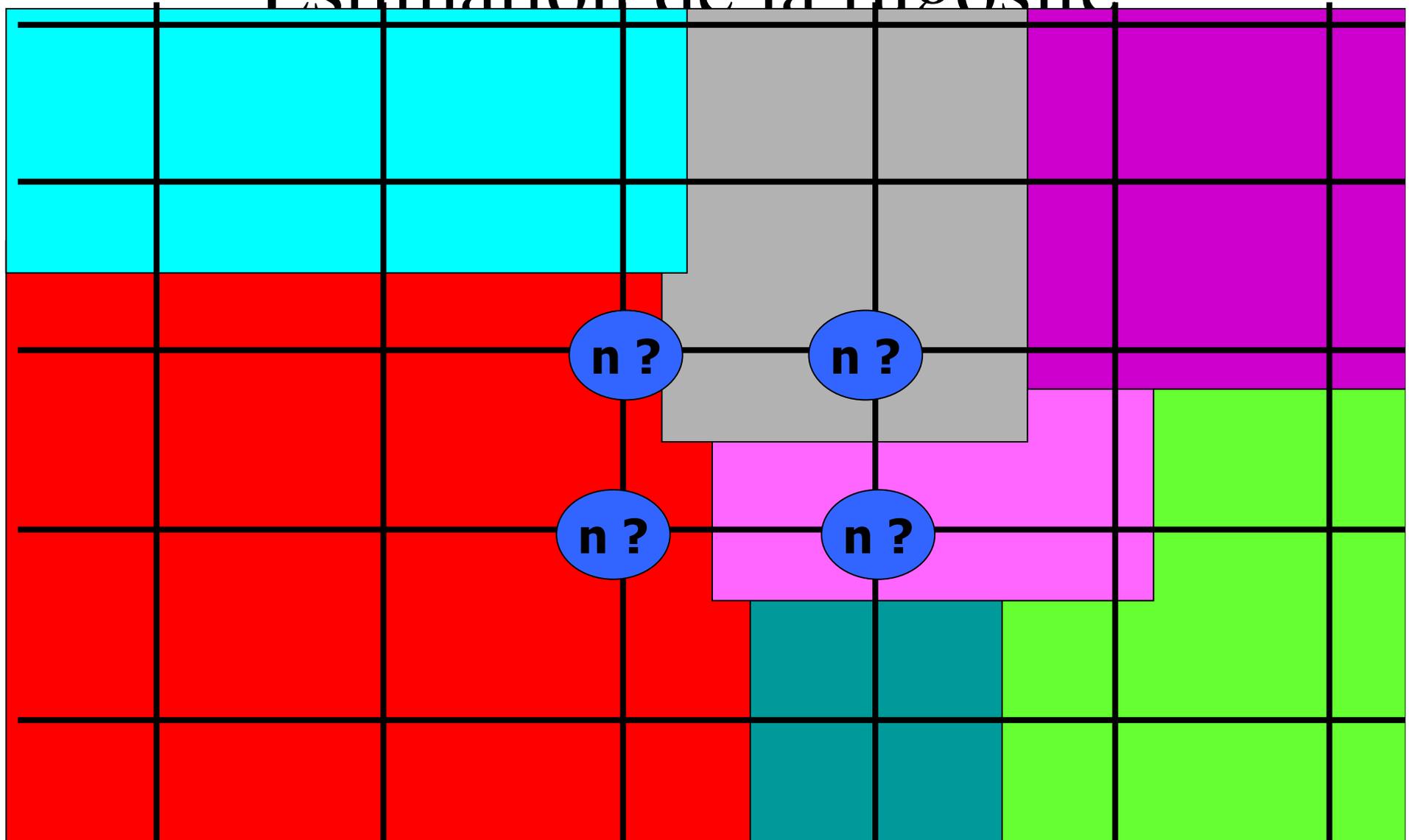
100



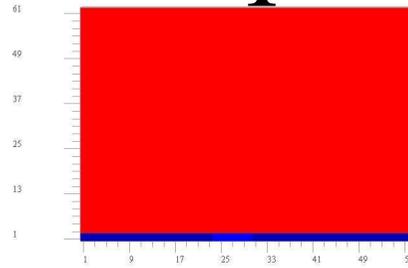
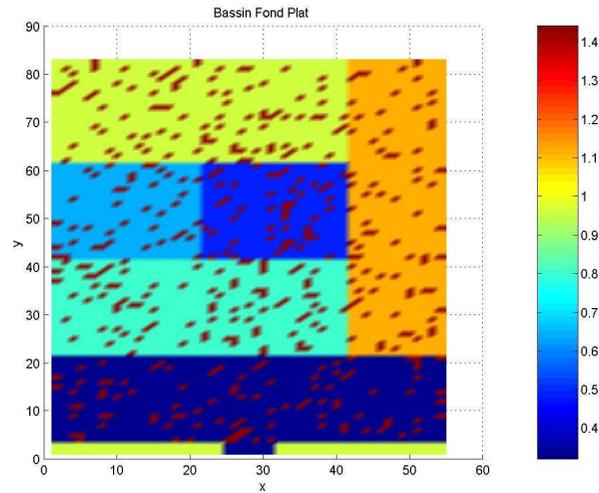
$$J = \|U - U_{obs}\|^2 + \|V - V_{obs}\|^2 + \|Z - Z_{obs}\|^2$$

➤ **Manning obtenu**

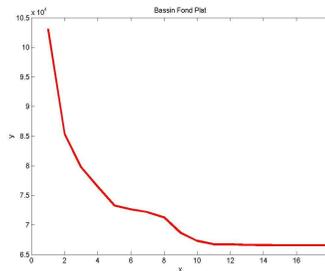
# Estimation de la rugosité



# Exemple



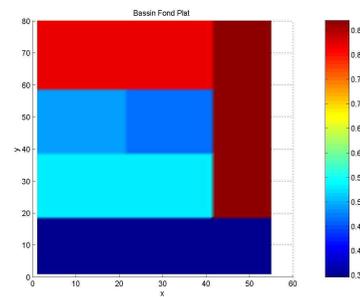
➤ **Initial condition**



➤ **Evolution of the cost-function**

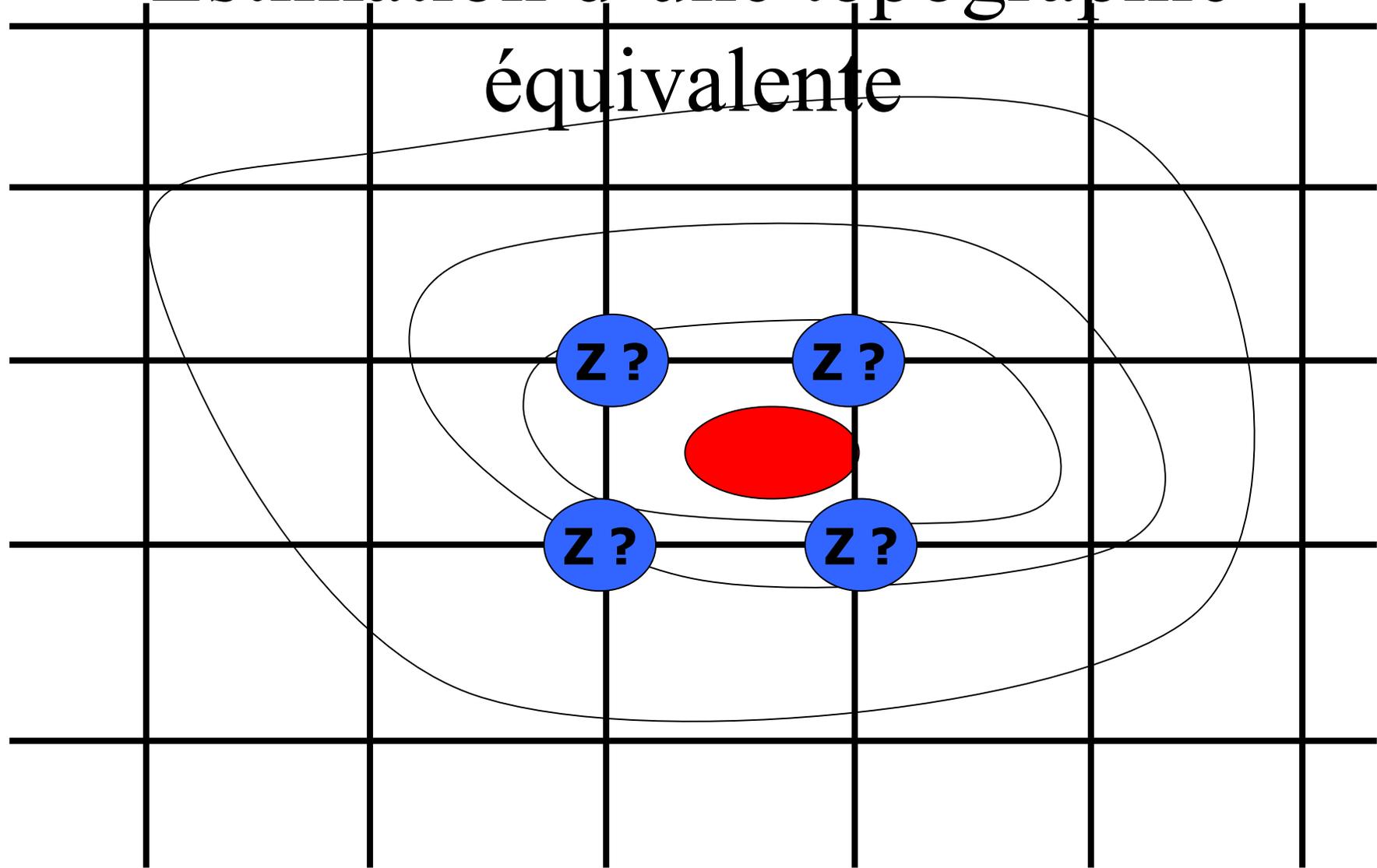
$$J = \|U - U_{obs}\|^2 + \|V - V_{obs}\|^2 + \|Z - Z_{obs}\|^2$$

➤ **Reference ( exact solution )**

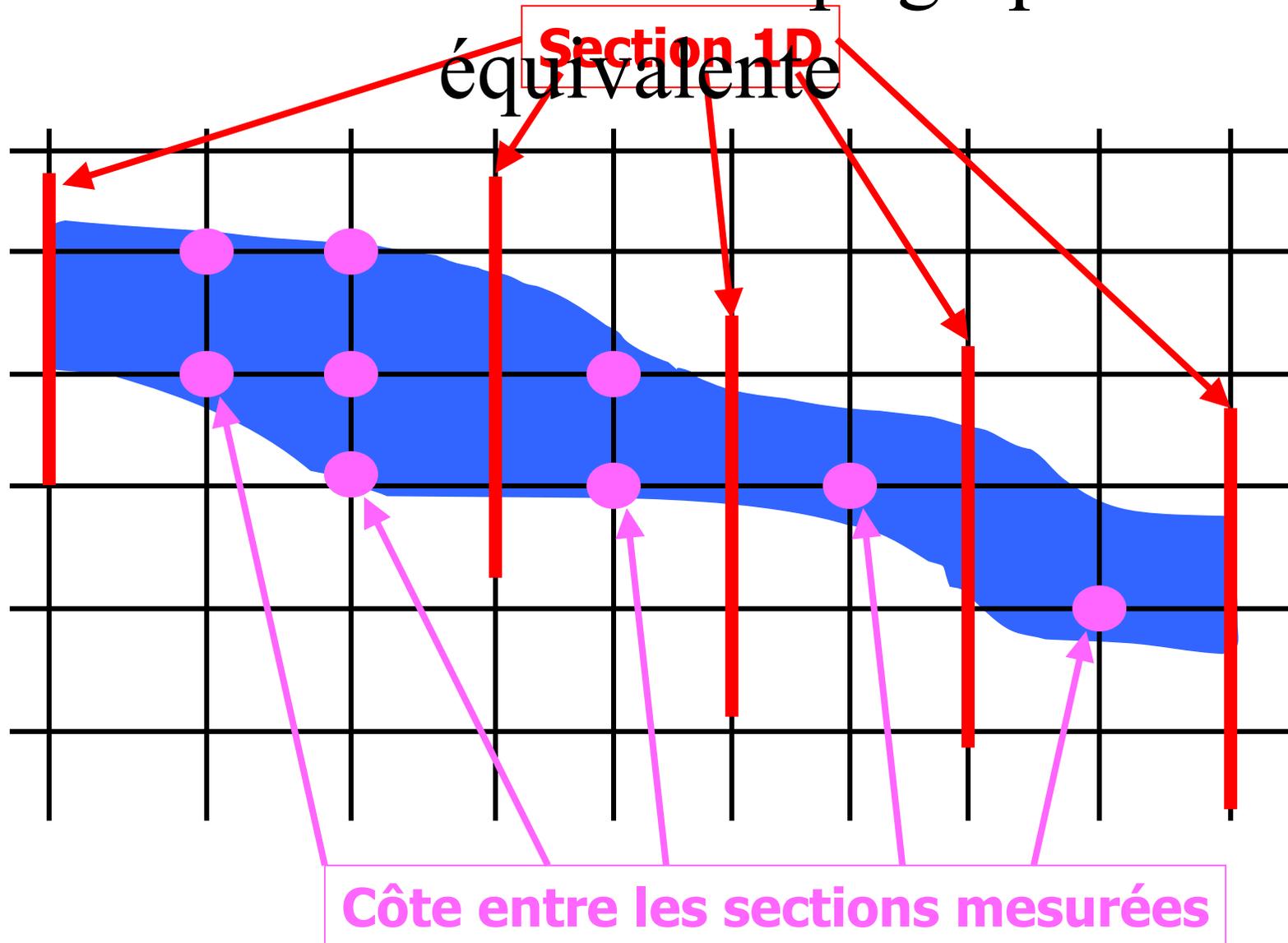


➤ **Value of the Manning coefficient**

# Estimation d'une topographie équivalente



# Estimation d'une topographie



# Écoulements océaniques et météorologiques

# Assimilation pour des écoulements géophysiques

- Données dynamiques
- Données Lagrangiennes
  - Grand nombres de particules indifférentiées
  - Particules identifiables
- Identification de structures dans les images et reconstitution

# Données Lagrangiennes

QuickTime™ et un  
décompresseur Vidéo 1 Microsoft  
sont requis pour visionner cette image.

# Assimilation Variationnelles de Données

## Lagrangiennes

Le modèle et les particules sont considérés  
comme un système global

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU}{dt} = F(U) \\ \frac{dX}{dt} = G(X, U) \\ U(0) = V \\ X(0) = Y \end{array} \right.$$

$U, X$  : variables eulériennes et lagrangiennes.

Fonction coût ( simplifiée)

$$J(V, Y) = \frac{1}{2} \left[ \|CU - U_{obs}\|^2 + \|DU - U_{obs}\|^2 \right]$$

# Modèle Adjoint

$$\frac{dW}{dt} + \left[ \frac{\partial F}{\partial U} \right]^t \cdot W + \frac{dW}{dt} + \left[ \frac{\partial G}{\partial U} \right]^t P = C^t (CU - U_{obs})$$

$$\frac{dP}{dt} + \left[ \frac{\partial G}{\partial X} \right]^t \cdot P = D^t (DX - X_{obs})$$

$$W(T) = 0$$

$$P(T) = 0$$

# Gradients

$$\nabla J = \begin{pmatrix} \nabla_V J \\ \nabla_Y J \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -W(0) \\ -P(0) \end{pmatrix}$$

# Images Dynamiques

- Les images montrent des formes et leur évolution.
- Repérer et identifier les formes sur l'image
- Repérer et identifier les formes à partir des variables d'état du modèle
- Calcul du maximum du gradient pour une variable scalaire ( température, salinité)
- Comparaison image-modèle et minimisation
- Choix de la variable de contrôle.

QuickTime™ et un  
décompresseur Vidéo 1 Microsoft  
sont requis pour visionner cette image.

# Océanographie

- Assimilation de données lagrangiennes :
  - Trajectoires de traceurs : bouées, balises Argos, *etc.*
- Deux approches images pour obtenir des trajectoires :
  - Trajectoires de points caractéristiques obtenus par identification et suivi de structures déformables.
  - Intégration d'un champ de mouvement.

# Identification et suivi de structures déformables

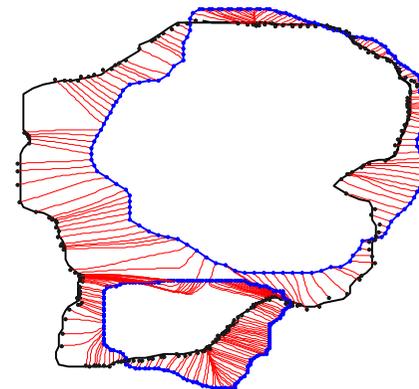
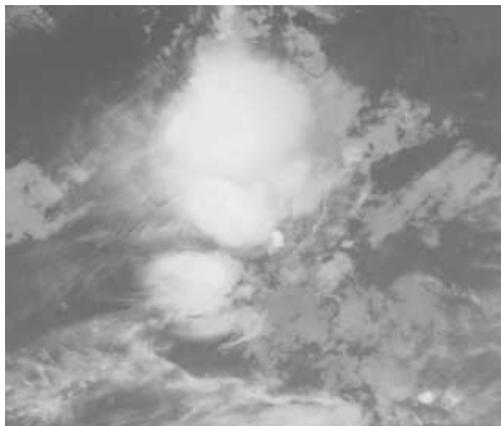
- Identifier des traceurs de mouvement

**Quel type de traceur utiliser en océanographie ?**

- Les suivre au cours du temps ?

**Quel type de déformation peuvent subir ces structures océanographiques ?**

**Exemple : suivi de structures météorologiques :**

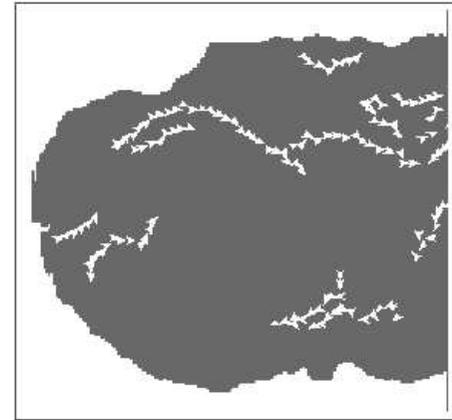
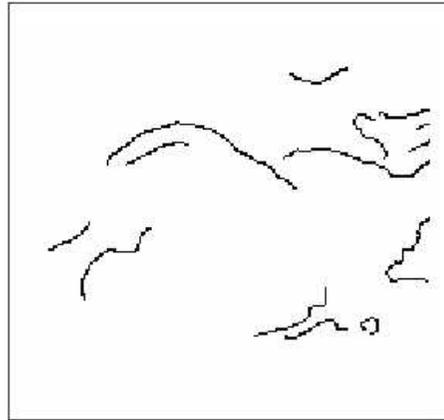
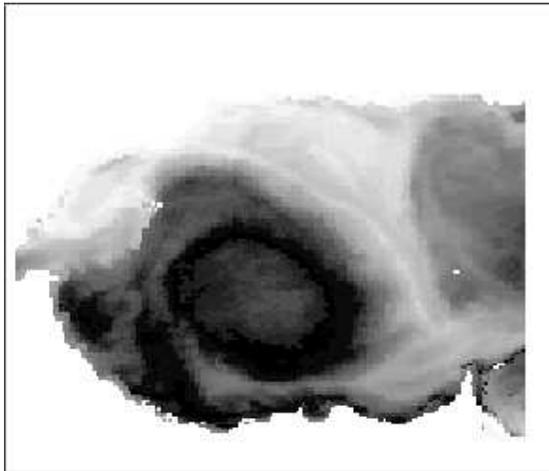


# Identification et suivi de structures déformables

- La forme d'une structure peut renseigner sur le mouvement :
  - On cherche un champ de mouvement orthogonal au gradient de l'image et de propriétés spatiales (div et curl) données.

QuickTime™ et un  
décompresseur Codec YUV420  
sont requis pour visionner cette image.

# Extraction des structures



# Résultats

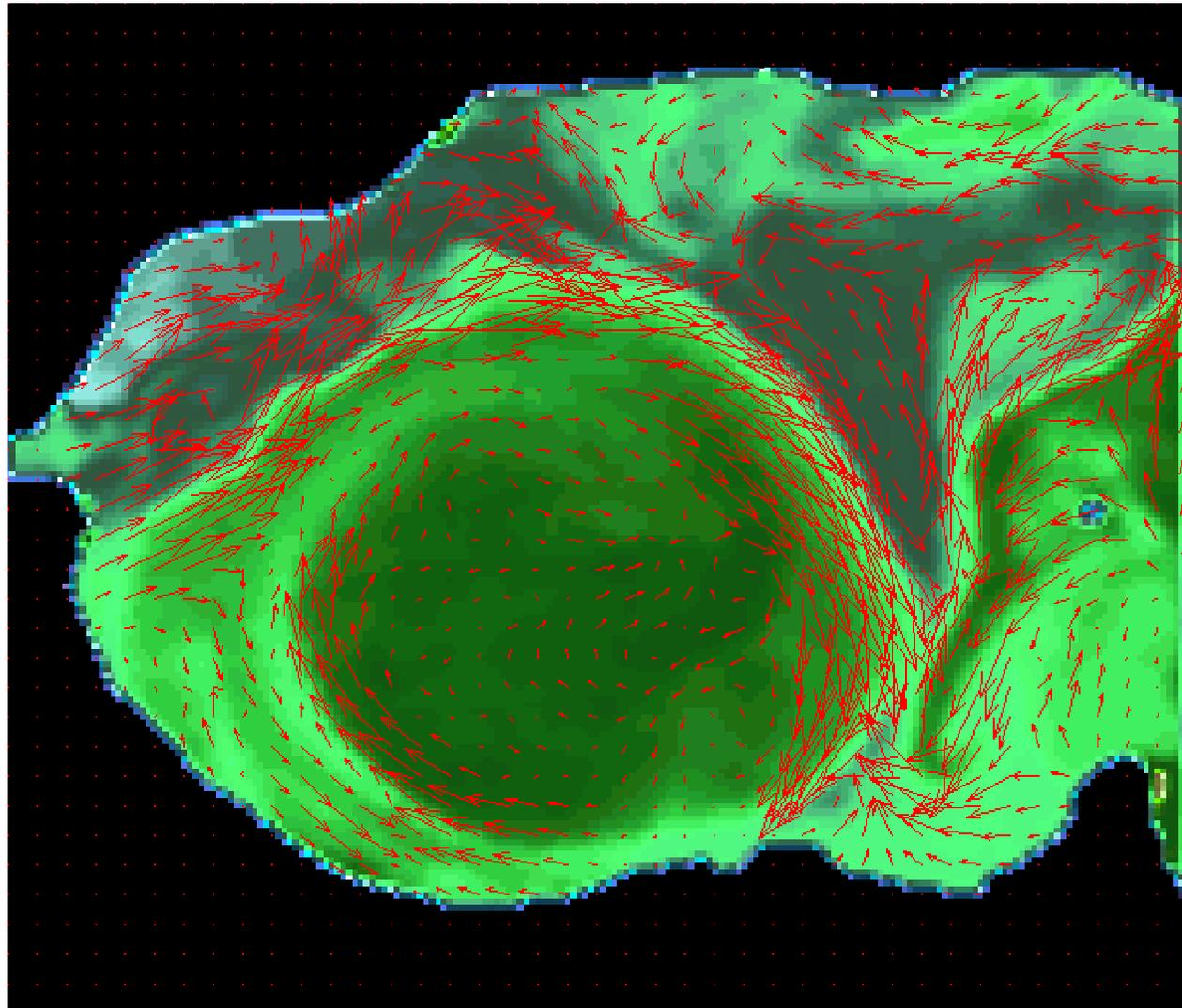
- On cherche le champs de vecteurs *spline* qui minimise :

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\vec{V}_i - V(X_i)\|^2 + \int_{\mathbb{R}^2} \alpha \|\nabla(\operatorname{div} V)\|^2 + (1-\alpha) \|\nabla(\operatorname{curl} V)\|^2 dx dy$$

Où  $\vec{V}_i$  sont les vecteurs tangents calculés en chaque point

- $\begin{matrix} \vec{V}_i \\ X_i \end{matrix}$

# Résultats



# Estimation de champs dense de mouvement (flot)

- On cherche à estimer, en tout point de la séquence, le vecteur vitesse en résolvant une équation de conservation.
  - Cette équation traduit des propriétés physiques sur l'évolution de la variable observée.  
**Que peut-on dire pour les données SST ou couleur de l'océan ?**
- Une contrainte de régularité est nécessaire pour lever le problème d'ouverture.
  - Cette équation traduit les propriétés physiques sur la régularité des variables observées.  
**Quelle régularité spatiale existe sur les champs de mouvement en océanographie ?**

## Hypothèses de conservation applications atmosphériques

1. Conservation de la luminance :  $\frac{dI}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{\partial I}{\partial t} + \nabla I \cdot w = 0$

2. Conservation de la masse ou de la densité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0 \Rightarrow \frac{\partial I}{\partial t} + \nabla I \cdot w + I \text{div}(w) = 0$$

où  $w$  est la vitesse 3D du fluide.

3. Conservation de la concentration, d'où l'équation d'advection-diffusion :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}(Cw) + \text{div}(k \cdot \nabla C) = 0 \Rightarrow \frac{\partial I}{\partial t} + \nabla I \cdot w + I \text{div}(w) + \text{div} k \nabla I = 0$$

$k$

$$k = f(w)$$

# Hypothèse de régularité

On cherche un champ régulier spatialement

- On peut choisir une régularisation  $L^2$

$$|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2$$

- Ou  $L^1$

$$|\nabla u| + |\nabla v|$$

- Ou div/curl d'ordre 1 ou 2 : (ici d'ordre 2)

$$\|\nabla \operatorname{div}(w)\|^2 + \|\nabla \operatorname{curl}(w)\|^2$$

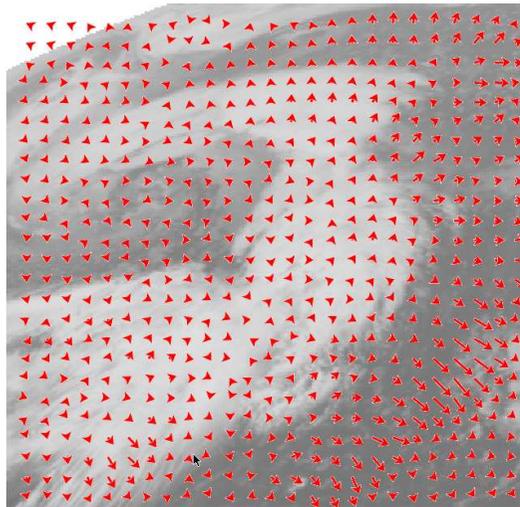
**En océanographie : quelle régularité utiliser ?**

# Résultat en météorologie

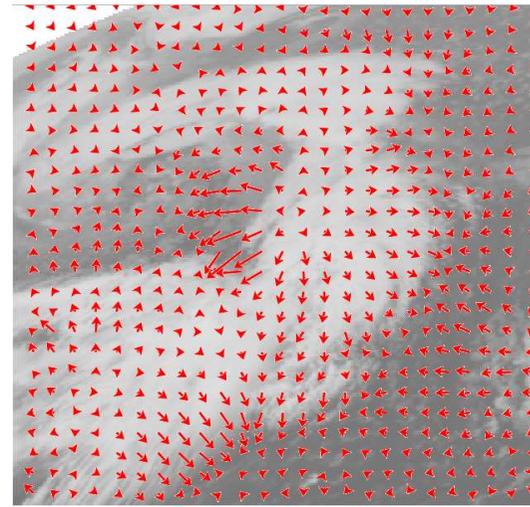


Séquence Méteosat

# Résultat en météorologie



Conservation de la  
luminance  
norme  $L_2$



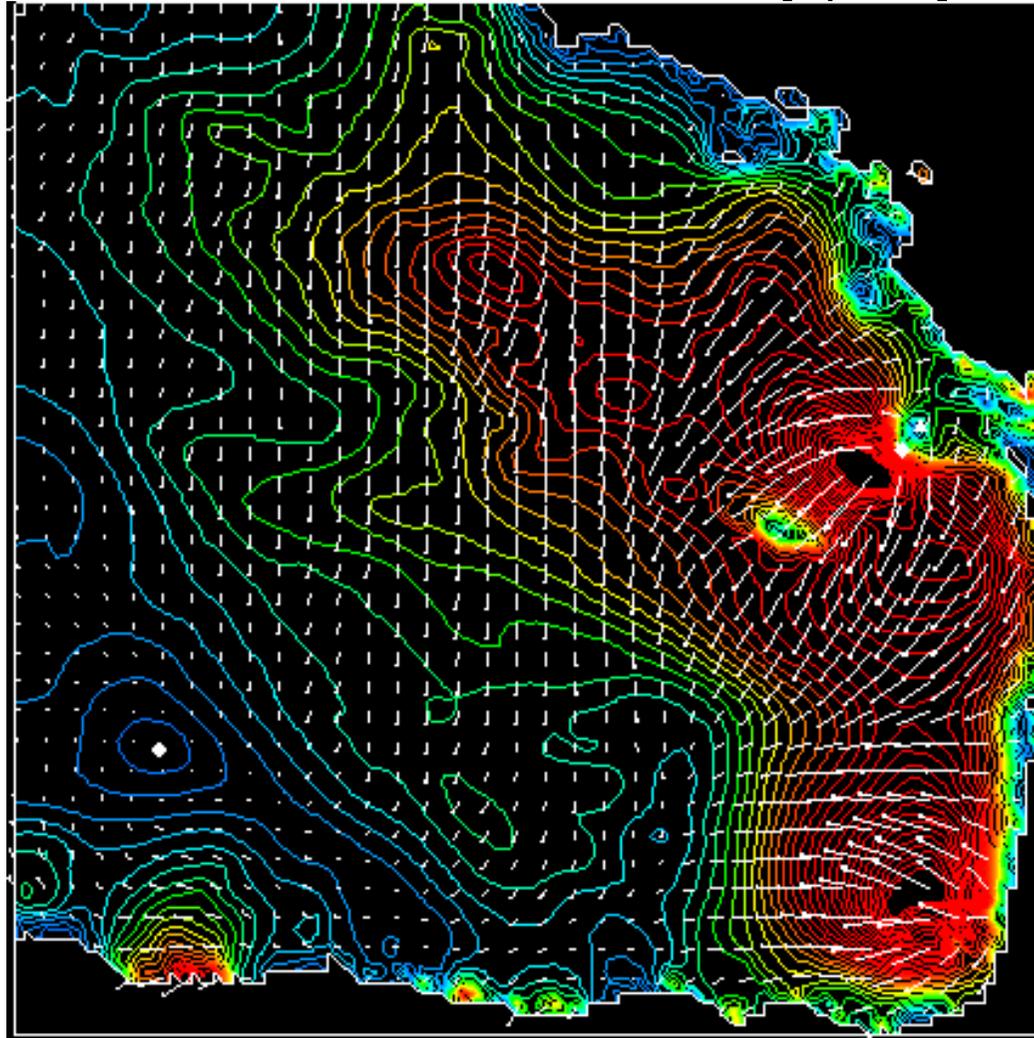
Conservation du  
de la densité

# Résultat en océanographie



Séquence NOAA/AVHRR du golfe de Gascogne

# Résultat en océanographie



Conservation de la luminance avec norme  $L_1$  et détection des points selles et noeuds

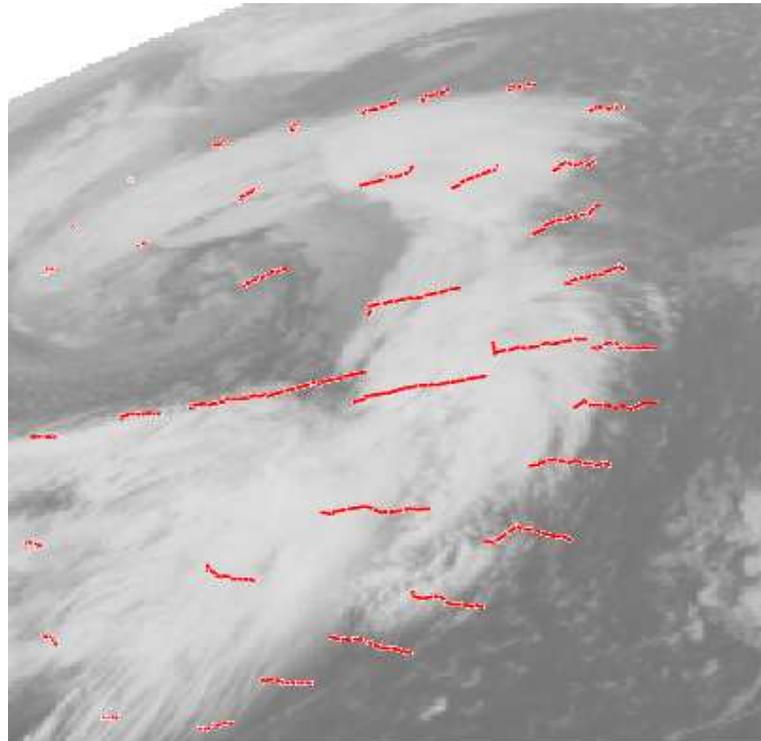
# Intégration du champ de mouvement

- La trajectoire est obtenue en intégrant le champ de vitesse à partir d'une position initiale :

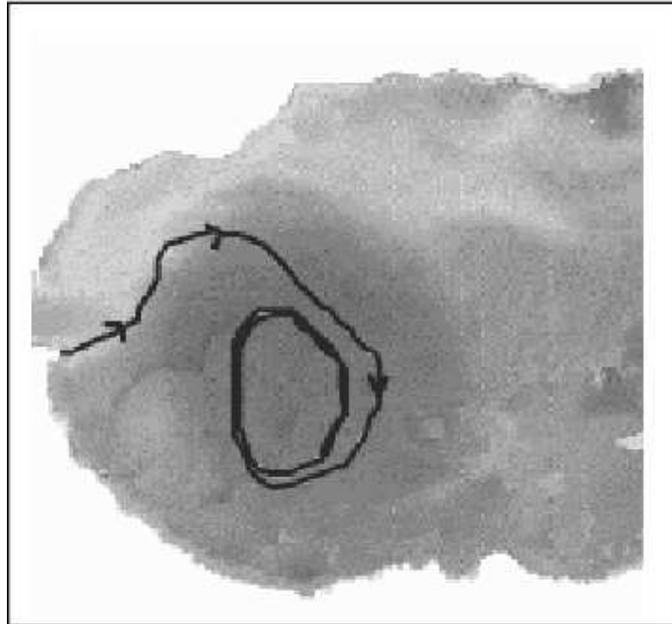
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = w \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

- Les équations différentielles de ce type sont résolubles par des schémas de types *Runge-Kutta*.

# Résultat en météorologie



# Résultat en océanographie

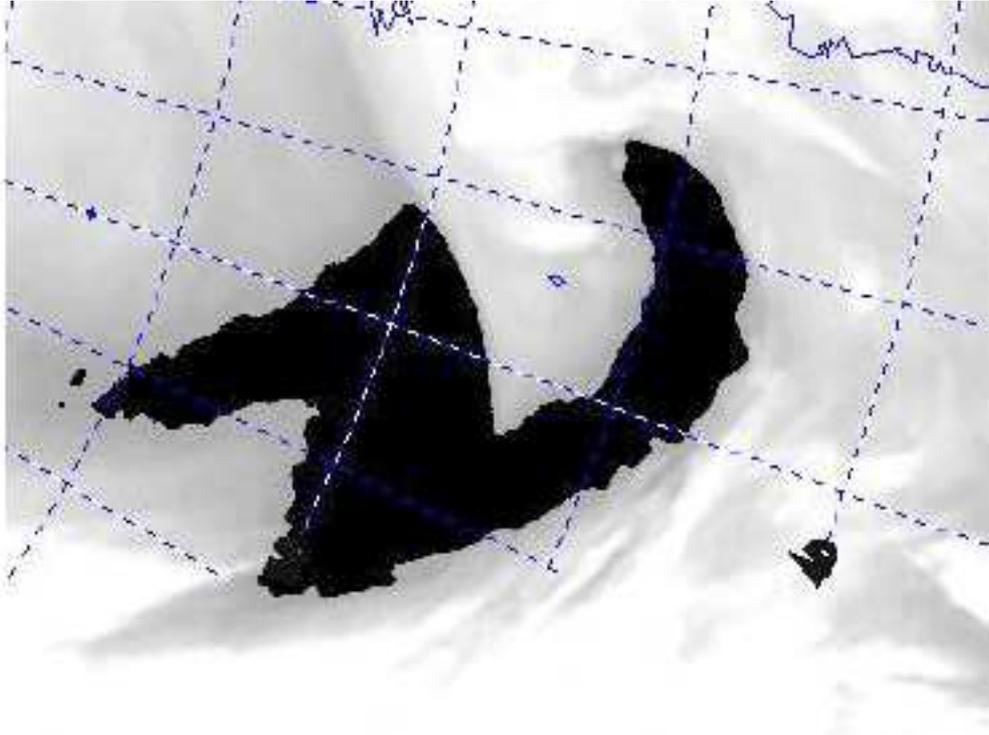


# Résumé des apports potentiels

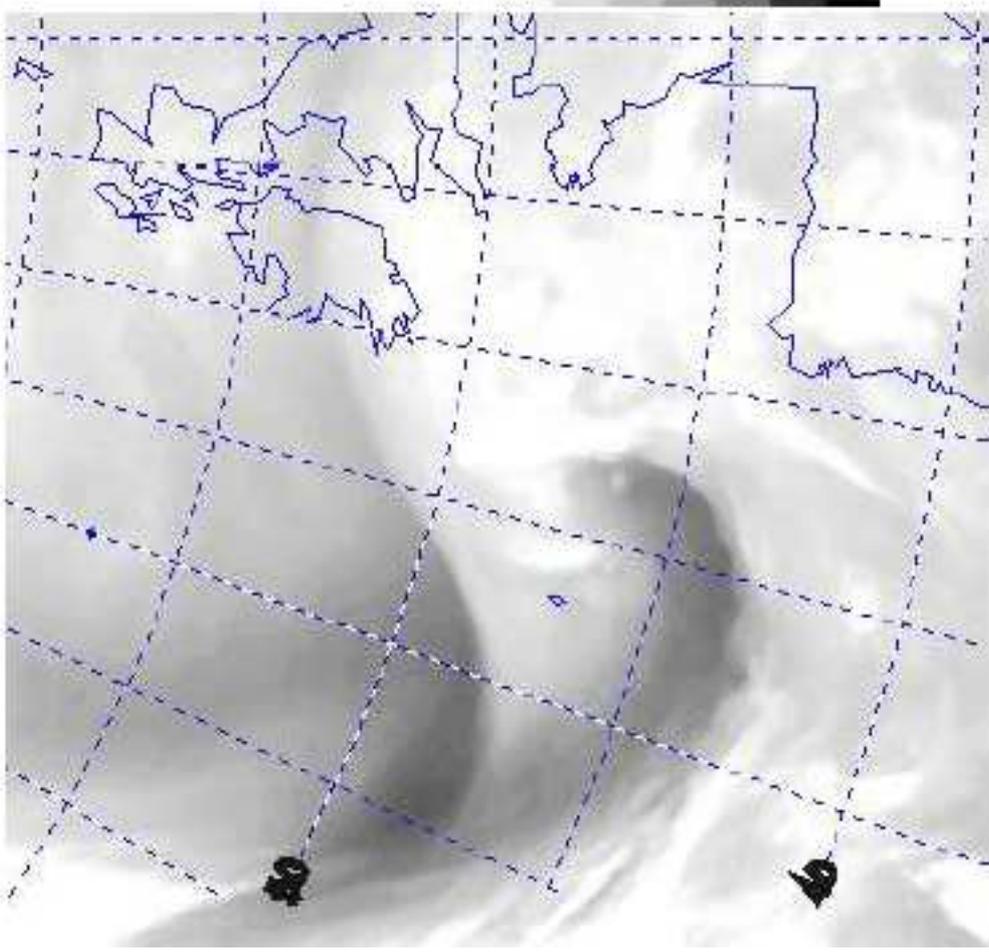
- Champs denses de vitesse
- Possibilité d'incorporer les lois physiques d'évolution et de régularité (*ASSIMAGE*)
- Trajectoires denses et comparables aux bouées (validation)
- Problèmes à résoudre : couverture nuageuse, échantillonnage temporel (si trop important : choisir des méthodes d'appariement)

# Application en météorologie : identification des précurseurs d'altitude de tempêtes (MétéoFrance)

- DEA Yann Michel, thèse à suivre (?)
- Cyclogénèse caractérisée par des zones d'inclusion sèche avec hautes valeurs de tourbillon potentiel
- Détectables par images satellites dans le canal vapeur d'eau par segmentation par multiseuillage des images .
- Identification des anomalies de tropopause par ce biais
- Comparaison avec les cellules détectées par les modèles numériques
- Les cellules détectées sont utilisées comme pseudo observations du tourbillon potentiel dans le système d'assimilation



- 90.33
- 85.00
- 79.67
- 74.33
- 69.00
- 63.67
- 58.33
- 53.00
- 47.67
- 42.33
- 37.00
- 31.67
- 26.33
- 21.00
- 15.67
- 10.33



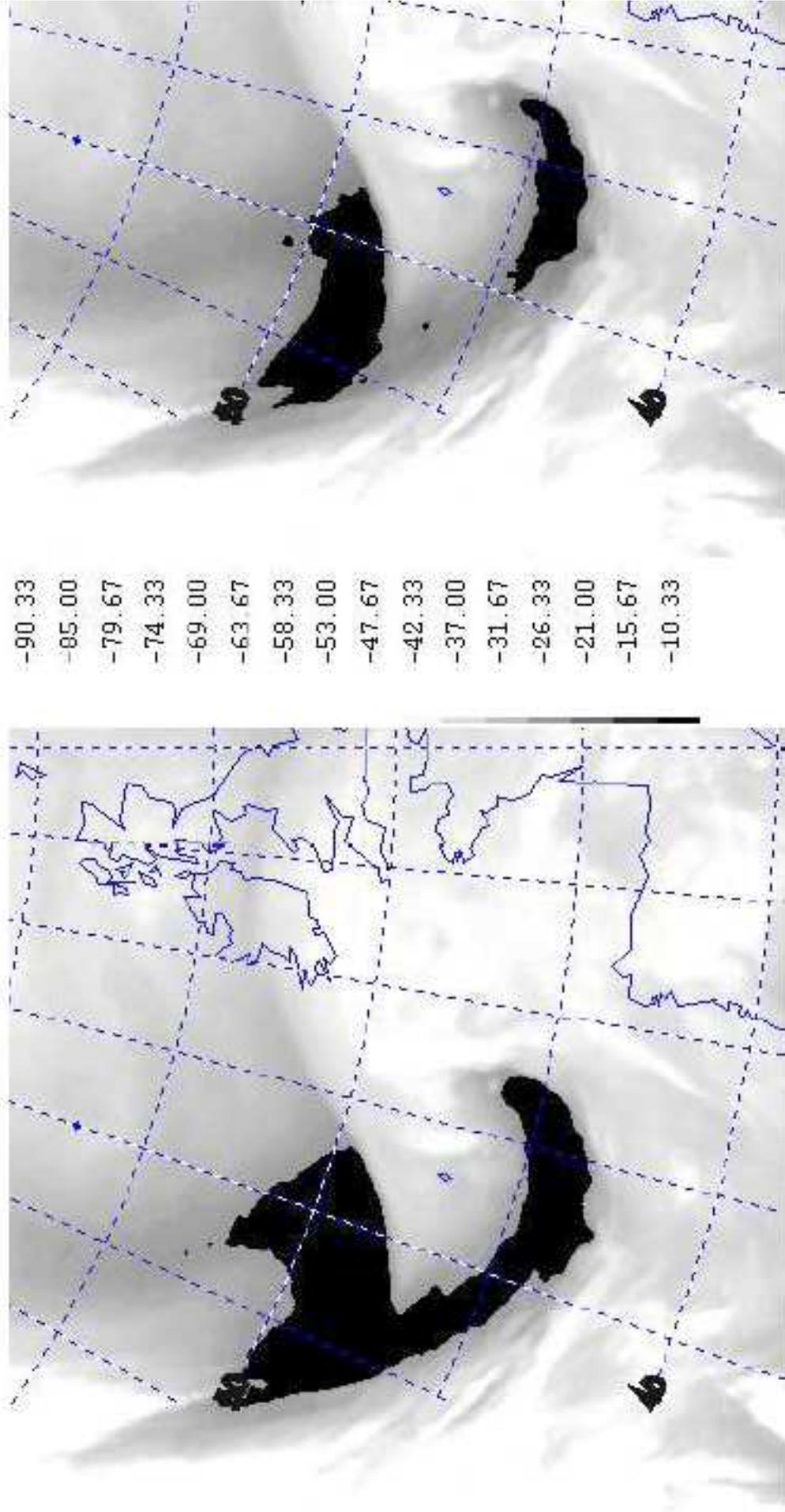


FIG. 12: Seuillage successifs de l'image METEOSAT canal vapeur d

# Application industrielle: CEMAGREF Rennes



## Écoulements étudiés

Couche de mélange



Sillage

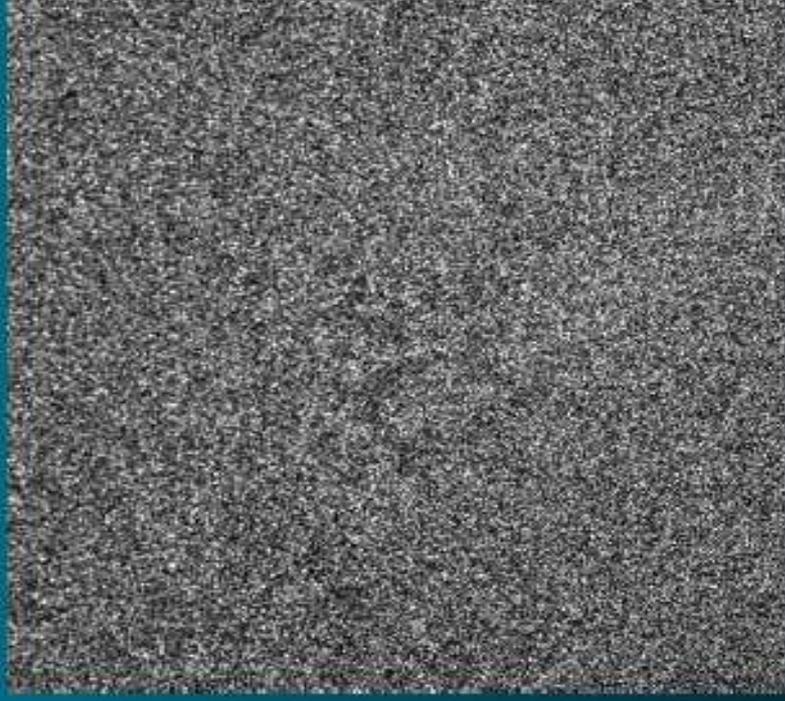
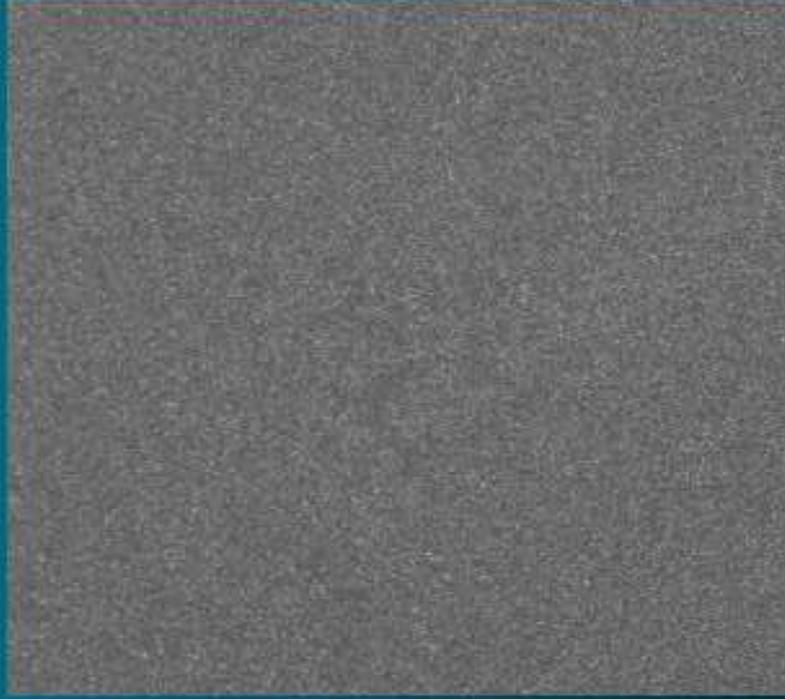


Interaction couche de mélange - sillage



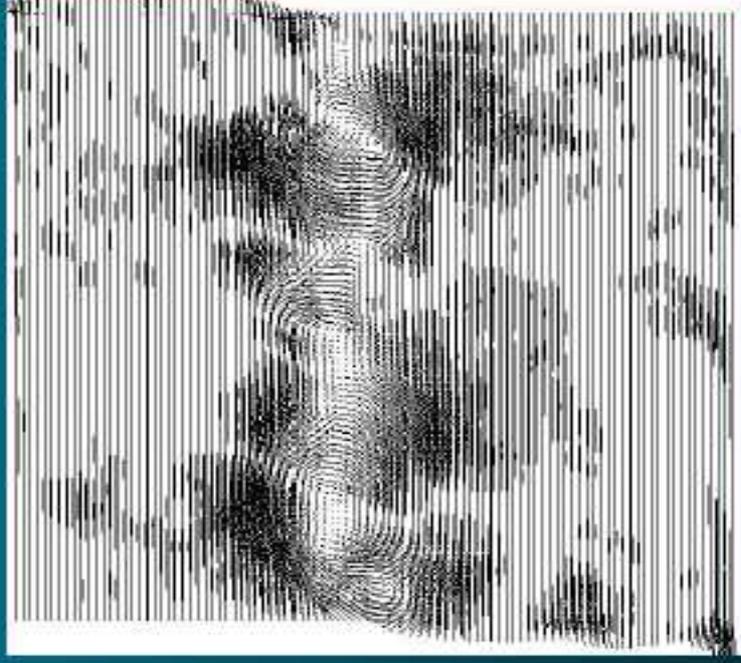
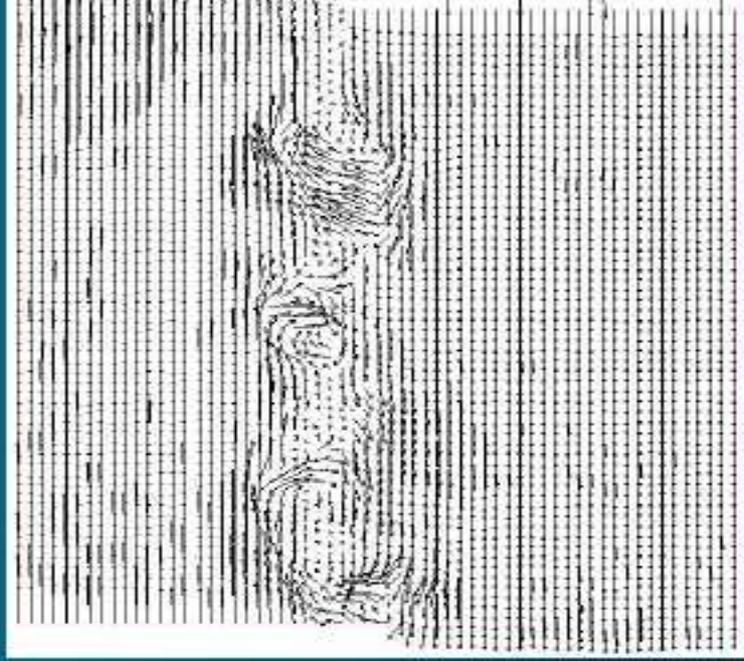
## Type d'image

Couple d'image de PIV



## Quelques résultats

Couche de mélange



# Application en glaciologie

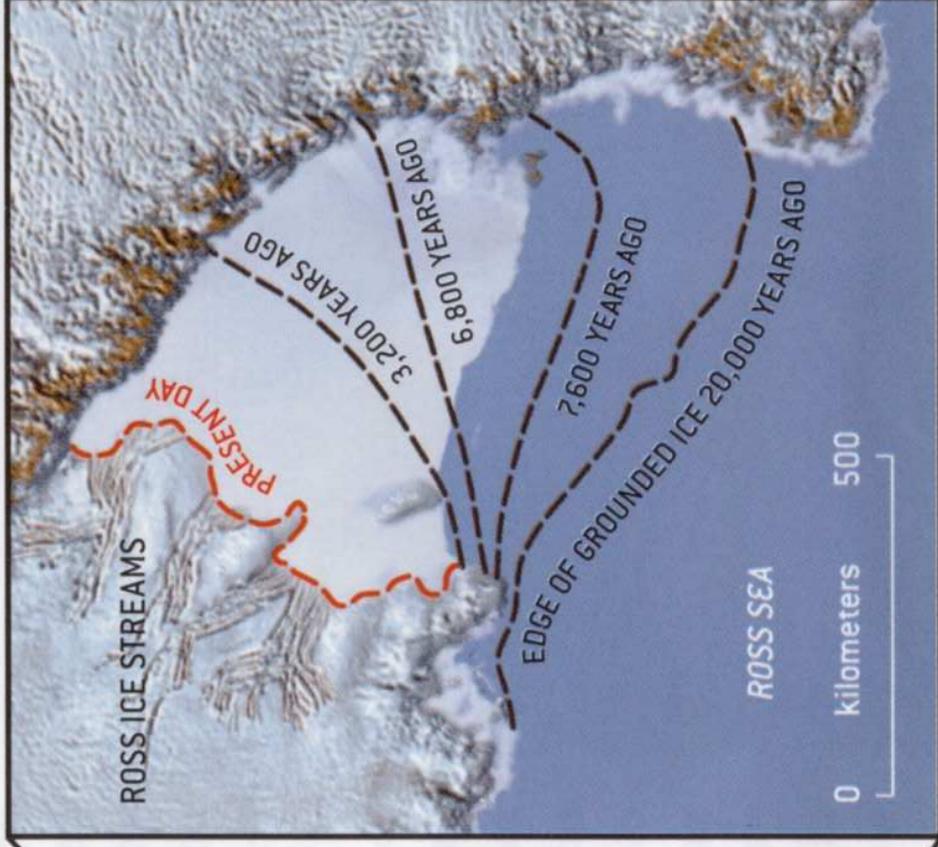
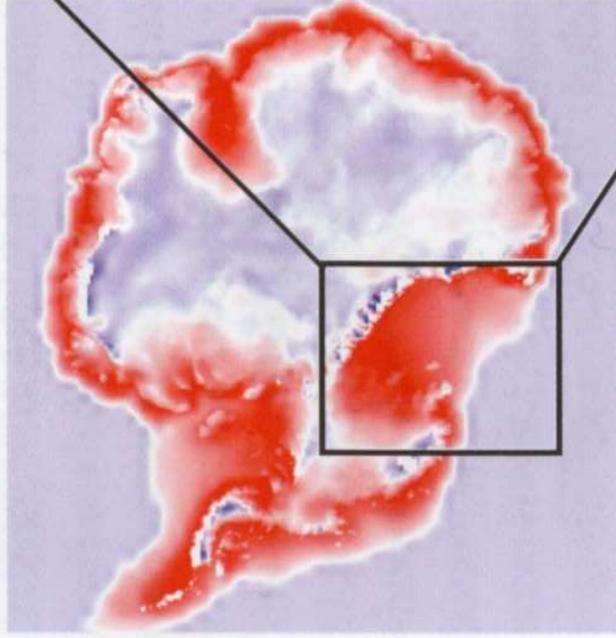
# Modèle direct d'évolution de calotte polaire ou de glacier

- Calcule l'épaisseur de glace au cours du temps en tous points du domaine.
- En réponse à des conditions climatiques variables (température, précipitation, niveau des mers.)
- En tenant compte de mécanismes internes  
Écoulement de la glace, couplage thermo-mécanique

# Données disponibles

- L'échelle de temps typique des calottes polaires est  $> 10\,000$  ans
- En ce qui concerne les variables pronostiques on ne dispose que de l'état actuel (altitude de la surface, température dans la glace)
- Autres données :
  - Extensions des calottes par des moraines datées.
  - Direction de l'écoulement passé
  - Échos radars : couches internes donnant des isochrones

# SHEDDING AND SHRINKING



*Bindshadler et Bentley, 2003*

# Dans le cadre d'ASSIMAGE

- Etude de faisabilité : Comment contraindre un modèle de calotte à l'aide de données d'extension.
  - Utilisation d'un modèle simplifié
  - Recherche des variations climatiques responsables des variations d'extension.
- Ensuite, application aux calottes réelles.

# Echos radar en Antarctique

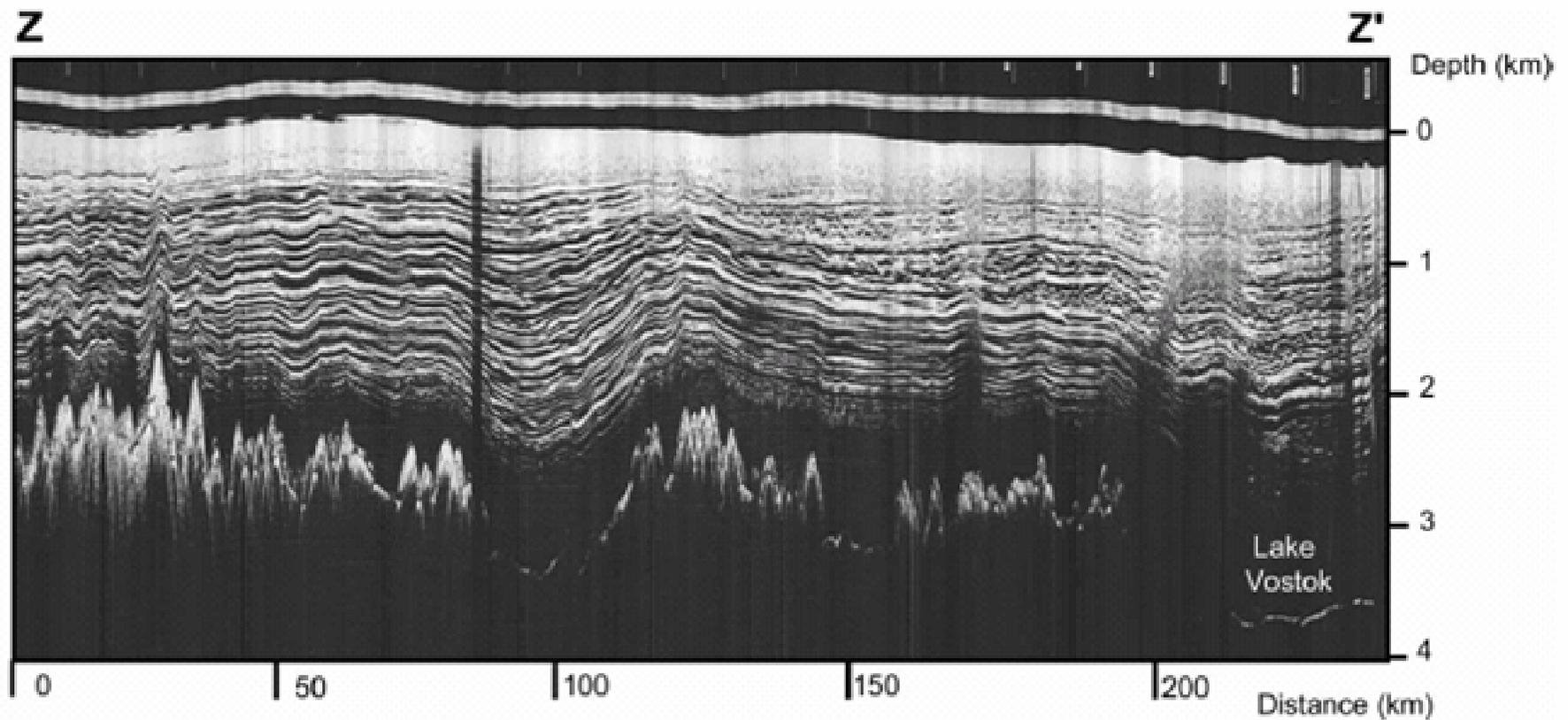


Fig. 5. Radar line ZZ'. Z-scope record along the line of ice flow between Ridge B and the Vostok ice core site.

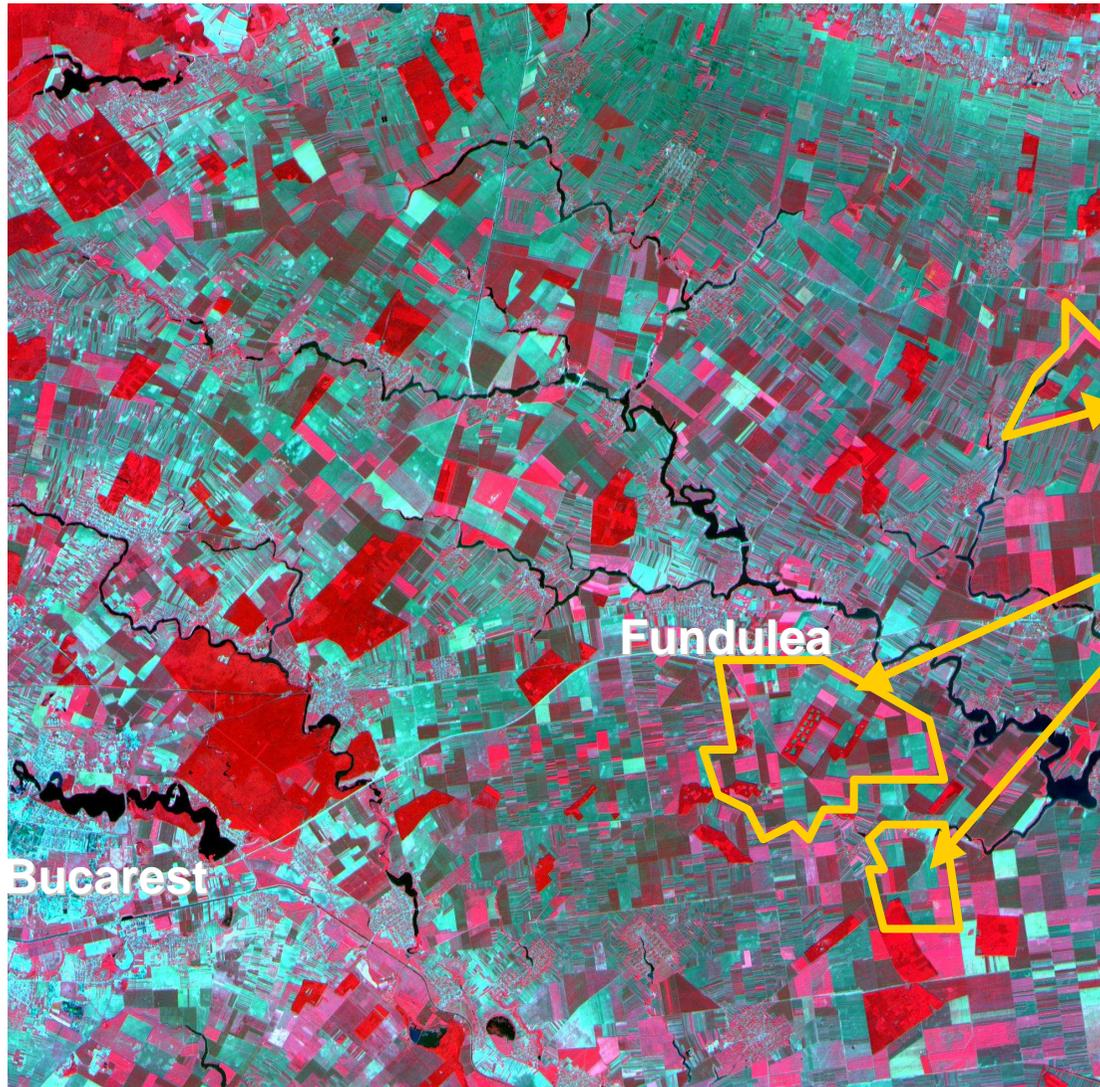
# Application en agronomie

# Prévision de récoltes

- Modèle de croissance : STICS ( INRA) modèle discret. Le modèle comporte des paramètres non mesurables.
- Observation : in-situ et images SPOT.
- Problème général : la mesure brute est un rayonnement et non une variable d'état du modèle. La résolution d'un problème inverse est nécessaire pour accéder à une variable d'état ( même type de problème en météorologie)
- Thèse Claire Lauvernet

## I. Introduction

# Experiment: Fundulea, Romania



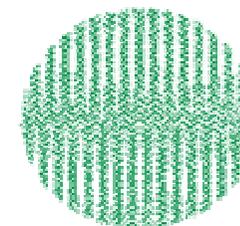
42 units of **Wheat Crop** of 1000m<sup>2</sup>

**Fields ICCPT**

**Database :**

- 28 SPOT images during the growth period (oct-july)
- 20mx20m ; haute resolution spatiale
- meteorology
- cultural techniques
- ground measurements:  
*biomass, LAI, soil properties*

## II. Les modèles de fonctionnement du couvert



**Simulateur multIdisciplinaire  
pour les Cultures Standard**  
*Brisson et al. 1998*

**Objet simulé :**

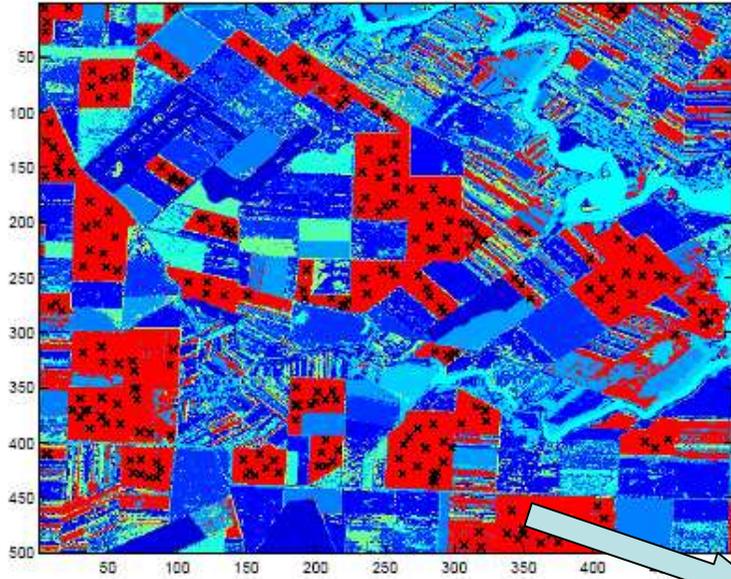
une situation culturale = 1 milieu physique + 1 itinéraire technique

**Description mécaniste des principaux processus :**

photosynthèse, respiration, développement, échanges d'eau et d'azote, allocation (rendement) des réserves aux différents compartiments...

# Assimilation of LAI from remote sensing data

SPOT images, Fundulea, Romania

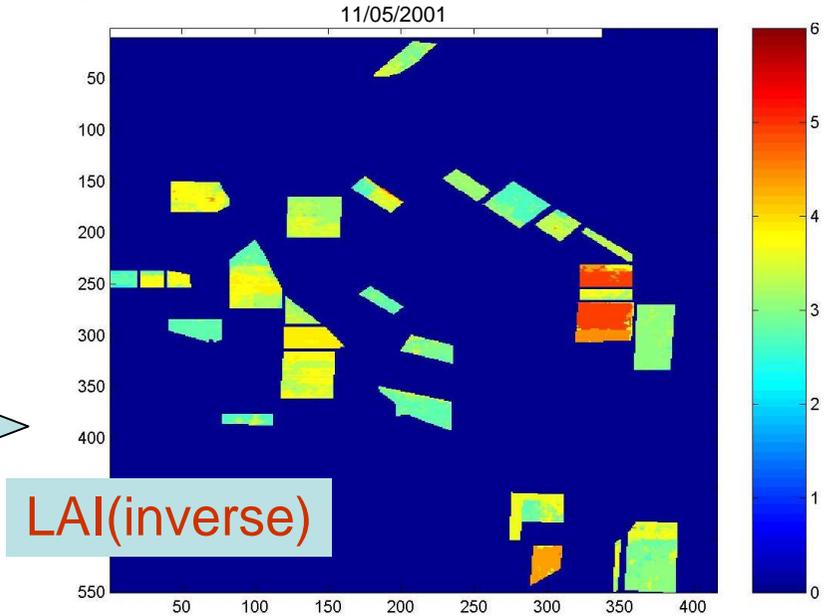


Radiative  
Transfert  
Model  
inversion



OR

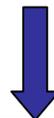
Map of LAI estimated from SPOT images



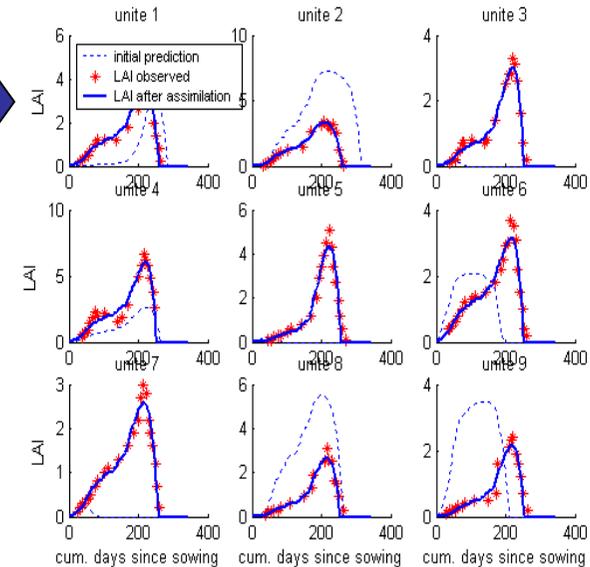
LAI(inverse)

LAI(NDVI)

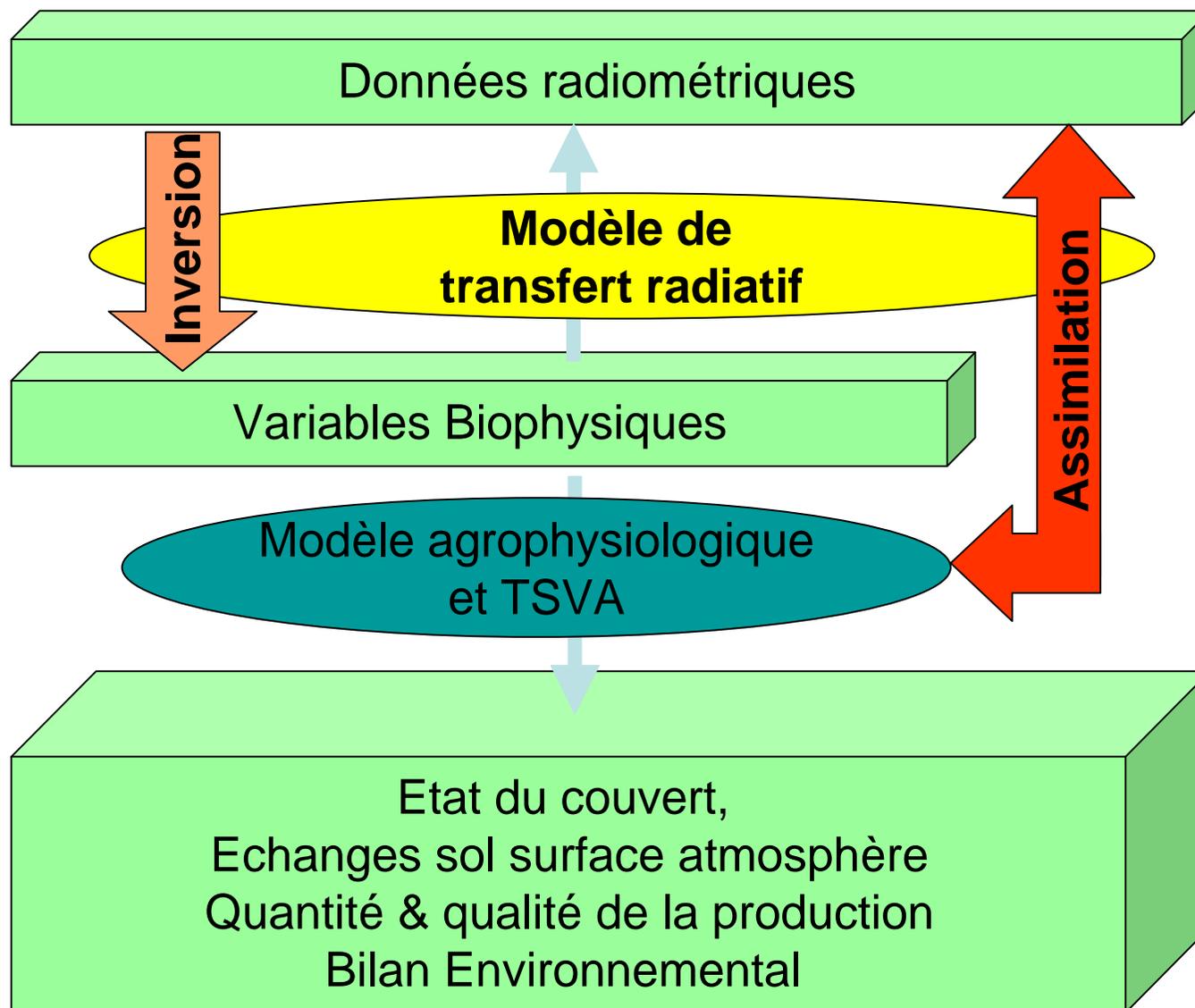
assimilation of LAI  
into the vegetation model  
using the adjoint model



Estimation of soil  
properties and cultural  
practices



# L'approche



## Assimilation de LAI provenant de données de télédétection

# LAI observé vs. LAI estimé

