

ACTA : Aéraulique et contrôle des atmosphères
turbulentes

Fluminance : Analyse, description et contrôle
des écoulements à partir de séquences d'images

AG MIA/NUMM, Massy-Palaiseau & Jouy-en-Josas, France

21-23 mai 2019



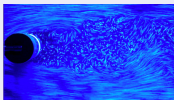
Table des matières

Acta et Fluminance

Axes de recherche méthodologiques

ACTA : mécanique des fluides appliquée à l'aérodynamique

Mesure des écoulements



Estimation du mouvement fluide par flot optique :

$$\mathbf{v} = \arg \min_{\mathbf{v}} \int_{\Omega} f(I, \mathbf{v}) d\mathbf{r},$$

$$\text{avec } f(I, \mathbf{v}) = \mathbf{f}_d(I, \mathbf{v}) + \alpha \mathbf{f}_r(\mathbf{v}).$$

En 2D approche flot optique avec modèle d'observation stochastique.
En 3D assimilation variationnelle d'ensemble (EnVar).

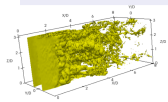
Modélisation et Simulation des écoulements

Théorème de transport stochastique (Mémmin, 2014)

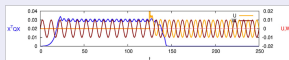
$$D_t \mathbf{v} = \underbrace{d_t \mathbf{v}}_{\text{Time incr.}} + \underbrace{\mathbf{v}^* \nabla \mathbf{v}}_{\text{Advection}} dt + \underbrace{\sigma dB_t \nabla \mathbf{v}}_{\text{Noise}} - \underbrace{\nabla \left(\frac{1}{2} \mathbf{a} \nabla \mathbf{v} \right)}_{\text{Diffusion}} dt,$$

$$\text{avec } \mathbf{v}^* = \mathbf{v} - \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{a})^T \text{ et } \mathbf{a} = \sigma \sigma^T.$$

Modélisation stochastique par incertitude de localisation (LUM).
Assimilation de données (variationnelles déterministes et d'ensemble).



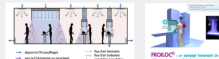
Contrôle des écoulements



Preuve de convergence des schémas de commande.
Problèmes spécifiques à la commande des écoulements
Système de très grande dimension

Domaines d'applications

Alimentation :



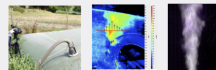
- Protection ultra-propre et froide par flux d'air localisés en industrie agro-alimentaire.

Agriculture :



- Maîtrise des flux d'air dans les serres, les fermes urbaines, les bâtiments d'élevages, pour lutter contre le risque gélif en viticulture et en arboriculture.

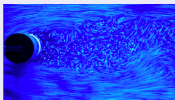
Environnement :



- Estimation des débits de fuites de biogaz.

ACTA : mécanique des fluides appliquée à l'aérodynamique

Mesure des écoulements



Estimation du mouvement fluide par flot optique :

$$\mathbf{v} = \arg \min_{\mathbf{v}} \int_{\Omega} f(I, \mathbf{v}) d\mathbf{r},$$

$$\text{avec } f(I, \mathbf{v}) = \mathbf{f}_d(I, \mathbf{v}) + \alpha \mathbf{f}_r(\mathbf{v}).$$

En 2D approche flot optique avec modèle d'observation stochastique.
En 3D assimilation variationnelle d'ensemble (EnVar).

Chercheurs

D. Heitz
J. Carlier
L. Fiabane
C. Collewet

Modélisation et Simulation des écoulements

Théorème de transport stochastique (Mémin, 2014)

$$D_t \mathbf{v} = \underbrace{d_t \mathbf{v}}_{\text{Time incr.}} + \underbrace{\mathbf{v}^* \nabla \mathbf{v}}_{\text{Advection}} dt + \underbrace{\sigma d\mathbf{B}_t \nabla \mathbf{v}}_{\text{Noise}} - \underbrace{\nabla \left(\frac{1}{2} a \nabla \mathbf{v} \right)}_{\text{Diffusion}} dt,$$

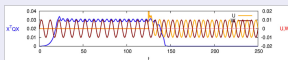
$$\text{avec } \mathbf{v}^* = \mathbf{v} - \frac{1}{2} (\nabla a)^T \text{ et } a = \sigma \sigma^T.$$

Modélisation stochastique par incertitude de localisation (LUM).
Assimilation de données (variationnelles déterministes et d'ensemble).

Ing., Ass. Ing.*

L. Blondel*
P. Georgeault
P. Loisel
L. Wallian

Contrôle des écoulements



Preuve de convergence des schémas de commande.
Problèmes spécifiques à la commande des écoulements
Système de très grande dimension

Doc., Postdoc.*

R. Schuster
Y. Ben Ali
A. Khojasteh
Y. Yang*

Fluminance : modélisation du mouvement fluide basé image

Modélisation des écoulements turbulents et géophysiques

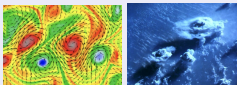
Modèle de transport stochastique basé sur incertitude de localisation

Momentum equations

$$\partial_t \mathbf{w} + (\mathbf{w}^* \cdot \nabla) \mathbf{w} - \frac{1}{2\rho} \sum_{ij} \partial_i (\rho a_{ij} \partial_j \mathbf{w}) + f \times \mathbf{w} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \mathcal{F}(\mathbf{w}).$$

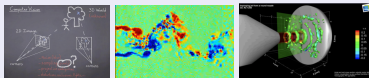
Effective drift

$$\mathbf{w}^* = \mathbf{w} - \frac{1}{2}(\nabla \cdot \mathbf{a})^T.$$



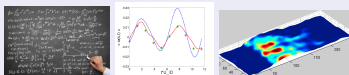
Estimation du mouvement fluide à partir d'images

Explorer des méthodes de mesures 2D/3D grandes échelles et des techniques d'estimation du mouvement des océans à partir d'images satellites



Couplage modèles dynamiques et données images

Proposer des techniques efficaces d'assimilation de données variationnelles et de filtrage stochastique



Chercheurs

E. Mémin

J. Erhel

J. Tissot

R. Lewandowski

J. Carlier

C. Colletet

D. Heitz

Doc., Postdoc.*

R. Schuster

Y. Ben Ali

A. Khojasteh

L. Li

B. Pinier

Y. Yang*

C. Cintolesi*

Fluminance : modélisation du mouvement fluide basé image

Grands objectifs

- ▶ Extraction d'information d'écoulement à partir d'images
- ▶ Etude d'outils pour l'analyse et le contrôle d'écoulements turbulents

Axes de recherche

1. Analyse et modélisation d'écoulements géophysiques et aérauliques
2. Mesure d'écoulements fluides
3. Couplage modèle dynamique et données images
4. Modèles numériques appliqués à l'hydrologie et à la géophysique

Domaines d'application

- ▶ Ecoulements géophysiques (Météorologie, Océanographie, Hydrologie)
- ▶ Aéraulique

Chercheurs

E. Mémin
J. Erhel
J. Tissot
R. Lewandowski
J. Carlier
C. Collewet
D. Heitz

Doc., Postdoc.*

R. Schuster
Y. Ben Ali
A. Khojasteh
L. Li
B. Pinier
Y. Yang*
C. Cintolesi*

Table des matières

Acta et Fluminance

Axes de recherche méthodologiques

Axe 1 : analyse et modélisation des écoulements turbulents et géophysiques

Dynamique des écoulements sous incertitude de localisation

$$d\mathbf{X}_t = \mathbf{w}(\mathbf{X}_t, t)dt + \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{X}_t, t)d\mathbf{B}_t$$

Axe 1 : analyse et modélisation des écoulements turbulents et géophysiques

Dynamique des écoulements sous incertitude de localisation

$$d\mathbf{X}_t = \mathbf{w}(\mathbf{X}_t, t)dt + \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{X}_t, t)d\mathbf{B}_t$$

Théorème de transport de Reynolds stochastique

$$d \int_{V(t)} q(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x} = \int_{V(t)} \mathbb{D}_t q$$

$$\mathbb{D}_t q = d_t q + \underbrace{\nabla q \cdot \left(\mathbf{w} - \frac{1}{2}(\nabla \cdot \mathbf{a}) \right)}_{\text{effective advection}} dt + \underbrace{\nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \mathbf{a} \nabla q \right)}_{\text{diffusion}} dt$$

Axe 1 : analyse et modélisation des écoulements turbulents et géophysiques

Dynamique des écoulements sous incertitude de localisation

$$d\mathbf{X}_t = \mathbf{w}(\mathbf{X}_t, t)dt + \sigma(\mathbf{X}_t, t)d\mathbf{B}_t$$

- ▶ Théorème de transport de Reynolds stochastique
- ▶ Conservation du moment

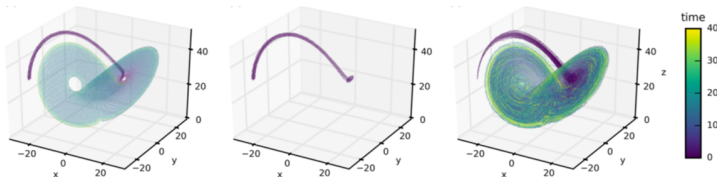
$$\mathbb{D}_t \mathbf{w} = \mathbf{g}dt - \frac{1}{\rho} \nabla(\rho dt + d\rho_t) + \nu \Delta(\mathbf{w}dt + \sigma d\mathbf{B}_t)$$

$$\mathbb{D}_t \rho = 0$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{w} - \frac{1}{2}(\nabla \cdot \mathbf{a})) = 0, \quad \nabla \cdot \sigma d\mathbf{B}_t = 0$$

Modèle sous-maille sous incertitude

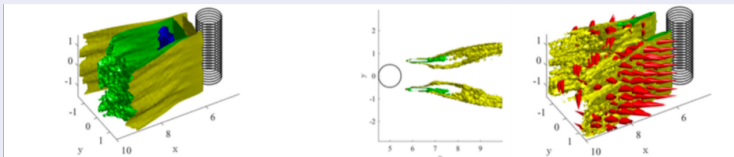
- ▶ Simulation grandes échelles améliorées (sillages, Green-Taylor, ...) pour différents Re
- ▶ Dérivation de dynamique stochastique d'écoulements géophysiques (Boussinesq, QG, etc.)
- ▶ Représentation précise des erreurs et nouveaux outils de modélisation pour l'analyse des petites échelles



Axe 1 : analyse et modélisation des écoulements turbulents et géophysiques

Dynamique des écoulements sous incertitude de localisation

- ▶ Modèles réduits stochastiques précis avec analyse additionnelle des résidus



Analyses théoriques et asymptotiques des modèles grandes échelles

- ▶ Etude des simulations RANS stationnaires et instationnaires
- ▶ Existence de la théorie de Leray pour l'étude de Navier-Stokes avec termes de viscosité tourbillonnaire : existence de solution unique de classe C^1
- ▶ Convergence de cette solution vers une solution turbulente (viscosité tourbillonnaire sur support compact)

Axe 2 : Mesure des écoulements à partir d'images

Estimateur de flot optique classique

$$\hat{\mathbf{w}} = \arg \min \int_{\Omega} \underbrace{\left[\frac{d}{dt} f(\mathbf{x}, t) \right]^2}_{\text{data term}} d\mathbf{x} + \alpha \int_{\Omega} \underbrace{\|\nabla \mathbf{w}(\mathbf{x}, t)\|^2}_{\text{smoothing term}} d\mathbf{x}$$

- ▶ Solution dépend du paramètre de régularisation

Axe 2 : Mesure des écoulements à partir d'images

Estimateur de flot optique sous incertitude de localisation

$$\hat{\mathbf{w}} = \arg \min \int_{\Omega} \mathbb{E}[\mathbb{D}_t f - \frac{d}{dt} \mathbb{E}f]^2 d\mathbf{x} - \int_{\Omega} \partial_t \|\mathbf{w}\|^2 d\mathbf{x}$$

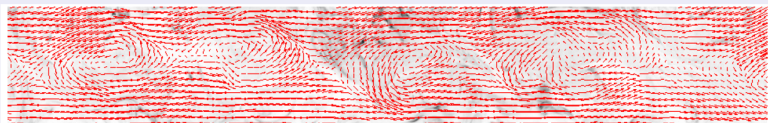
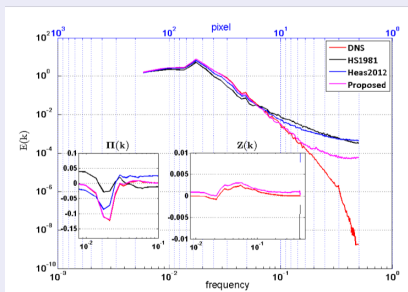
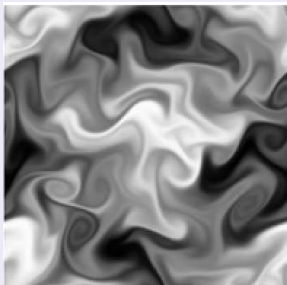
- Solution dépend du paramètre de régularisation

Axe 2 : Mesure des écoulements à partir d'images

Estimateur de flot optique sous incertitude de localisation

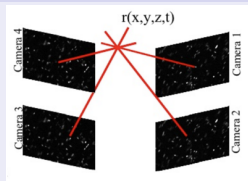
$$\hat{\mathbf{w}} = \arg \min \int_{\Omega} ([\partial_t \bar{F} + \mathbf{w} \nabla \bar{F} - \frac{\alpha}{2} \Delta \bar{F}]^2 - \alpha \|\nabla \bar{F}\|^2) d\mathbf{x} + \alpha \int_{\Omega} \|\nabla \mathbf{w}\|^2 d\mathbf{x}$$

- Le paramètre de régularisation peut être facilement estimé



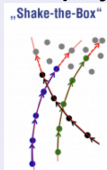
Axe 2 : 3D Particle Tracking Velocimetry

PIV observations



Dynamical model

- ▶ **2nd order polynome**



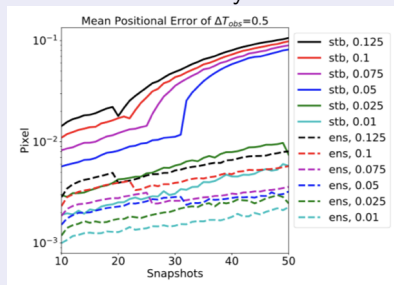
Schanz et al. (2016, EIF)

Data assimilation approaches

- ▶ **En 4DVar PTV approach** from Yang *et al.* (2018, CFTL)

Data assimilation results

- ▶ Better particle position and velocity



Axe 3 : couplage modèle dynamique et données images

Assimilation de données variationnelle

Sachant

$$\partial_t \mathbf{X}_t + \mathbb{M}(\mathbf{X}_t, \mathbf{a}_t) = 0$$

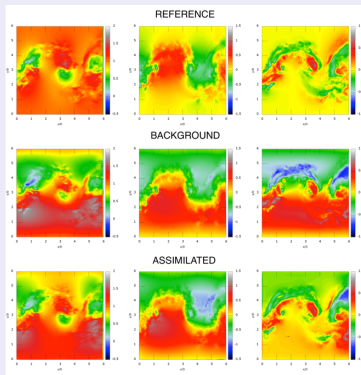
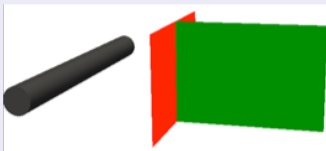
$$\mathbf{Y}_t = \mathbb{H}(\mathbf{X}_t) + \epsilon$$

Estimation

$$\arg \min J(\mathbf{X}_{t_0}, \mathbf{a}) = \|\mathbf{X}_{t_0} - \mathbf{X}_b\|_{B^{-1}}^2 + \int_{t_0}^{t_f} \|\mathbb{H}(\mathbf{X}_t) - \mathbf{Y}_t\|_{R^{-1}}^2 + \|\mathcal{F}(\mathbf{a})\|_{B_a^{-1}}^2$$

Application au sillage turbulent :

- ▶ Contrôle de la condition initiale, d'entrée et du modèle de turbulence (sous incertitude de localisation)
- ▶ Observations bruitées dans deux plans perpendiculaires



Axe 3 : couplage modèle dynamique et données images

Filtrage stochastique pour l'assimilation de données

Sachant

$$\partial_t \mathbf{X}_t + \mathbb{M}(\mathbf{X}_t, \mathbf{a}_t) = 0$$

$$\mathbf{Y}_t = \mathbb{H}(\mathbf{X}_t) + \epsilon$$

Estimation

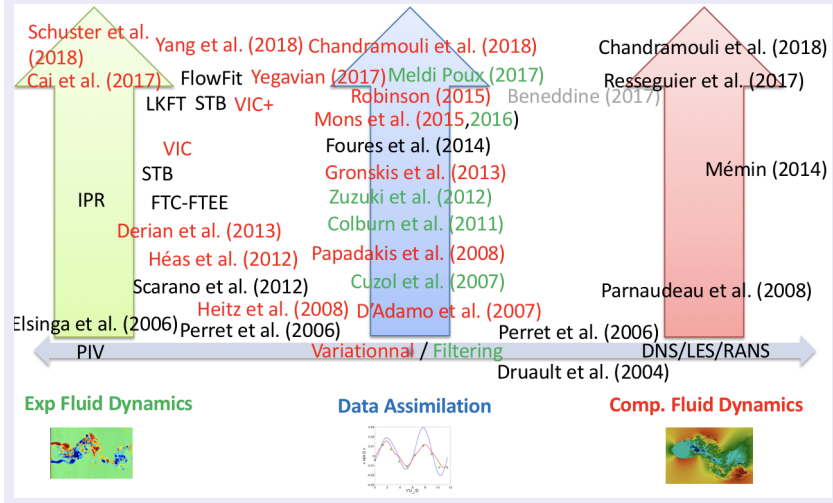
$$p(\mathbf{X}_{0:k} | \mathbf{Y}_{1:k}) \simeq \sum_i \omega_k^{(i)} \delta_{\mathbf{X}_{1:k}^{(i)}}; \quad \omega_k^{(i)} \propto \omega_{k-1}^{(i)} \frac{p(\mathbf{Y}_k | \mathbf{X}_k^{(i)}) p(\mathbf{X}_k^{(i)} | \mathbf{X}_{k-1}^{(i)})}{\pi(\mathbf{X}_k^{(i)} | \mathbf{X}_{0:k-1}^{(i)}, \mathbf{Y}_{1:k})}$$

Application à une surface libre :

- ▶ Dynamique de type shallow water avec erreur modèle
- ▶ Observations bruitées mesures Kinect

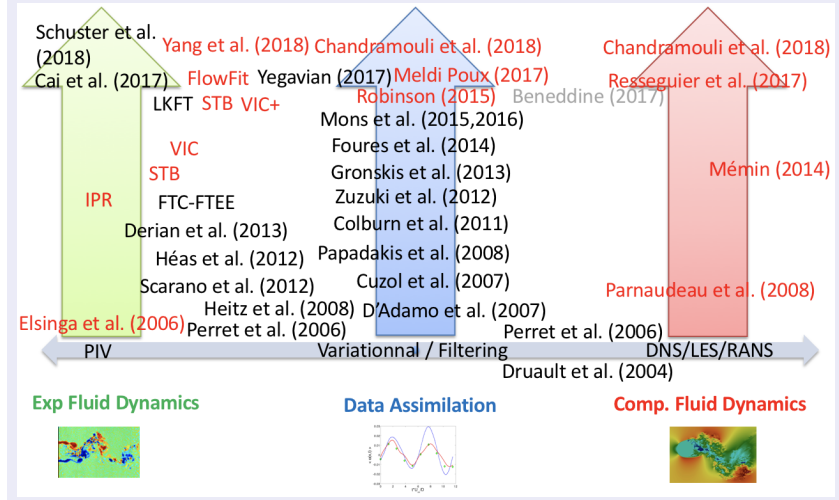
Axe 3 : data-driven vs model-driven

Variational vs Filtering approaches



Axe 3 : data-driven vs model-driven

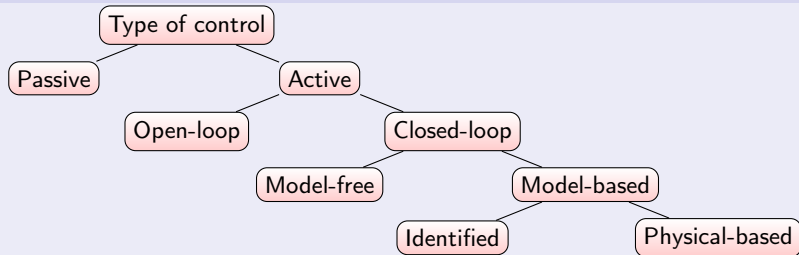
3D vs 2D approaches



Axe 3 : Contrôle en boucle fermée basé images

Stratégie

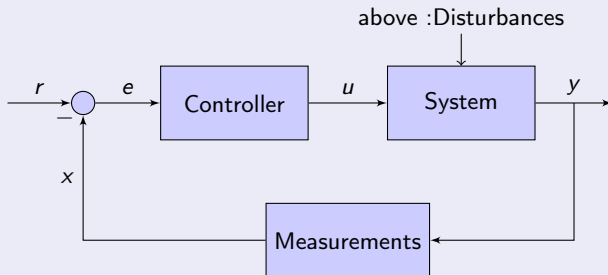
- ▶ **Contrôle en boucle fermée basée sur une modèle physique ;**
- ▶ Contrôle aux frontières du système ;
- ▶ État de l'écoulement estimé à partir de donnée image ;
- ▶ Écoulement maintenu dans un état désiré (point fixe ou cycle limite) ;
- ▶ Contrôle optimal utilisant la méthode LQR.



Axe 3 : Contrôle en boucle fermée basé images

Stratégie

- ▶ **Contrôle en boucle fermée basée sur une modèle physique ;**
- ▶ Contrôle aux frontières du système ;
- ▶ État de l'écoulement estimé à partir de donnée image ;
- ▶ Écoulement maintenu dans un état désiré (point fixe ou cycle limite) ;
- ▶ Contrôle optimal utilisant la méthode LQR.



Axe 3 : Contrôle en boucle fermée basé images

Stratégie

- ▶ Contrôle en boucle fermée basée sur une modèle physique ;
- ▶ **Contrôle aux frontières du système ;**
- ▶ État de l'écoulement estimé à partir de donnée image ;
- ▶ Écoulement maintenu dans un état désiré (point fixe ou cycle limite) ;
- ▶ Contrôle optimal utilisant la méthode LQR.

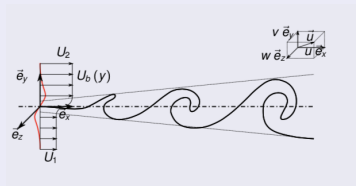


Figure: Couche de mélange spatiale (contrôle amont)

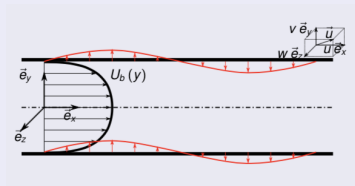
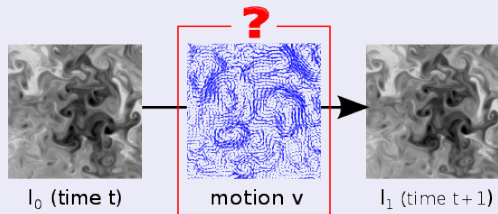


Figure: Canal périodique (contrôle aux parois)

Axe 3 : Contrôle en boucle fermée basé images

Stratégie

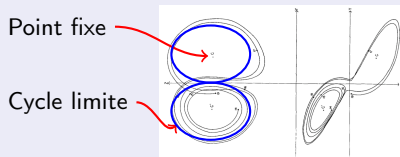
- ▶ Contrôle en boucle fermée basée sur une modèle physique ;
- ▶ Contrôle aux frontières du système ;
- ▶ **État de l'écoulement estimé à partir de donnée image ;**
- ▶ Écoulement maintenu dans un état désiré (point fixe ou cycle limite) ;
- ▶ Contrôle optimal utilisant la méthode LQR.



Axe 3 : Contrôle en boucle fermée basé images

Stratégie

- ▶ Contrôle en boucle fermée basée sur une modèle physique ;
- ▶ Contrôle aux frontières du système ;
- ▶ État de l'écoulement estimé à partir de donnée image ;
- ▶ **Écoulement maintenu dans un état désiré (point fixe ou cycle limite) ;**
- ▶ Contrôle optimal utilisant la méthode LQR.



Axe 3 : Contrôle en boucle fermée basé images

Stratégie

- ▶ Contrôle en boucle fermée basée sur une modèle physique ;
- ▶ Contrôle aux frontières du système ;
- ▶ État de l'écoulement estimé à partir de donnée image ;
- ▶ Écoulement maintenu dans un état désiré (point fixe ou cycle limite) ;
- ▶ **Contrôle optimal utilisant la méthode LQR.**

Minimiser la fonctionnelle de coût suivante

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [\mathbf{X}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{X}(t) + \mathbf{U}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{U}(t)] dt$$

sujette à une contrainte dynamique du 1er ordre.

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t).$$

Définir un retour d'état $\mathbf{U}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{X}(t)$ et résoudre l'équation de Riccati suivante

$$\mathbf{S}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{S} - \mathbf{S}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{S} + \mathbf{Q} = 0$$

Axe 3 : Contrôle en boucle fermée basé images

Un exemple de résultat

Visibilité

Publications

- ⇒ 41 publications in journals or book chapters
- ⇒ 3 books, 63 conferences, workshops

Editorial activity

- ⇒ Associate editors of 4 journals

Funding

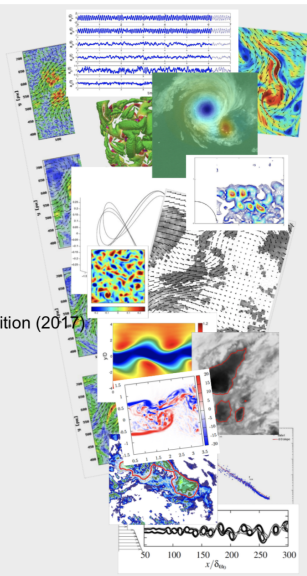
- ⇒ 4 ANR, 1 Carnot, 5 contractual PhD grants
- ⇒ 1 Inter Labex project (Cominlabs, Lebesgue, Mer)
- ⇒ 2 Eu projects

Awards

- ⇒ V. Resseguier, Best PhD award Gamni/SMAI (2017)
- ⇒ J. Erhel, M. Nodet 1er prize Math for Planet Earth Int. competition (2017)

Collaborations

- ⇒ U. Buenos Aires, Chico State U., U. Pisa, Imp. College
- ⇒ ANDRA, CSTB, Ifremer, IFPEN, MeteoFrance
- ⇒ LMD (Ens/Cnrs), Legos (Toulouse), ESPCI (Paris), P' (Poitiers), LIMSI (Paris) CRAN (Nancy), IRCCyN (Nantes), LPO (Brest)
- ⇒ ASPI, Air Sea, PANAMA
- ⇒ Acta (Irstea Rennes), HHLy (Irstea Lyon)



Merci de votre attention