



# MagnetoHydroX

Jean Boisson (IMSIA)

Romain Monchaux (IMSIA)

Sebastien Aumaître (SPHYNX)

École Nationale Supérieure  
de **Techniques Avancées**

**IMSIA**

Institut des Sciences de la Mécanique et Applications Industrielles

**SPHYNX**



**ENSTA**  
ParisTech  
université  
PARIS-SACLAY

## Écoulement de fluides conducteurs : MHD

Navier-Stokes + force de Lorentz :

$$\oplus \quad \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\mu_0 \rho} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \nu \Delta \mathbf{v}$$

Equation d'induction pour le champ magnétique :

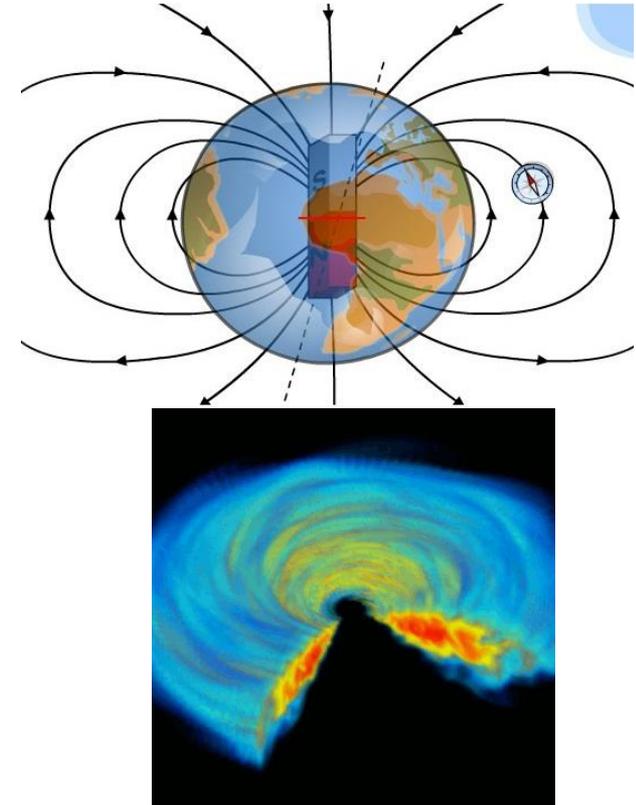
$$\oplus \quad \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \Delta \mathbf{B} \quad \eta = \frac{1}{\sigma \mu}$$

Nombre sans dimension :

$$\oplus \quad \text{Eq. N.S.} \rightarrow Re = \frac{HV}{\nu}$$

$$\oplus \quad \text{Couplage} \rightarrow N = \frac{\text{Lorentz}}{\text{inertie}} \sim \sigma H B^2 / (\rho V)$$

$$\oplus \quad \text{Eq. Induction} \rightarrow R_m = \frac{\text{advection } B}{\text{diffusion } B} \sim \mu \sigma V H, R_m \gg 1 \rightarrow \text{champ } \mathbf{B} \text{ gelé}$$



Pompes électromagnétiques :  $\mathbf{B} \& \mathbf{J} \rightarrow \mathbf{V}$

1

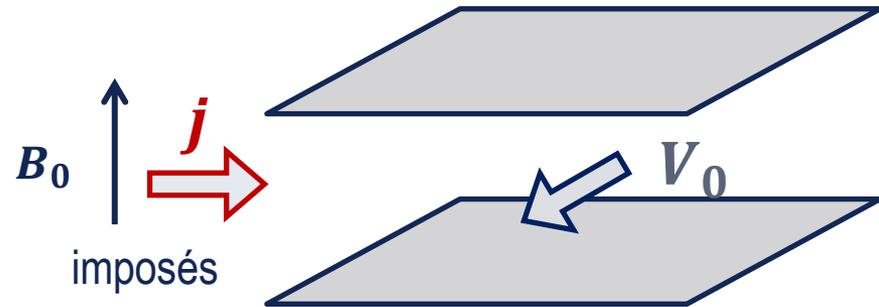
Dynamo  $\mathbf{V} \rightarrow \mathbf{B} \& \mathbf{J}$

$R_m$

## Écoulement de fluides conducteurs : MHD

Rôle de la Force de Lorentz :  $\mathbf{F} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}_0$ ,

⊕ Géométrie du forçage :  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{B}_0$  or  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}_0$  ?



### Exemple : Couches limites d'Hartmann

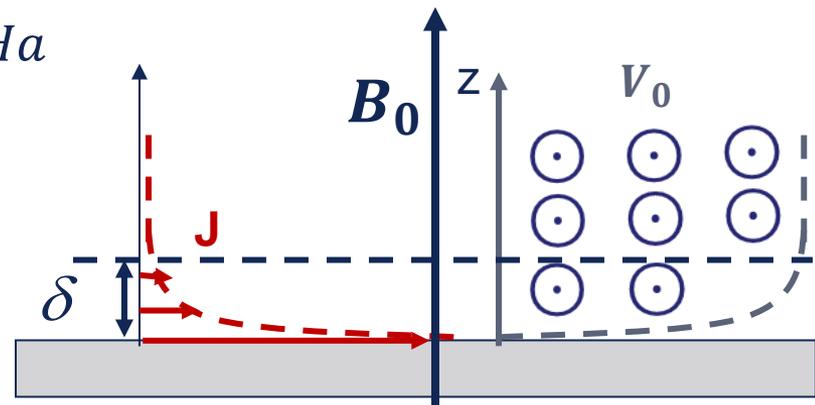
⊕ Inertie  $\ll$  Viscosité

⊕ Bulk : courant induit s'oppose au courant imposé  $\Rightarrow$  pas de forçage?

⊕ Couches limites: pas d'écoulement  $\Rightarrow$  courant de surface

⊕ Couches d'Hartmann :  $\delta_H = \frac{1}{B_0} \sqrt{\frac{\rho \nu}{\sigma}} = H/Ha$

⊕ Nombre d'Hartmann :  $M = HB_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}}$



Geométrie du forçage depend de  $B_0$

# Magnetocouette : un dispositif classique

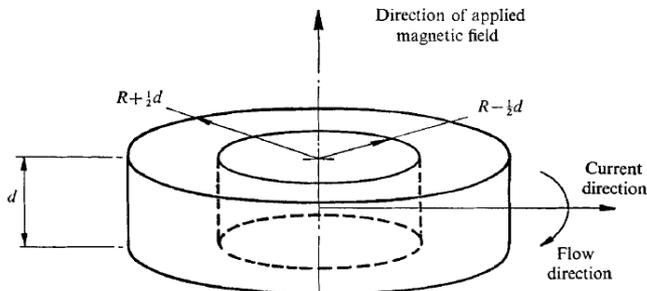
⊕ Idée : Dispositif de Taylor-couette + forçage de Lorentz ~ pompe électromagnétique

Forçage mécanique sur le cylindre intérieur  $\Leftrightarrow$  Forçage EM:  $F = J \times B_0$

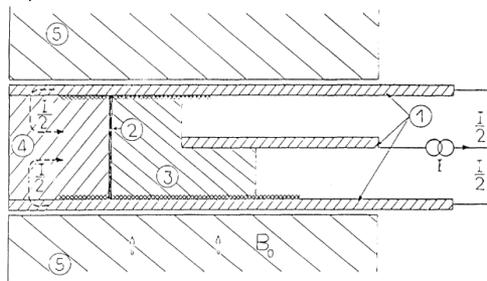
Apparition d'instabilités ?

Efficacité du forçage de Lorentz ?

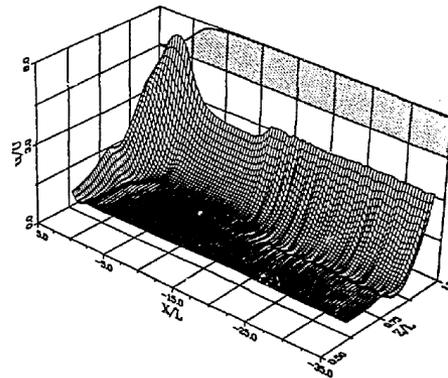
Régimes d'écoulements particuliers ?



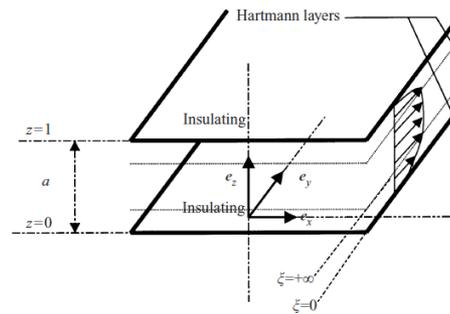
Baylis, JFM 1971



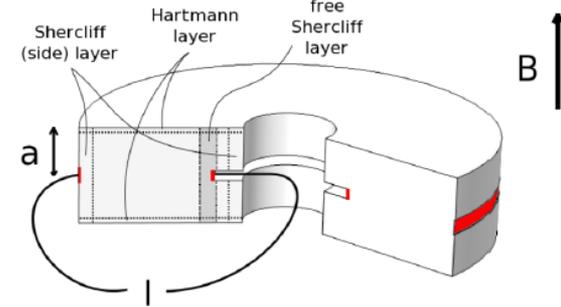
P. Tabeling, Phys. Rev. Lett., 1982



Reed, Fusion Techno., 1988



Potherat, JFM, 2000



Stelzer, PoF, 2015



Boisson, PoF 2012, JFM 2016?

## Expériences:

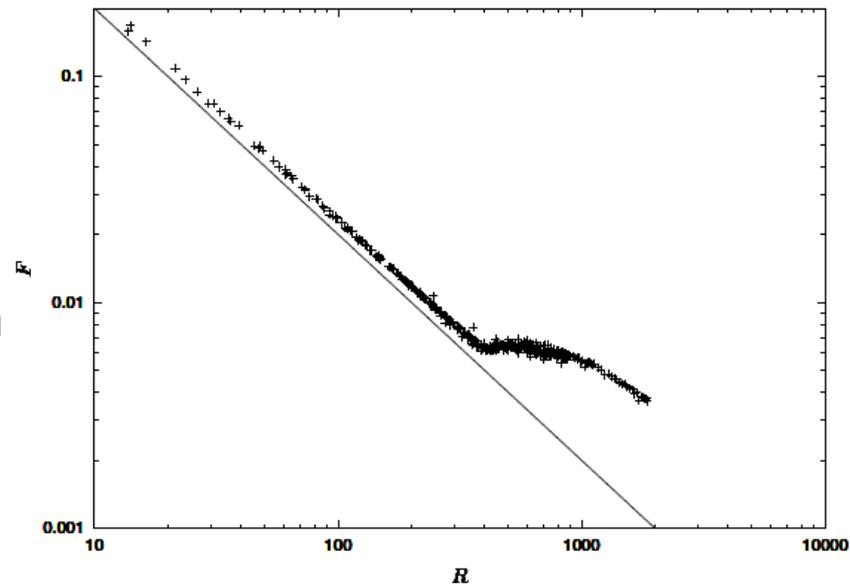
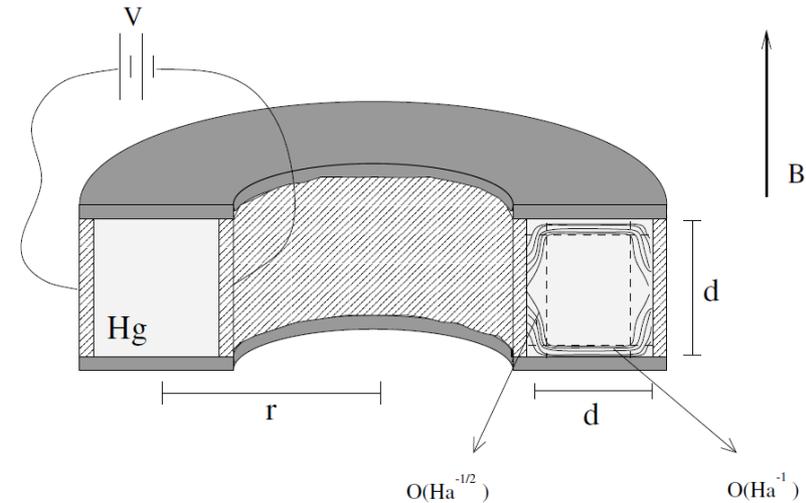
Géométrie très 'classique' expérimentalement :

- ⊕ Pompe électromagnétique
- ⊕ Fort champ :  $B_{max} = 10 T$
- ⊕ Fort courant :  $I_{max} = 1000 A$
- ⊕ Aspect ratio :  $\frac{h}{\Delta r} = 1$

**Transition à la turbulence →**

**Instabilité des couches d'Hartmann**

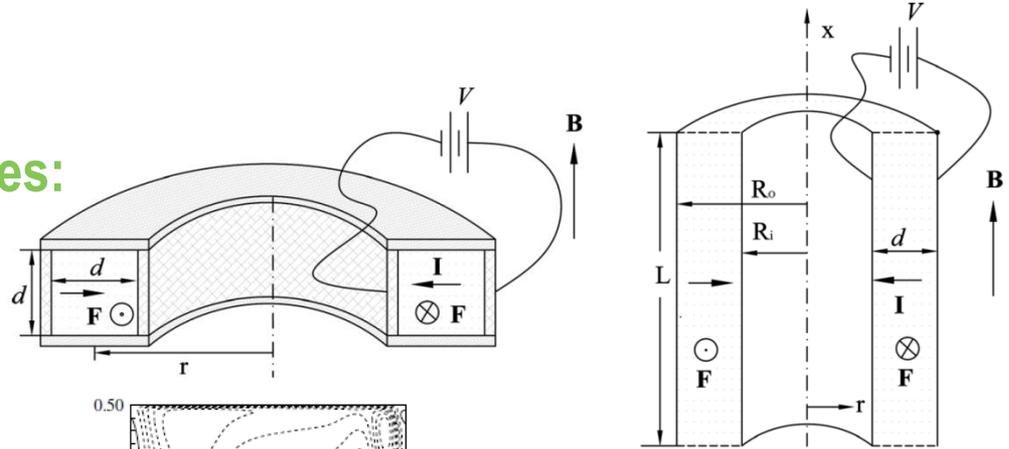
- ⊕ Coefficient de friction → mesure de potentiel
- $$V = R(\bar{v})I$$



*P. Moresco and T. Alboussière, J. Fluid. Mech., 2004*

D'autres mesures possibles?

Etudes Numériques:



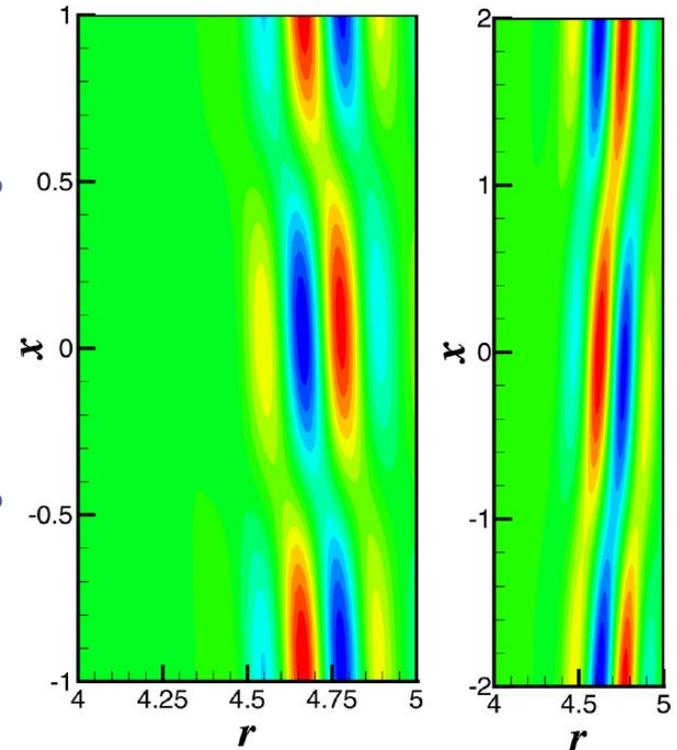
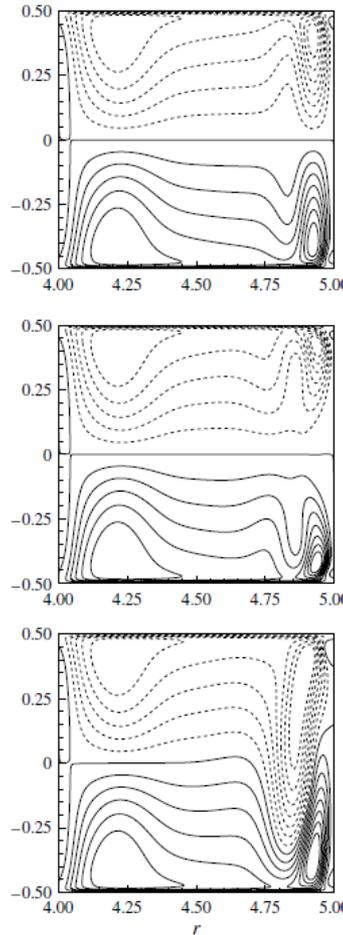
Géométrie 'classique' numériquement:

+ 2 rapports d'aspect :  $\frac{h}{\Delta r} = 1$  et  $\gg 1$

+ Modes instables :

+ Excursion  $\rightarrow \frac{h}{\Delta r} = 1$

+ Rouleaux inclinés  $\rightarrow \frac{h}{\Delta r} > 1$

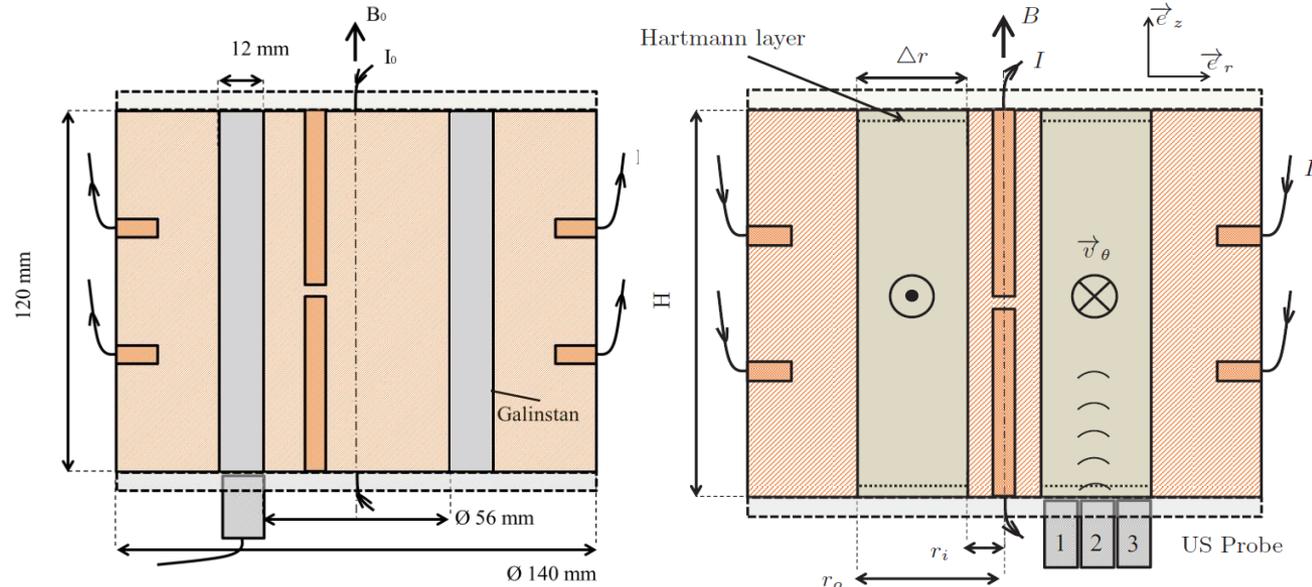
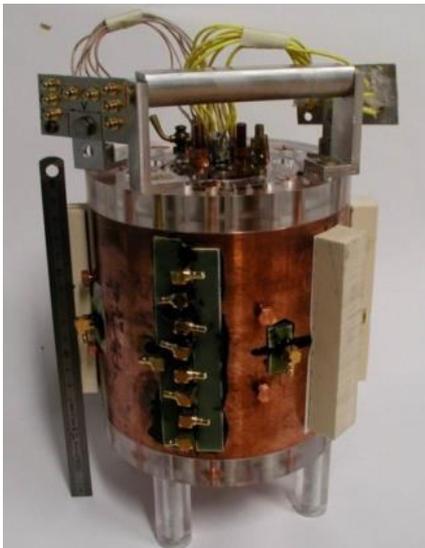


Zhao et al, PoF 2011  
 Zhao et al, JFM 2012

# Expérience développée à l'IMSIA : Magnetocouette

## Expériences

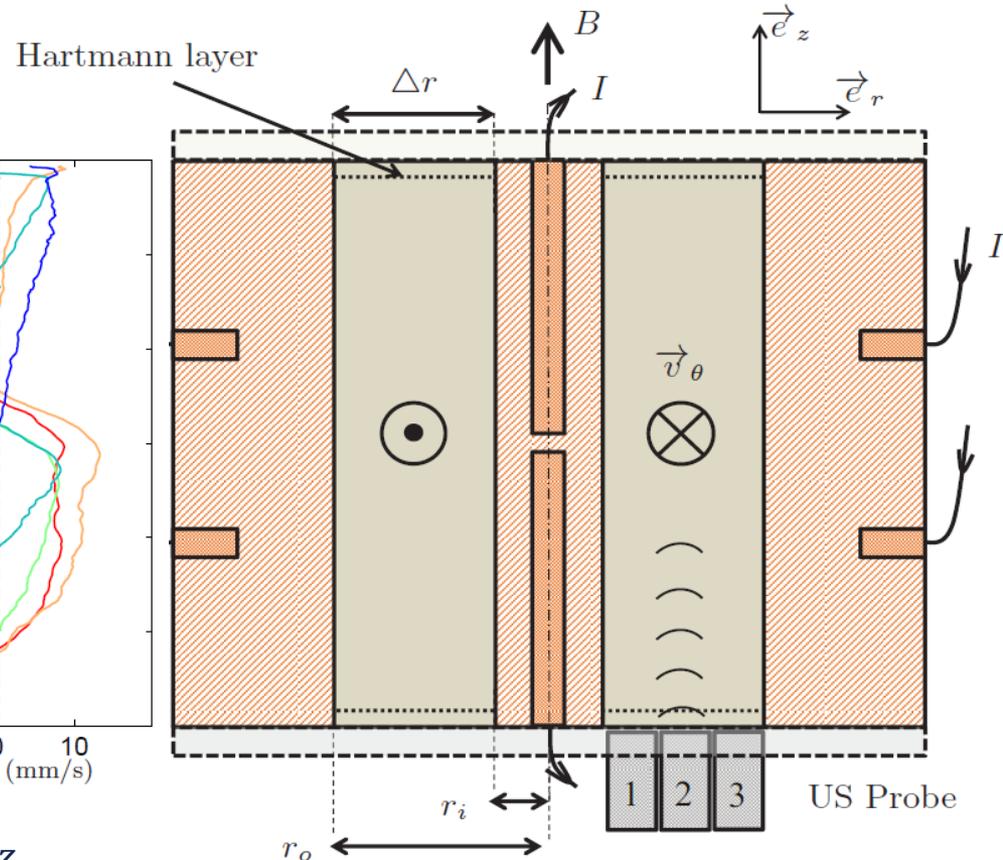
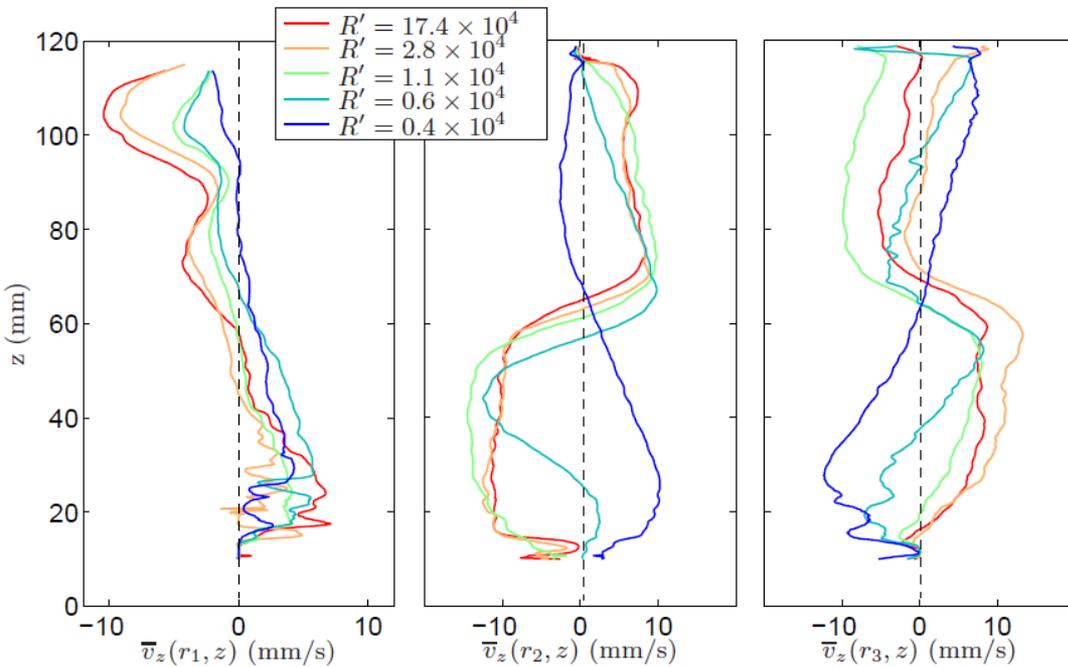
- + Configuration : électrodes cylindriques co-axiale, 2 rapports d'aspect :  $\frac{h}{\Delta r} = 4, 12$
- + Fluide : Galinstan (Ga In Sn)
- + Courant radial  $I_0$  en champ magnétique axial  $B_0 \rightarrow$  Forçage azimuthal
- + Mesures : Sondes ultrasonores (axiales à 3  $\neq$  rayons avec  $0^\circ$  &  $5^\circ$  axe vertical)
- +  $I_0 < 100 A$  ;  $B_0 < 0,16 T$
- +  $V_\theta \sim \text{few cm.s}^{-1}$



# Qu'est ce qu'on mesure?

## Expériences

- + Potentiel électrique local, global
- + Temps de vol de particules en suspension :
- +  $V_{sonde}(z_{sonde})$



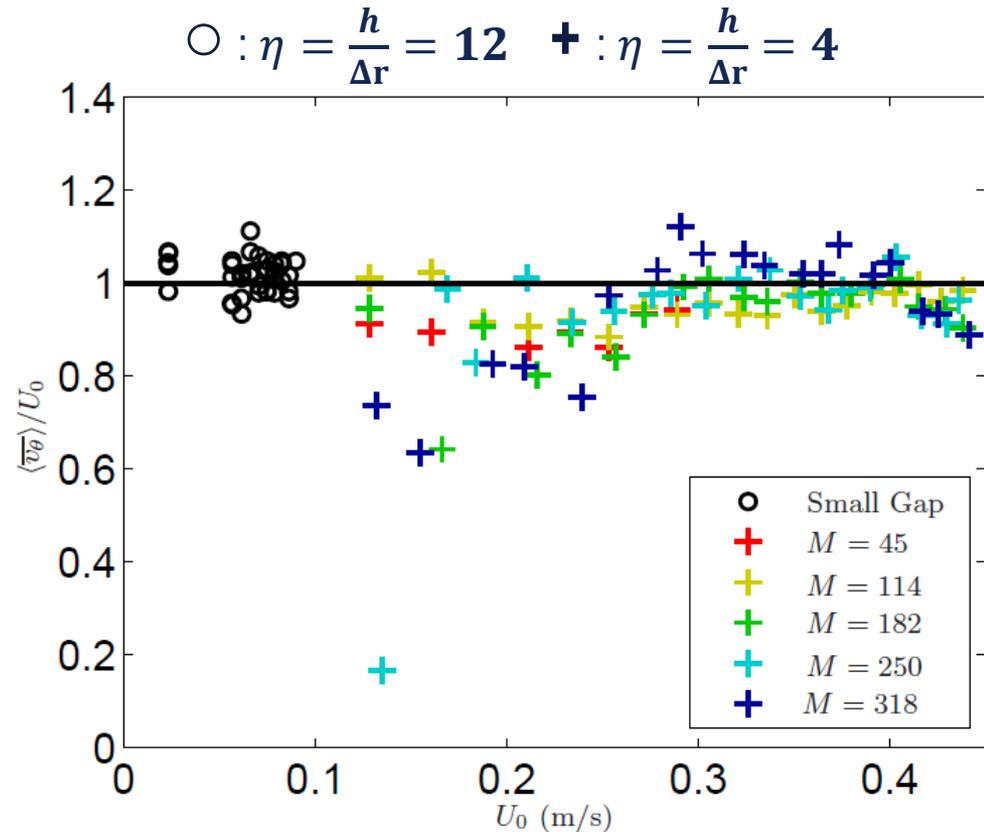
- + Projection de cellules de recirculation sur  $\vec{e}_z$
- + Interprétation des résultats...

## Paramètres de contrôle.

$$\oplus \frac{\text{inertie}}{\text{viscosité}} = \frac{Re^2}{M^4} \times \frac{H^4}{16\Delta r^2 \bar{r}^2} \gg 1$$

$$\oplus \frac{\text{advection}}{\text{Lorentz}} \rightarrow V_{\theta}^{scale}$$

$$\oplus V_{\theta}^{scale} \approx 2.1 \sqrt{\left(\frac{IB_0 \Delta r}{r_1 r_2 \rho}\right)}$$

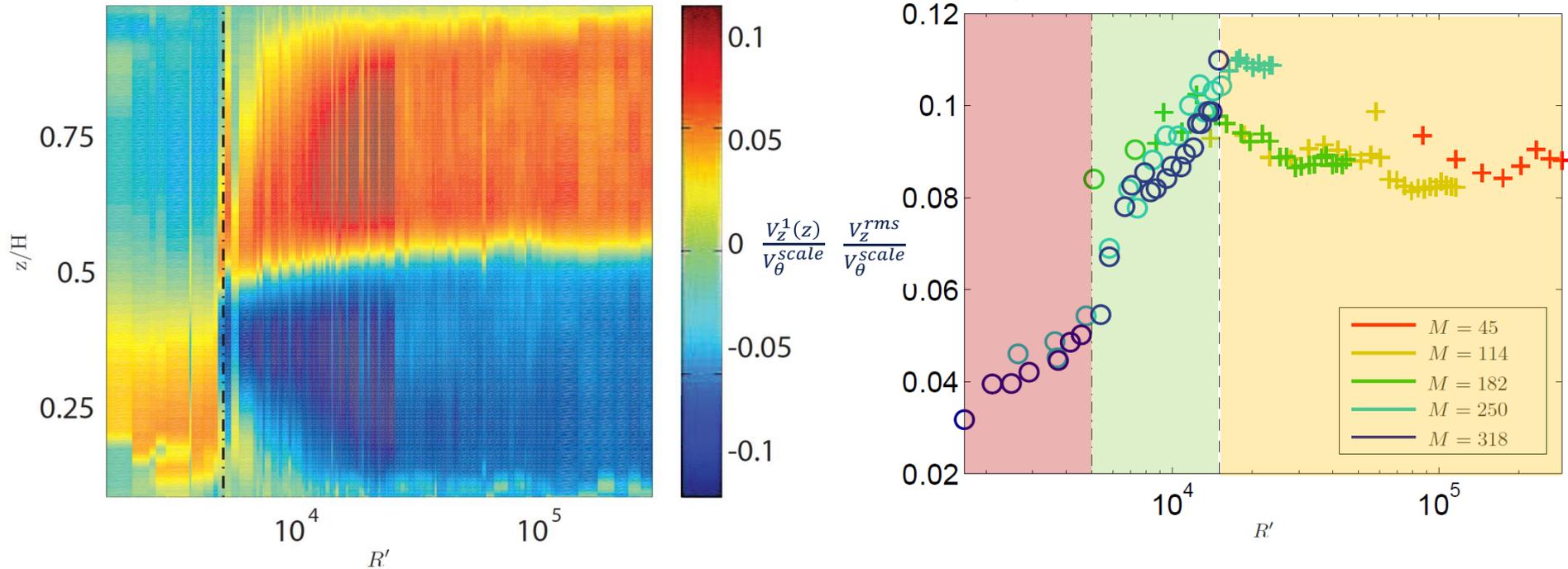


⊕ On détermine une longueur magnétique inertielle  $H'$  qui contrôle les gradients de vitesse:

$$\oplus H' \sim \frac{1}{\sigma B^2} \sqrt{\frac{\rho I \Delta r}{r_1 r_2}}$$

ainsi que  $R'$  le nombre de Reynolds

## Configuration des régimes d'écoulement secondaire

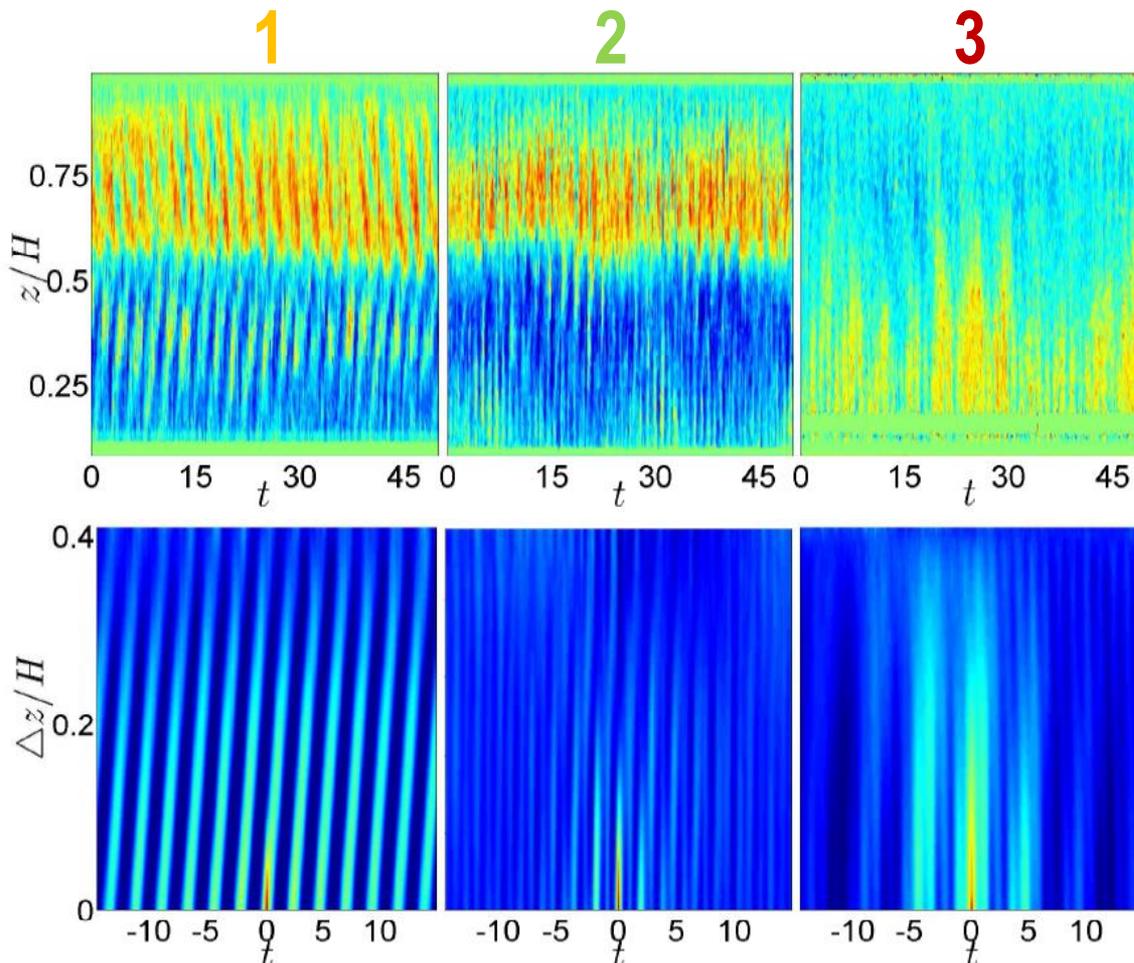


- ⊕  $\frac{V_z(z)}{V_\theta^{scale}}$  dans le plan  $(R', z/H)$ : Changement de signe de la recirculation à  $R' \approx 0.5 \times 10^4$   
Amplitude Maximum à  $R' \approx 1.5 \times 10^4$

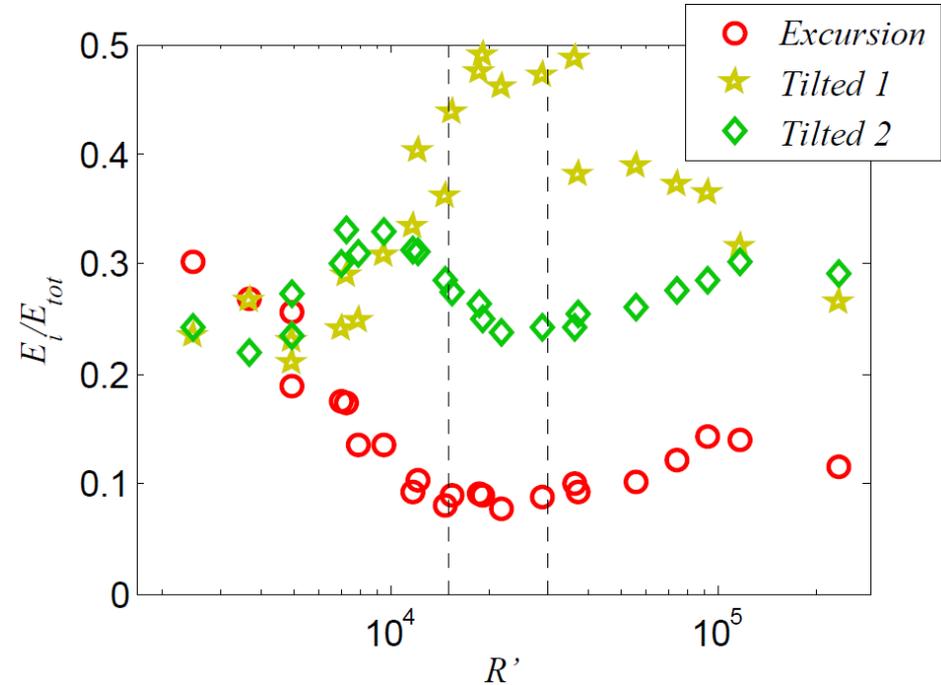
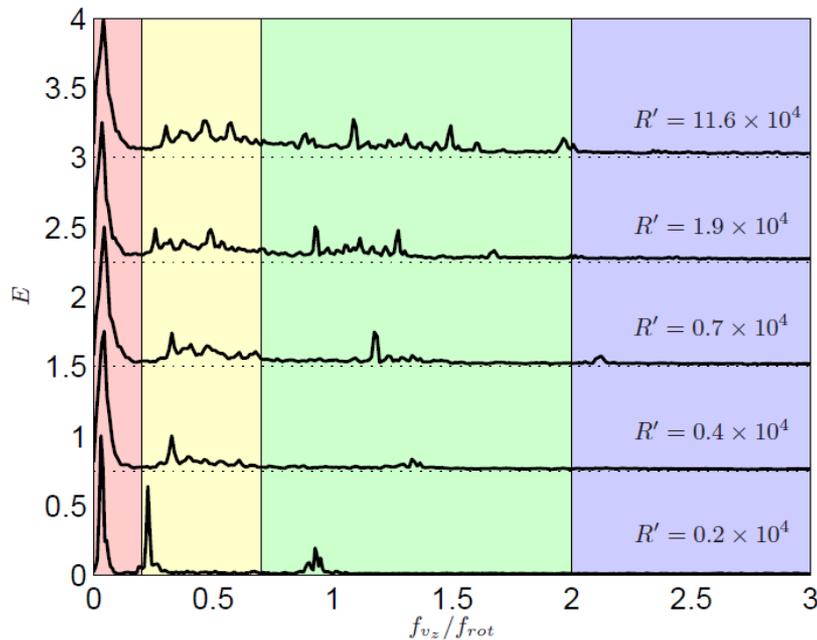
- ⊕  $R', H'$  paramètres de contrôle
- ⊕ 3 comportements différents : Fort/faible écoulement secondaire 1 / 2, 3  
Sens de recirculation 1, 2 / 3

## Origine des changements de régimes

- ⊕ La dynamique des modes d'écoulement à l'origine du comportement moyen.



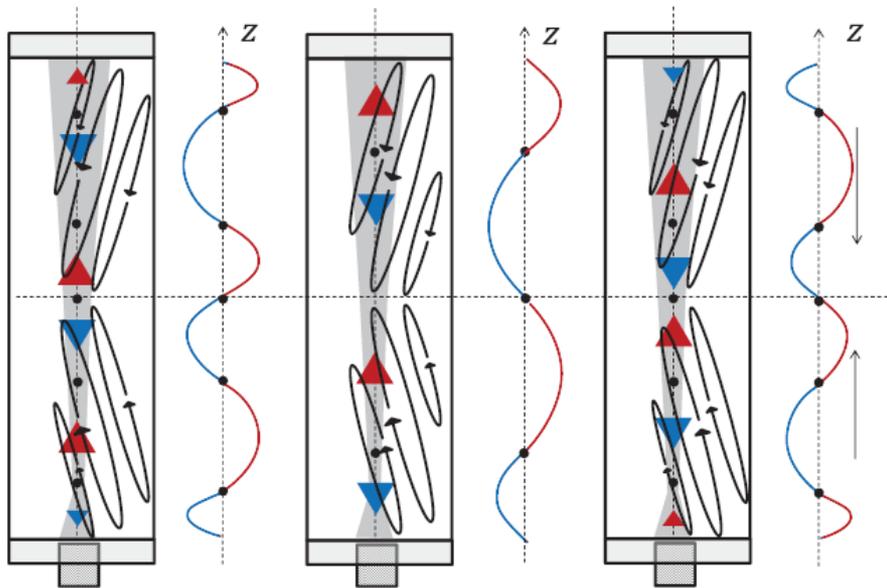
## Analyse spectrale



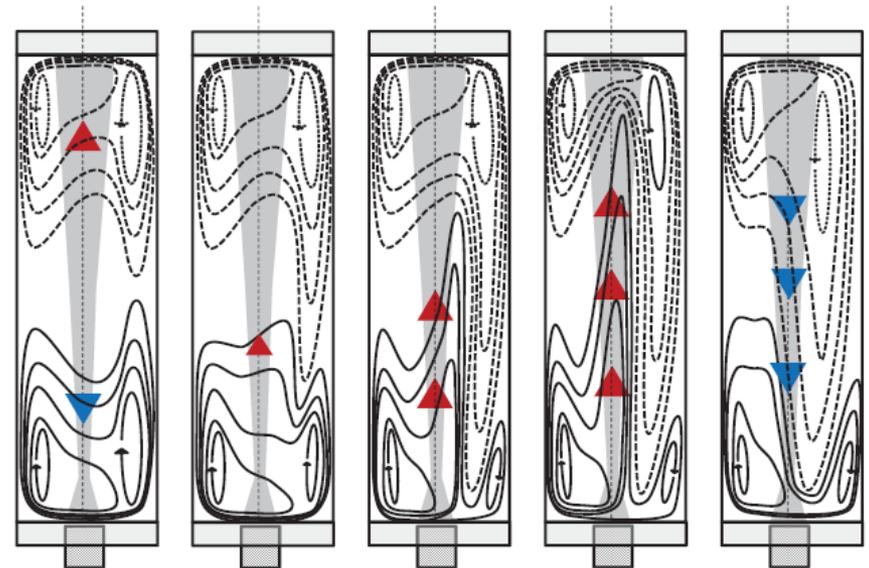
- ⊕ Identification et extraction des énergies du spectre
- ⊕ Confirmation de l'existence de 2 régimes dynamiques :
  - ⊕ Recirculations inclinées (Tilted)  $f \sim 0.5 f_{rot}$
  - ⊕ Excursion  $f \ll f_{rot}$

## Topologie complète des modes

Tilted

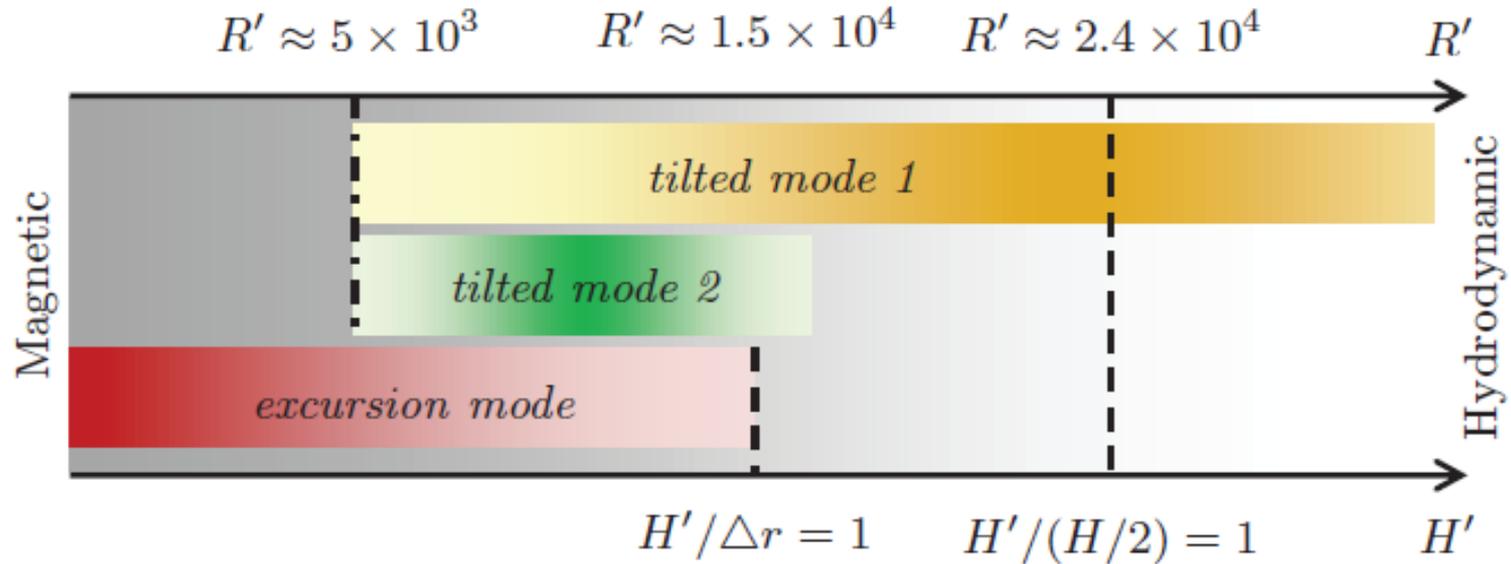


Excursion



- + Tilted : modes observés par Zhao et al (2011) en section rectangulaire élancée
- + Excursions : modes observés par Zhao et al (2012) en section carrée
- +  $H'$  : Longueur caractéristique qui se compare à la géométrie du système.

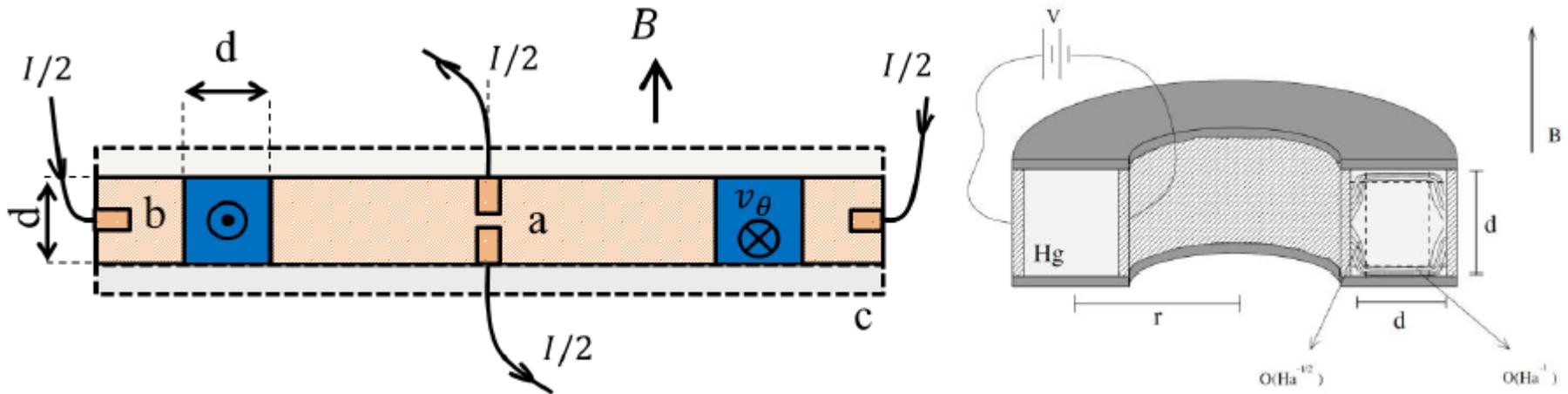
## Transition entre les régimes



- ⊕  $H'$  Longueur caractéristique des gradients de vitesse et  $R'$  le Reynolds associés
- ⊕  $H'$  pilote la transition entre les régimes
- ⊕  $H' < \Delta r$  géométrie carrée
- ⊕  $H' > \Delta r$  géométrie élancée (max pour  $H' \sim H/2$ )

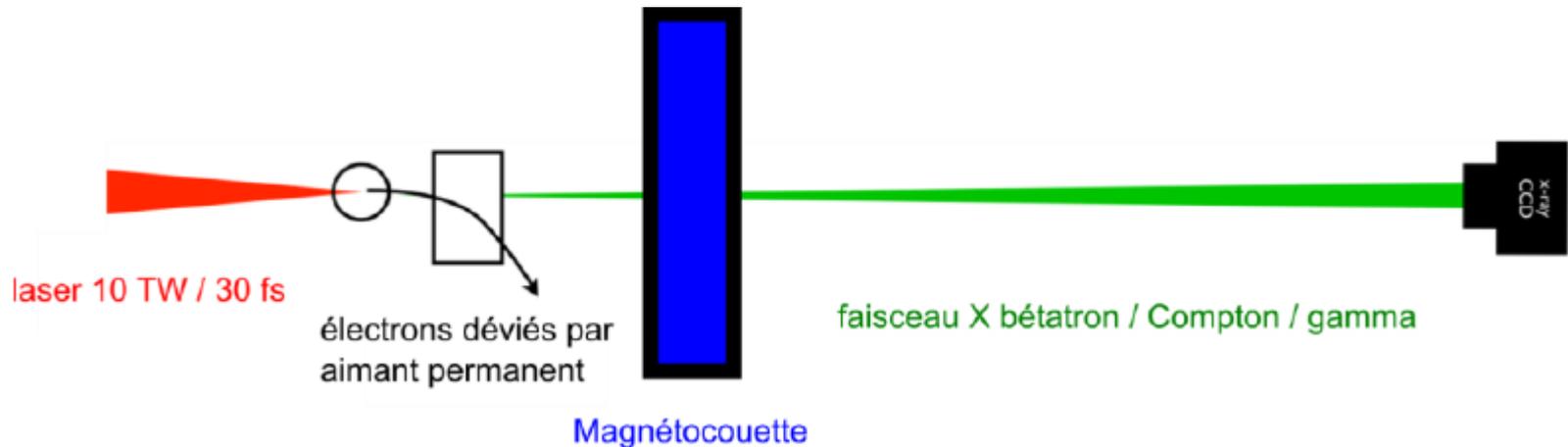
## Amélioration des mesures des écoulements de métaux liquides

- ⊕ A l'heure actuelle: mesures indirectes (potentielles) ou incomplètes (ultrason)
- ⊕ Instabilités des écoulements de fluides conducteurs pas encore très bien connues
- ⊕ Impliqués dans les réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération
- ⊕ Impliqués dans ITER...
- ⊕ Attente d'une avancée dans les méthodes de mesure : MagnetohydroX
- ⊕ Mise en place d'un dispositif bien connu : annulaire à section carrée



## Amélioration des mesures des écoulements de métaux liquides

- + Émission rayons X
- + Imagerie par transmission (particules en suspension, fluctuations de densité)
- + Cohérence de phase
- + Reconstruction de l'écoulement



- + Projet articulé entre l'IMSIA, du laboratoire d'Optique Appliqué (LOA) et SourceLab (startup)
- + Besoin de partenaires supplémentaires/différents pour partie rayons X

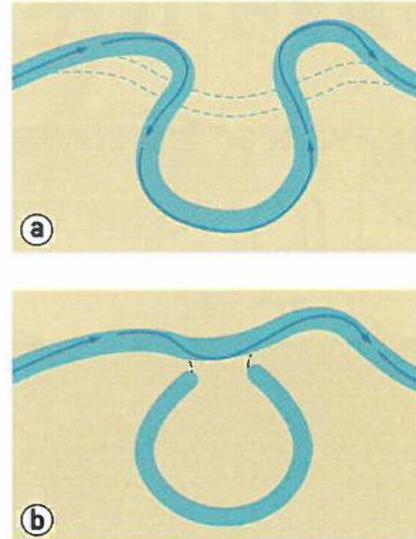
## Conclusion et perspectives

- ⊕ Ecoulement de liquide conducteur impliqué dans de nombreuses applications (4<sup>ème</sup> génération, ITER, production aluminium,...)
- ⊕ Instabilité et turbulence assez bien compris mais limité par les moyens expérimentaux
- ⊕ Mis en évidence le besoin d'un nouveau type de mesure d'écoulement
  
- ⊕ Imagerie par rayons X?
- ⊕ Radioactive particule tracking?
  
- ⊕ Test sur une expérience modèle développer au sein de l'IMSIA
- ⊕ Besoin de partenaires pour la solution X

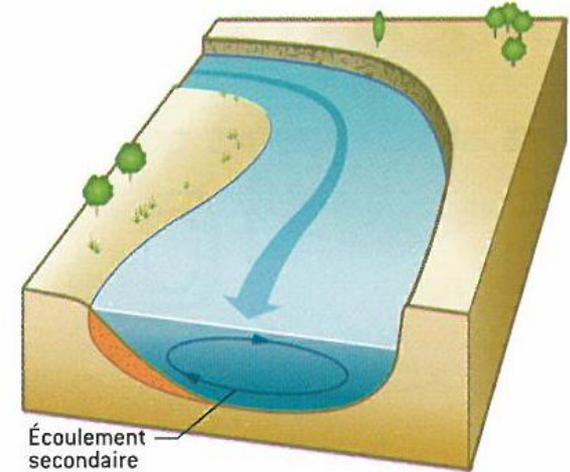
Thank you



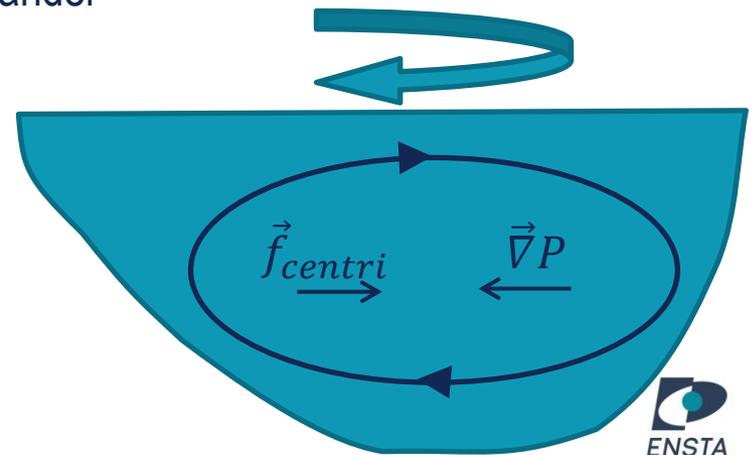
## Origin of river meanders



Isolation of a meander



Secondary flow in a meander



- ⊕ Mechanism :
- ⊕  $\nabla \cdot P \propto f_{centri}$
- ⊕ except in the bottom boundary layer.
- ⊕ Inward flow at the bottom, outward flow at the surface
- ⊕ Erode the concave bank meanders
- ⊕  $V_{theta} = (v_1 - v_2) / \sin\theta$