

# Instabilités et sources locales de turbulence dans les disques d'accrétion

Geoffroy Lesur

Laboratoire d'AstrOphysique de Grenoble  
Université Joseph Fourier

Soutenance de Thèse du 7 Juin 2007



# Sommaire

- 1 Le transport dans les disques d'accrétion
- 2 Instabilité Sous-Critique
- 3 Instabilité Strato-Rotationnelle
- 4 Instabilité Magnéto-Rotationnelle
- 5 Conclusions et perspectives



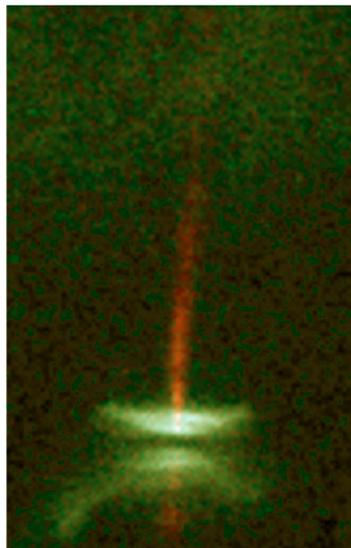
# Comment les disques d'accrétion accrètent-ils ?

- Disques formés autour d'étoiles jeunes et d'objets compacts
- L'accrétion (chute de la matière vers l'objet central) implique une perte de moment cinétique
- *Mécanisme d'extraction du moment cinétique ?*

## Première idée : viscosité moléculaire

Efficacité beaucoup trop faible ( $< 10^{-10}$ ) pour expliquer les observations (variabilité, taux d'accrétion)

*Autre mécanisme ?*



# Mécanisme d'extraction du moment cinétique (1)

## Turbulence locale

- Suggéré initialement par Shakura & Sunyaev (1973)
- Mouvements turbulents engendrent un transport accru
- Définition d'une viscosité turbulente  $\nu_t$

$$\nu_t = \alpha c_s H \quad 10^{-3} < \alpha < 1$$

## Ondes globales

- Ondes globales transportent le moment cinétique vers l'extérieur
- Nécessitent une instabilité globale ou une source d'excitation (système binaire ...)

# Mécanisme d'extraction du moment cinétique (1)

## Turbulence locale

- Suggéré initialement par Shakura & Sunyaev (1973)
- Mouvements turbulents engendrent un transport accru
- Définition d'une viscosité turbulente  $\nu_t$

$$\nu_t = \alpha c_s H \quad 10^{-3} < \alpha < 1$$

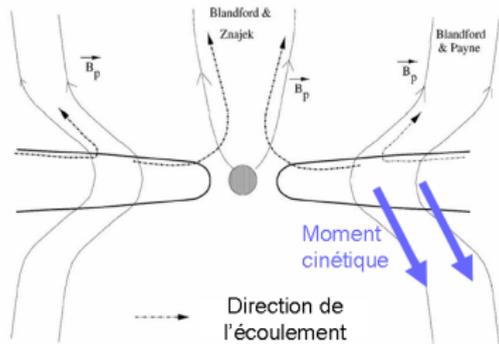
## Ondes globales

- Ondes globales transportent le moment cinétique vers l'extérieur
- Nécessitent une instabilité globale ou une source d'excitation (système binaire ...)

# Mécanismes d'extraction du moment cinétique (2)

## Jets

- Moment cinétique extrait du disque par un jet
- Les modèles d'accrétion-éjection nécessitent de la turbulence locale (Ferreira & Pelletier 1995, Li 1996)

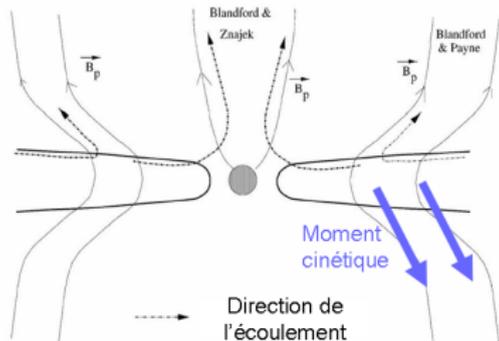


*Les mécanismes d'extraction nécessitent une quantification précise de la turbulence locale*

# Mécanismes d'extraction du moment cinétique (2)

## Jets

- Moment cinétique extrait du disque par un jet
- Les modèles d'accrétion-éjection nécessitent de la turbulence locale (Ferreira & Pelletier 1995, Li 1996)



*Les mécanismes d'extraction nécessitent une quantification précise de la turbulence locale*

# Différentes sources de turbulence dans les disques

## Instabilité MHD

- Instabilité Magnéto-Rotationnelle : Semble efficace *mais* nécessite un couplage avec le champ magnétique. [Discutée ici](#)

## Instabilité hydrodynamique

Cas de disques peu couplés avec le champ magnétique : pas de MRI

- Instabilité Sous-Critique : Instabilité non linéaire, déclenchée par une perturbation d'amplitude finie. [Discutée ici](#)
- Instabilité Convective : Instabilité thermique verticale. **Transport vers l'intérieur** (Cabot 1996, Stone & Balbus 1996)
- Instabilité Strato-Rotationnelle : Instabilité linéaire en présence de stratification verticale et de rotation stabilisantes. [Discutée ici](#)

# Différentes sources de turbulence dans les disques

## Instabilité MHD

- Instabilité Magnéto-Rotationnelle : Semble efficace *mais* nécessite un couplage avec le champ magnétique. [Discutée ici](#)

## Instabilité hydrodynamique

Cas de disques peu couplés avec le champ magnétique : pas de MRI

- Instabilité Sous-Critique : Instabilité non linéaire, déclenchée par une perturbation d'amplitude finie. [Discutée ici](#)
- Instabilité Convective : Instabilité thermique verticale. [Transport vers l'intérieur](#) (Cabot 1996, Stone & Balbus 1996)
- Instabilité Strato-Rotationnelle : Instabilité linéaire en présence de stratification verticale et de rotation stabilisantes. [Discutée ici](#)

# Différentes sources de turbulence dans les disques

## Instabilité MHD

- Instabilité Magnéto-Rotationnelle : Semble efficace *mais* nécessite un couplage avec le champ magnétique. [Discutée ici](#)

## Instabilité hydrodynamique

Cas de disques peu couplés avec le champ magnétique : pas de MRI

- Instabilité Sous-Critique : Instabilité non linéaire, déclenchée par une perturbation d'amplitude finie. [Discutée ici](#)
- Instabilité Convective : Instabilité thermique verticale. **Transport vers l'intérieur** (Cabot 1996, Stone & Balbus 1996)
- Instabilité Strato-Rotationnelle : Instabilité linéaire en présence de stratification verticale et de rotation stabilisantes. [Discutée ici](#)

# Différentes sources de turbulence dans les disques

## Instabilité MHD

- Instabilité Magnéto-Rotationnelle : Semble efficace *mais* nécessite un couplage avec le champ magnétique. [Discutée ici](#)

## Instabilité hydrodynamique

Cas de disques peu couplés avec le champ magnétique : pas de MRI

- Instabilité Sous-Critique : Instabilité non linéaire, déclenchée par une perturbation d'amplitude finie. [Discutée ici](#)
- Instabilité Convective : Instabilité thermique verticale. [Transport vers l'intérieur](#) (Cabot 1996, Stone & Balbus 1996)
- Instabilité Strato-Rotationnelle : Instabilité linéaire en présence de stratification verticale et de rotation stabilisantes. [Discutée ici](#)

# Différentes sources de turbulence dans les disques

## Instabilité MHD

- Instabilité Magnéto-Rotationnelle : Semble efficace *mais* nécessite un couplage avec le champ magnétique. [Discutée ici](#)

## Instabilité hydrodynamique

Cas de disques peu couplés avec le champ magnétique : pas de MRI

- Instabilité Sous-Critique : Instabilité non linéaire, déclenchée par une perturbation d'amplitude finie. [Discutée ici](#)
- Instabilité Convective : Instabilité thermique verticale. **Transport vers l'intérieur** (Cabot 1996, Stone & Balbus 1996)
- Instabilité Strato-Rotationnelle : Instabilité linéaire en présence de stratification verticale et de rotation stabilisantes. [Discutée ici](#)

# Différentes sources de turbulence dans les disques

## Instabilité MHD

- Instabilité Magnéto-Rotationnelle : Semble efficace *mais* nécessite un couplage avec le champ magnétique. [Discutée ici](#)

## Instabilité hydrodynamique

Cas de disques peu couplés avec le champ magnétique : pas de MRI

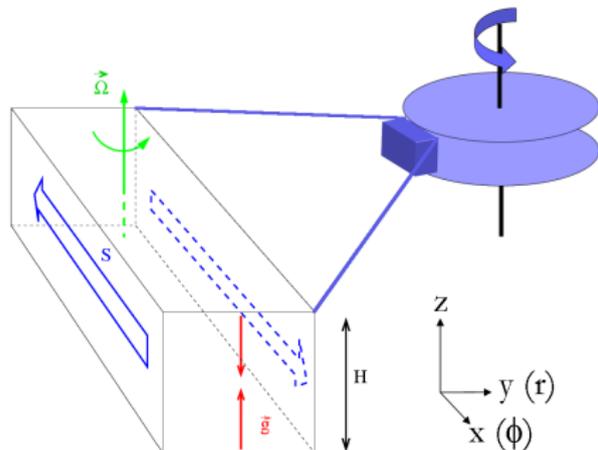
- Instabilité Sous-Critique : Instabilité non linéaire, déclenchée par une perturbation d'amplitude finie. [Discutée ici](#)
- Instabilité Convective : Instabilité thermique verticale. **Transport vers l'intérieur** (Cabot 1996, Stone & Balbus 1996)
- Instabilité Strato-Rotationnelle : Instabilité linéaire en présence de stratification verticale et de rotation stabilisantes. [Discutée ici](#)

# Écoulement prototype

Approximation de Hill

Effets physiques fondamentaux :

- Cisaillement  $S \equiv \frac{d\bar{U}_x}{dy}$
- Rotation  $\Omega$
- Stratification verticale  $g_z$
- Champ magnétique  $B$
- Dissipation
  - Viscosité moléculaire  $\nu$
  - Résistivité moléculaire  $\eta$



Mesure de l'efficacité de la turbulence avec  $\alpha$  défini par :

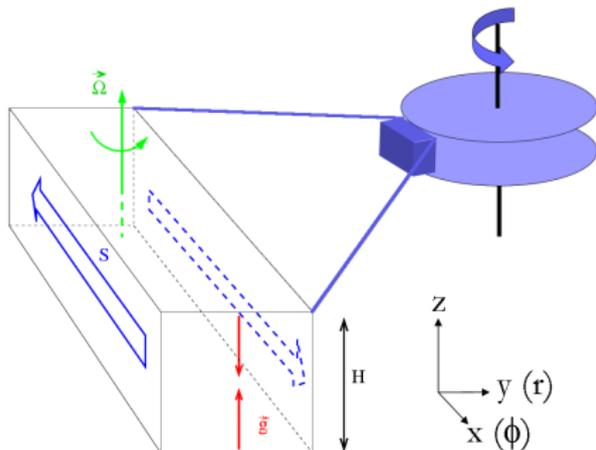
$$\alpha = \frac{\langle B_x B_y \rangle / 4\pi\rho - \langle V_x V_y \rangle}{S^2 H^2}$$

# Écoulement prototype

Approximation de Hill

Effets physiques fondamentaux :

- Cisaillement  $S \equiv \frac{d\bar{U}_x}{dy}$
- Rotation  $\Omega$
- Stratification verticale  $g_z$
- Champ magnétique  $B$
- Dissipation
  - Viscosité moléculaire  $\nu$
  - Résistivité moléculaire  $\eta$



Mesure de l'efficacité de la turbulence avec  $\alpha$  défini par :

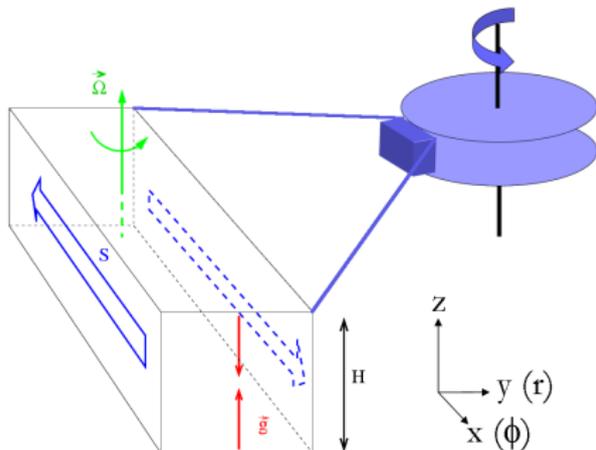
$$\alpha = \frac{\langle B_x B_y \rangle / 4\pi\rho - \langle V_x V_y \rangle}{S^2 H^2}$$

# Écoulement prototype

Approximation de Hill

Effets physiques fondamentaux :

- Cisaillement  $S \equiv \frac{d\bar{U}_x}{dy}$
- Rotation  $\Omega$
- Stratification verticale  $g_z$
- Champ magnétique  $B$
- Dissipation
  - Viscosité moléculaire  $\nu$
  - Résistivité moléculaire  $\eta$



Mesure de l'efficacité de la turbulence avec  $\alpha$  défini par :

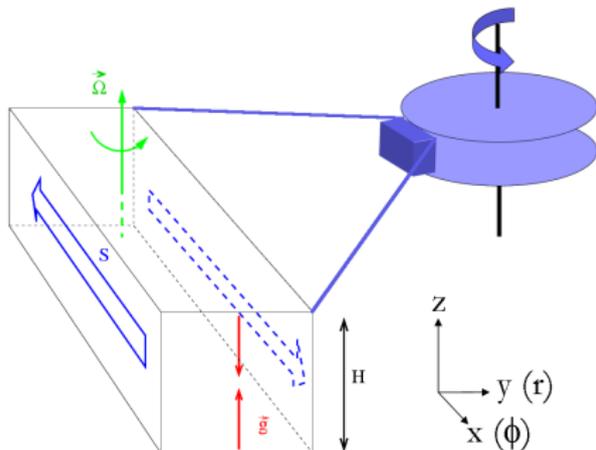
$$\alpha = \frac{\langle B_x B_y \rangle / 4\pi\rho - \langle V_x V_y \rangle}{S^2 H^2}$$

# Écoulement prototype

Approximation de Hill

Effets physiques fondamentaux :

- Cisaillement  $S \equiv \frac{d\bar{U}_x}{dy}$
- Rotation  $\Omega$
- Stratification verticale  $g_z$
- Champ magnétique  $B$
- Dissipation
  - Viscosité moléculaire  $\nu$
  - Résistivité moléculaire  $\eta$



Mesure de l'efficacité de la turbulence avec  $\alpha$  défini par :

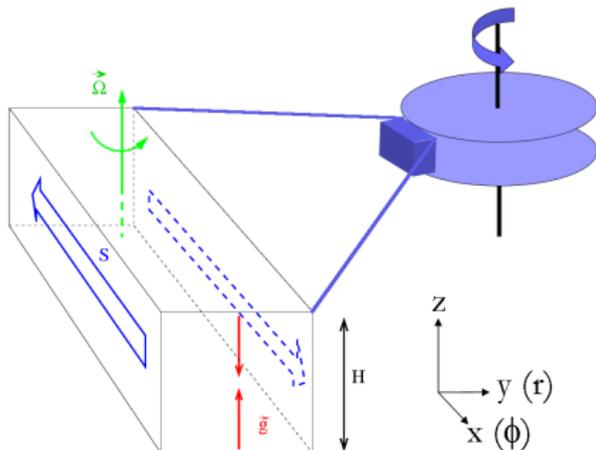
$$\alpha = \frac{\langle B_x B_y \rangle / 4\pi\rho - \langle V_x V_y \rangle}{S^2 H^2}$$

# Écoulement prototype

Approximation de Hill

Effets physiques fondamentaux :

- Cisaillement  $S \equiv \frac{d\bar{U}_x}{dy}$
- Rotation  $\Omega$
- Stratification verticale  $g_z$
- Champ magnétique  $B$
- Dissipation
  - Viscosité moléculaire  $\nu$
  - Résistivité moléculaire  $\eta$



Mesure de l'efficacité de la turbulence avec  $\alpha$  défini par :

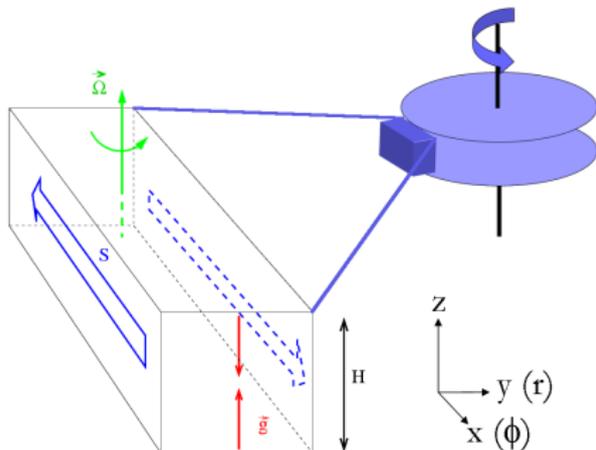
$$\alpha = \frac{\langle B_x B_y \rangle / 4\pi\rho - \langle V_x V_y \rangle}{S^2 H^2}$$

# Écoulement prototype

Approximation de Hill

Effets physiques fondamentaux :

- Cisaillement  $S \equiv \frac{d\bar{U}_x}{dy}$
- Rotation  $\Omega$
- Stratification verticale  $g_z$
- Champ magnétique  $B$
- Dissipation
  - Viscosité moléculaire  $\nu$
  - Résistivité moléculaire  $\eta$



Mesure de l'efficacité de la turbulence avec  $\alpha$  défini par :

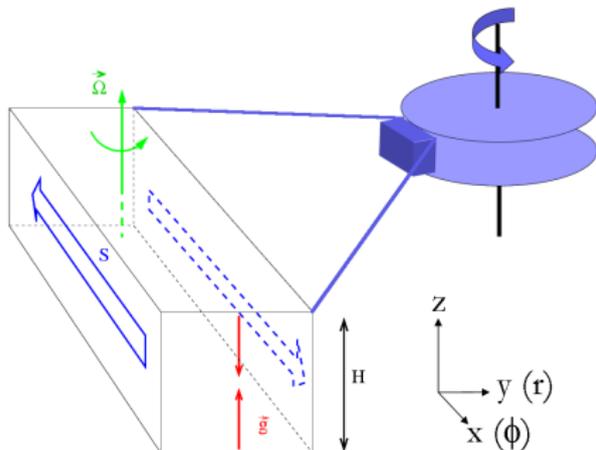
$$\alpha = \frac{\langle B_x B_y \rangle / 4\pi\rho - \langle V_x V_y \rangle}{S^2 H^2}$$

# Écoulement prototype

Approximation de Hill

Effets physiques fondamentaux :

- Cisaillement  $S \equiv \frac{d\bar{U}_x}{dy}$
- Rotation  $\Omega$
- Stratification verticale  $g_z$
- Champ magnétique  $B$
- Dissipation
  - Viscosité moléculaire  $\nu$
  - Résistivité moléculaire  $\eta$



Mesure de l'efficacité de la turbulence avec  $\alpha$  défini par :

$$\alpha = \frac{\langle B_x B_y \rangle / 4\pi\rho - \langle V_x V_y \rangle}{S^2 H^2}$$

# Méthodes numériques

## Codes numériques

- Code Spectral (Fourier), 3D, MHD, incompressible
  - Conditions aux limites périodiques ( $z, \phi$ ) et shearing-sheet ( $r$ )
  - Viscosité et résistivité physiques explicites
  - Quantification et contrôle de la dissipation numérique (<3% dissipation totale)
  - Parallélisation MPI
  
- Code aux différences finies MHD d'ordre 4
  - Conditions aux limites radiales quelconques
  - Effets de compressibilité
  - Stratification verticale possible
  - Parallélisation MPI

# Méthodes numériques

## Codes numériques

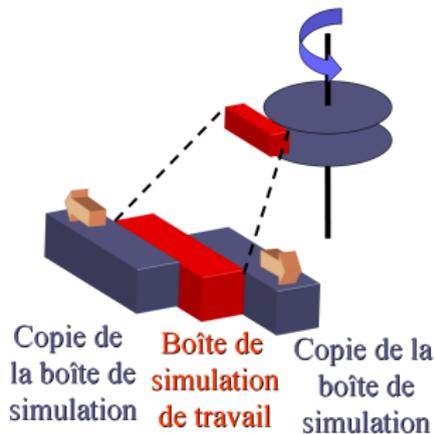
- **Code Spectral (Fourier), 3D, MHD, incompressible**
  - Conditions aux limites périodiques ( $z, \phi$ ) et shearing-sheet ( $r$ )
  - Viscosité et résistivité physiques explicites
  - Quantification et contrôle de la dissipation numérique (<3% dissipation totale)
  - Parallélisation MPI
  
- Code aux différences finies MHD d'ordre 4
  - Conditions aux limites radiales quelconques
  - Effets de compressibilité
  - Stratification verticale possible
  - Parallélisation MPI



# Méthodes numériques

## Codes numériques

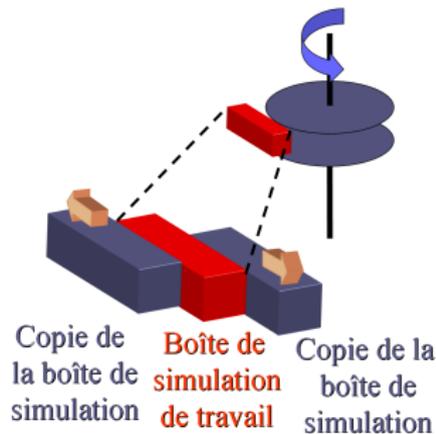
- Code Spectral (Fourier), 3D, MHD, incompressible
  - Conditions aux limites périodiques ( $z, \phi$ ) et shearing-sheet ( $r$ )
  - Viscosité et résistivité physiques explicites
  - Quantification et contrôle de la dissipation numérique (<3% dissipation totale)
  - Parallélisation MPI
- Code aux différences finies MHD d'ordre 4
  - Conditions aux limites radiales quelconques
  - Effets de compressibilité
  - Stratification verticale possible
  - Parallélisation MPI



# Méthodes numériques

## Codes numériques

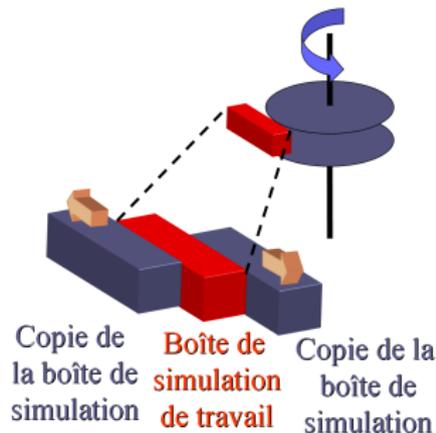
- Code Spectral (Fourier), 3D, MHD, incompressible
  - Conditions aux limites périodiques ( $z, \phi$ ) et shearing-sheet ( $r$ )
  - Viscosité et résistivité physiques explicites
  - Quantification et contrôle de la dissipation numérique (<3% dissipation totale)
  - Parallélisation MPI
- Code aux différences finies MHD d'ordre 4
  - Conditions aux limites radiales quelconques
  - Effets de compressibilité
  - Stratification verticale possible
  - Parallélisation MPI



# Méthodes numériques

## Codes numériques

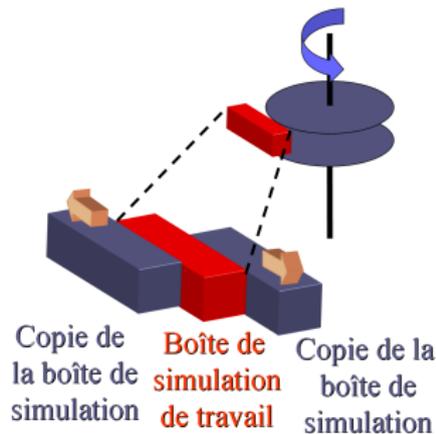
- Code Spectral (Fourier), 3D, MHD, incompressible
  - Conditions aux limites périodiques ( $z, \phi$ ) et shearing-sheet ( $r$ )
  - Viscosité et résistivité physiques explicites
  - Quantification et contrôle de la dissipation numérique (<3% dissipation totale)
  - Parallélisation MPI
- Code aux différences finies MHD d'ordre 4
  - Conditions aux limites radiales quelconques
  - Effets de compressibilité
  - Stratification verticale possible
  - Parallélisation MPI



# Méthodes numériques

## Codes numériques

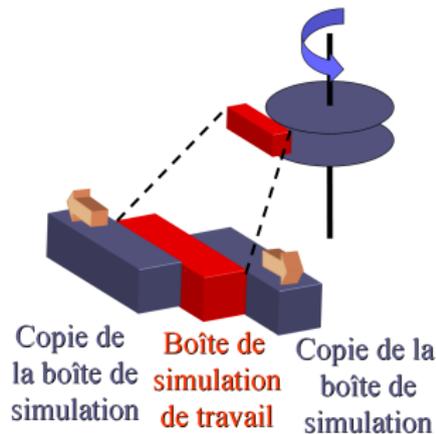
- Code Spectral (Fourier), 3D, MHD, incompressible
  - Conditions aux limites périodiques ( $z, \phi$ ) et shearing-sheet ( $r$ )
  - Viscosité et résistivité physiques explicites
  - Quantification et contrôle de la dissipation numérique (<3% dissipation totale)
  - Parallélisation MPI
- Code aux différences finies MHD d'ordre 4
  - Conditions aux limites radiales quelconques
  - Effets de compressibilité
  - Stratification verticale possible
  - Parallélisation MPI



# Méthodes numériques

## Codes numériques

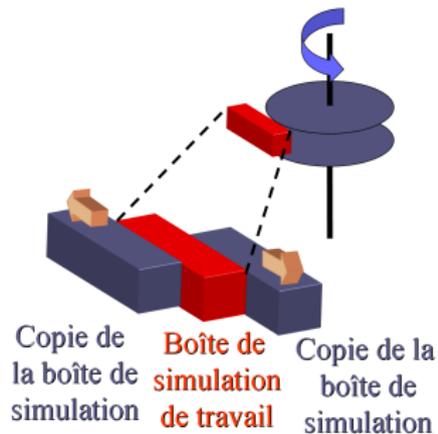
- Code Spectral (Fourier), 3D, MHD, incompressible
  - Conditions aux limites périodiques ( $z, \phi$ ) et shearing-sheet ( $r$ )
  - Viscosité et résistivité physiques explicites
  - Quantification et contrôle de la dissipation numérique (<3% dissipation totale)
  - Parallélisation MPI
- Code aux différences finies MHD d'ordre 4
  - Conditions aux limites radiales quelconques
  - Effets de compressibilité
  - Stratification verticale possible
  - Parallélisation MPI



# Méthodes numériques

## Codes numériques

- Code Spectral (Fourier), 3D, MHD, incompressible
  - Conditions aux limites périodiques ( $z, \phi$ ) et shearing-sheet ( $r$ )
  - Viscosité et résistivité physiques explicites
  - Quantification et contrôle de la dissipation numérique (<3% dissipation totale)
  - Parallélisation MPI
- Code aux différences finies MHD d'ordre 4
  - Conditions aux limites radiales quelconques
  - Effets de compressibilité
  - Stratification verticale possible
  - Parallélisation MPI



# Sommaire

- 1 Le transport dans les disques d'accrétion
- 2 Instabilité Sous-Critique**
- 3 Instabilité Strato-Rotationnelle
- 4 Instabilité Magnéto-Rotationnelle
- 5 Conclusions et perspectives

# Historique

- Instabilité sous critique suggérée par Lynden-Bell (1969)
- Simulations numériques locales (Balbus et al. 1996, Hawley et al. 1999) : pas de turbulence
- Expériences de Couette-Taylor (Richard & Zahn 2001, Richard 2001) : turbulence dans le régime Képlerien

*L'instabilité sous-critique permet elle d'expliquer le transport dans les disques ?*

# Historique

- Instabilité sous critique suggérée par Lynden-Bell (1969)
- Simulations numériques locales (Balbus et al. 1996, Hawley et al. 1999) : pas de turbulence
- Expériences de Couette-Taylor (Richard & Zahn 2001, Richard 2001) : turbulence dans le régime Képlerien

*L'instabilité sous-critique permet elle d'expliquer le transport dans les disques ?*



# Historique

- Instabilité sous critique suggérée par Lynden-Bell (1969)
- Simulations numériques locales (Balbus et al. 1996, Hawley et al. 1999) : pas de turbulence
- Expériences de Couette-Taylor (Richard & Zahn 2001, Richard 2001) : turbulence dans le régime Képlerien

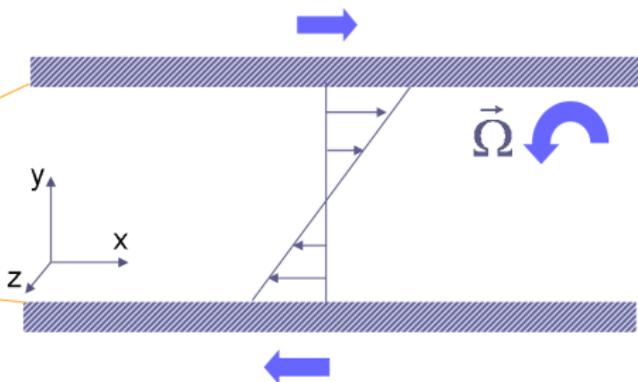
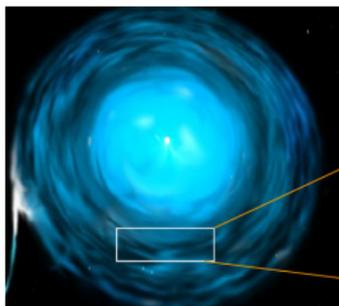
*L'instabilité sous-critique permet elle d'expliquer le transport dans les disques ?*



Expérience de Couette-Taylor au CEA Saclay

# Écoulement prototype

Nombres sans dimension

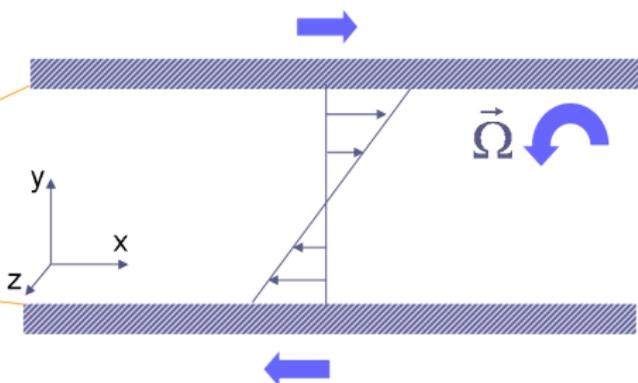
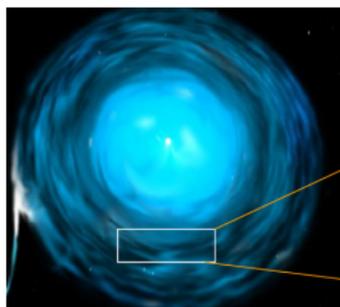


## Nombres sans dimension pertinents

- Nombre de Reynolds  $Re = \frac{SH^2}{\nu}$  ( $Re \sim 10^{10} - 10^{15}$ )
- Nombre de Rotation  $R_\Omega = -\frac{2\Omega}{S}$  ( $R_\Omega = -4/3$ )

# Écoulement prototype

Nombres sans dimension

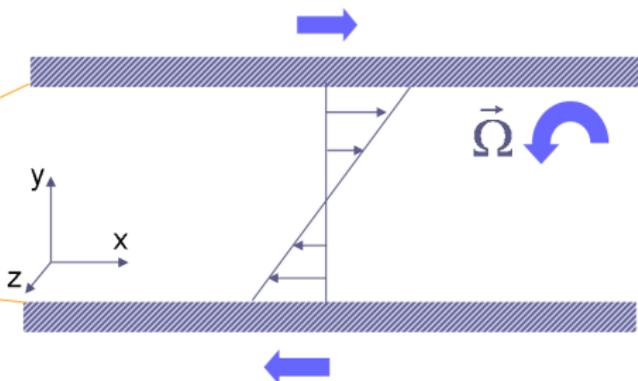
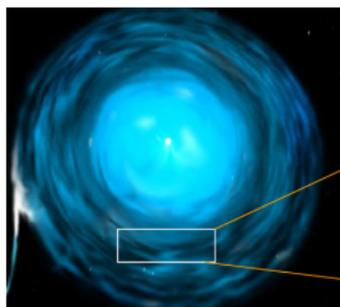


## Nombres sans dimension pertinents

- Nombre de Reynolds  $Re = \frac{SH^2}{\nu}$  ( $Re \sim 10^{10} - 10^{15}$ )
- Nombre de Rotation  $R_\Omega = -\frac{2\Omega}{S}$  ( $R_\Omega = -4/3$ )

# Écoulement prototype

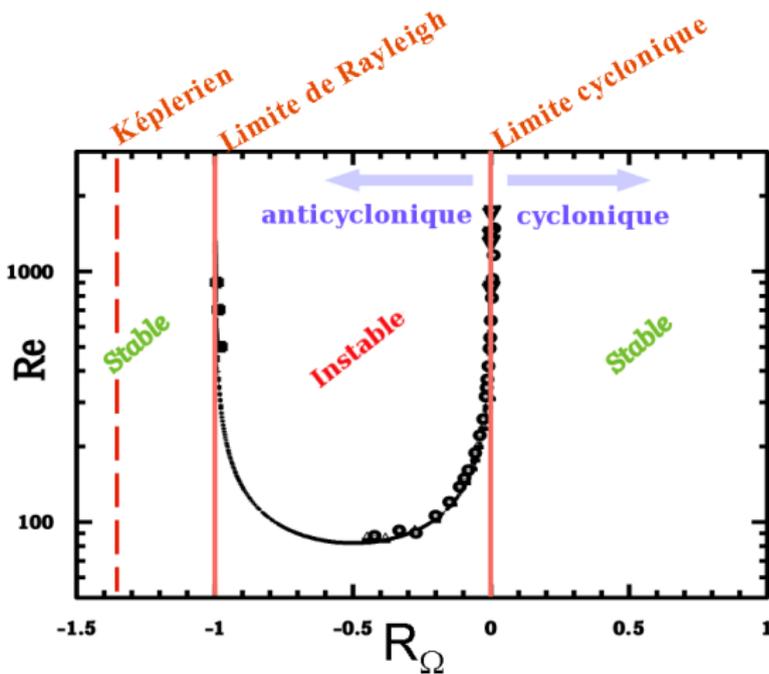
Nombres sans dimension



## Nombres sans dimension pertinents

- Nombre de Reynolds  $Re = \frac{SH^2}{\nu}$  ( $Re \sim 10^{10} - 10^{15}$ )
- Nombre de Rotation  $R_\Omega = -\frac{2\Omega}{S}$  ( $R_\Omega = -4/3$ )

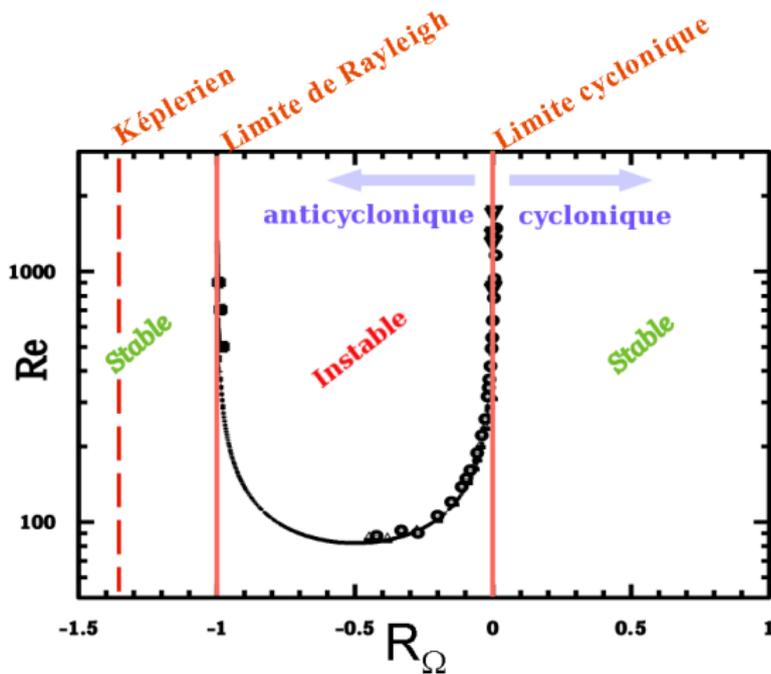
# Limites de stabilité linéaire



D'après  
Dubrulle et al.  
(2005)

- Écoulements astrophysiques linéairement stables
- *Instabilité non linéaire ?*

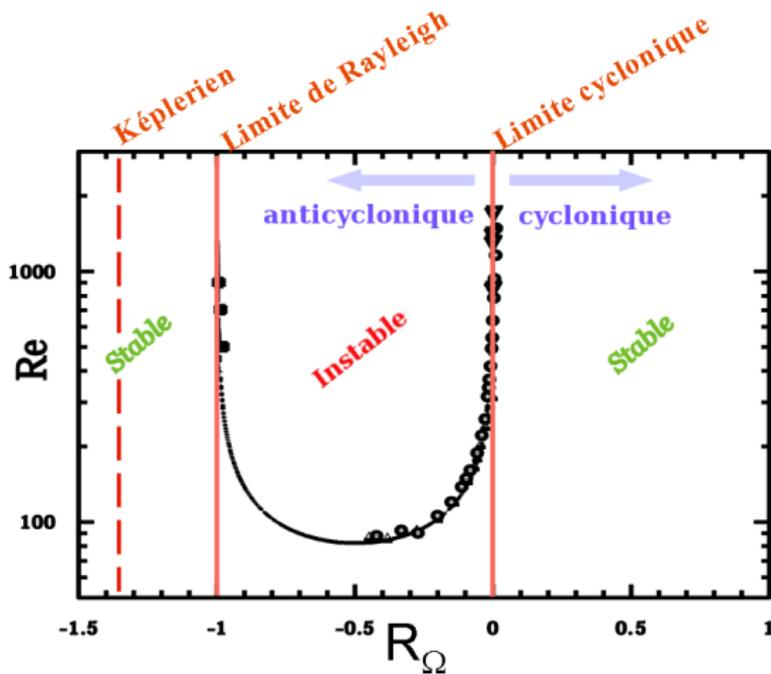
# Limites de stabilité linéaire



D'après  
Dubrulle et al.  
(2005)

- Écoulements astrophysiques linéairement stables
- *Instabilité non linéaire ?*

# Limites de stabilité linéaire

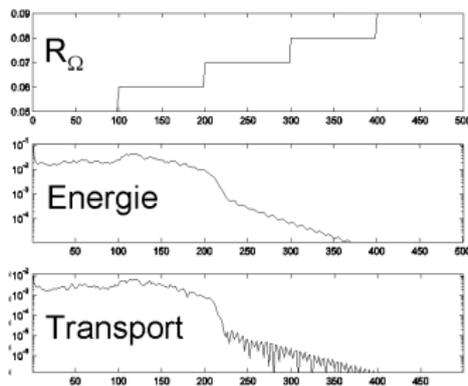
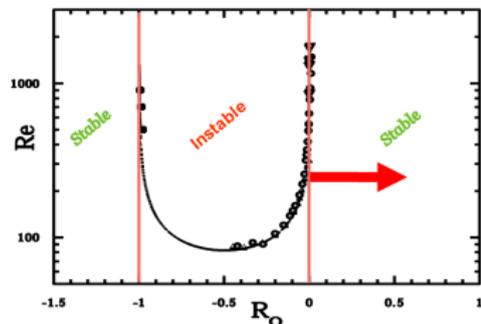


D'après  
Dubrulle et al.  
(2005)

- Écoulements astrophysiques linéairement stables
- *Instabilité non linéaire ?*

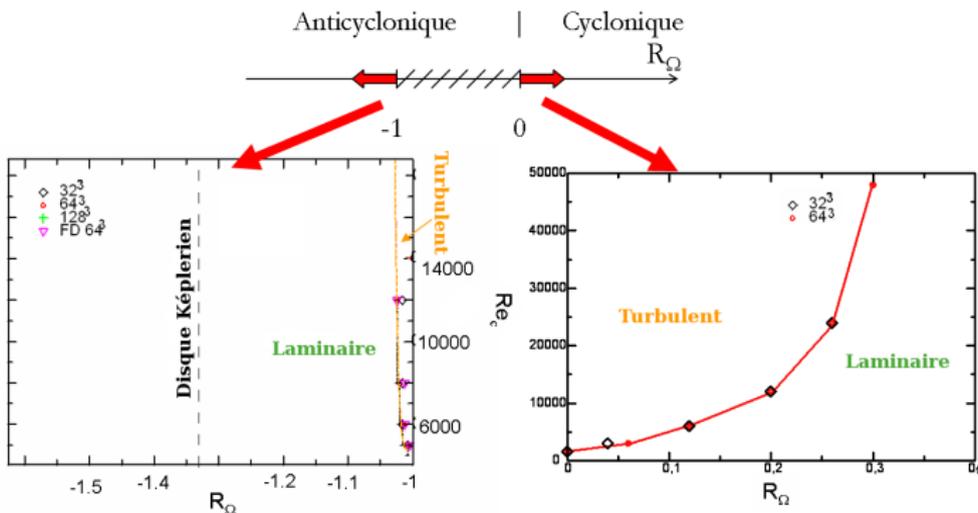
# Protocole numérique

- 1 Choix d'une résolution
- 2 Choix d'un nombre de Reynolds
- 3 Modification de  $R_\Omega$  à partir de la stabilité marginale jusqu'à perdre la turbulence
- 4 Augmentation de la résolution et vérification



# Résultats

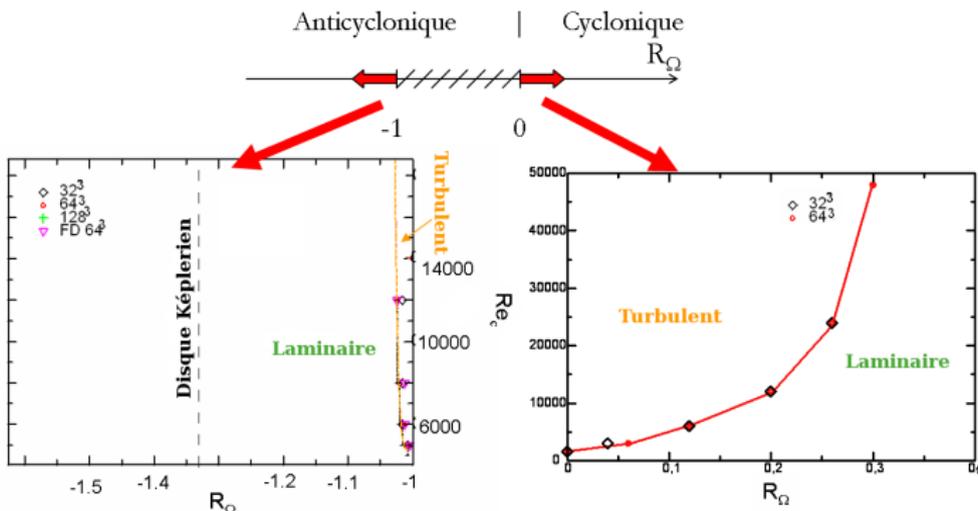
## Reynolds critique et rotation



- Il y a une instabilité sous critique dans les écoulements de Couette tournants
- Le régime képlerien nécessite des résolutions très élevés ( $Re_c \sim 10^8$  soit  $10^5$  années de calcul !)
- Régime astrophysique non atteignable numériquement

# Résultats

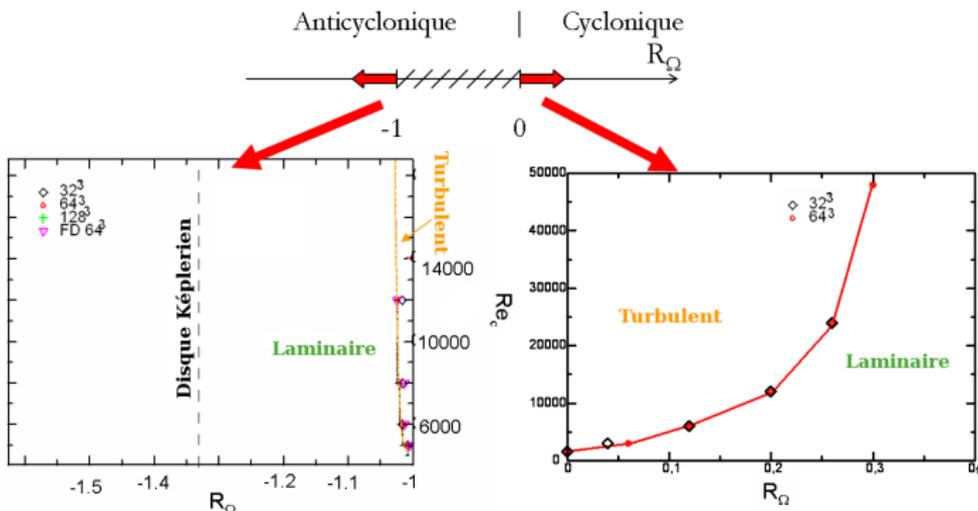
## Reynolds critique et rotation



- Il y a une instabilité sous critique dans les écoulements de Couette tournants
- Le régime képlerien nécessite des résolutions très élevés ( $Re_c \sim 10^8$  soit  $10^5$  années de calcul !)
- Régime astrophysique non atteignable numériquement

# Résultats

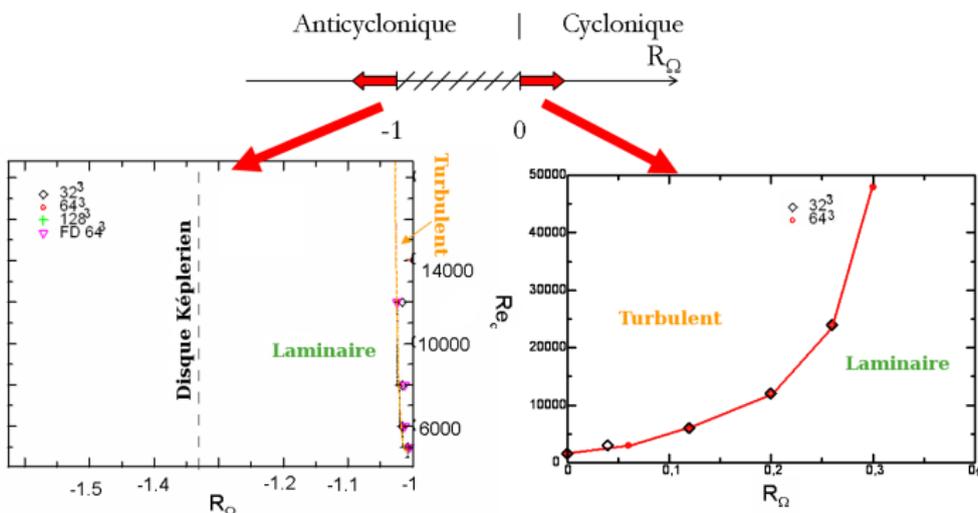
## Reynolds critique et rotation



- Il y a une instabilité sous critique dans les écoulements de Couette tournants
- Le régime képlerien nécessite des résolutions très élevés ( $Re_c \sim 10^8$  soit  $10^5$  années de calcul !)
- Régime astrophysique non atteignable numériquement

# Résultats

## Reynolds critique et rotation

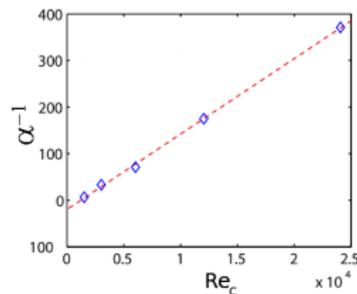
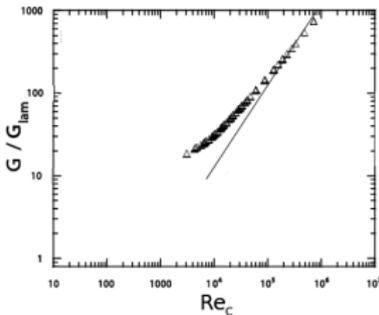
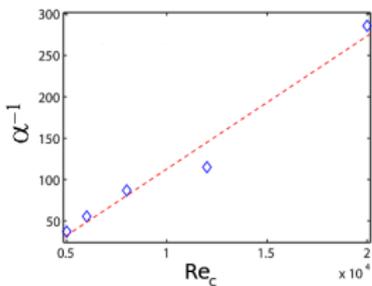


- Il y a une instabilité sous critique dans les écoulements de Couette tournants
- Le régime képlérien nécessite des résolutions très élevés ( $Re_c \sim 10^8$  soit  $10^5$  années de calcul !)
- Régime astrophysique non atteignable numériquement

# Résultats

## Reynolds critique et transport

Anticyclonique | Cyclonique



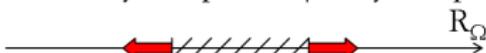
- Comportement générique de l'écoulement (Longaretti 2002) :

$$\alpha(Re, R_\Omega) \simeq \frac{1}{Re_c(R_\Omega)}$$

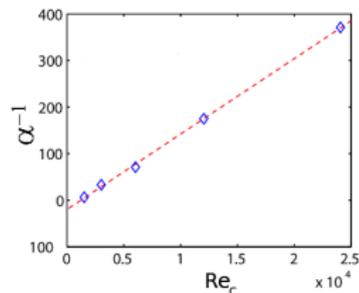
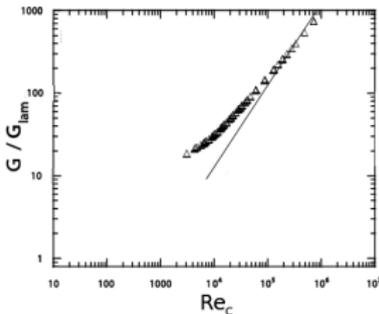
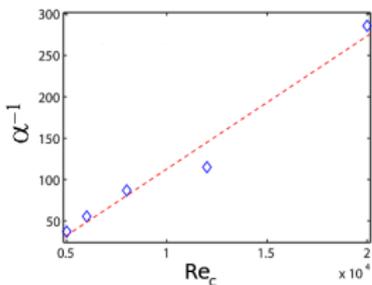
# Résultats

## Reynolds critique et transport

Anticyclonique | Cyclonique



-1 | 0



- Comportement générique de l'écoulement (Longaretti 2002) :

$$\alpha(Re, R_\Omega) \simeq \frac{1}{Re_c(R_\Omega)}$$

# Résultats

## Efficacité de l'instabilité sous-critique

- Si l'instabilité existe dans les disques, le Reynolds de transition est très élevé ( $Re_c \sim 10^8$ )
- Coefficient de transport de l'ordre de  $1/Re_c$
- Transport dû à cette instabilité dans les disques  $\alpha \sim 10^{-8}$

### Conclusion

- L'instabilité sous-critique ne peut être totalement exclue, mais le transport associé est trop faible pour expliquer les observations ( $\alpha > 10^{-3}$ ) **Lesur & Longaretti 2005, A&A**
- Résultats partiellement confirmés par de nouvelles expériences de Couette-Taylor (Ji et al. 2006, Nature)

# Résultats

## Efficacité de l'instabilité sous-critique

- Si l'instabilité existe dans les disques, le Reynolds de transition est très élevé ( $Re_c \sim 10^8$ )
- Coefficient de transport de l'ordre de  $1/Re_c$
- Transport dû à cette instabilité dans les disques  $\alpha \sim 10^{-8}$

### Conclusion

- L'instabilité sous-critique ne peut être totalement exclue, mais le transport associé est trop faible pour expliquer les observations ( $\alpha > 10^{-3}$ ) **Lesur & Longaretti 2005, A&A**
- Résultats partiellement confirmés par de nouvelles expériences de Couette-Taylor (Ji et al. 2006, Nature)

# Résultats

## Efficacité de l'instabilité sous-critique

- Si l'instabilité existe dans les disques, le Reynolds de transition est très élevé ( $Re_c \sim 10^8$ )
- Coefficient de transport de l'ordre de  $1/Re_c$
- Transport dû à cette instabilité dans les disques  $\alpha \sim 10^{-8}$

### Conclusion

- L'instabilité sous-critique ne peut être totalement exclue, mais le transport associé est trop faible pour expliquer les observations ( $\alpha > 10^{-3}$ ) **Lesur & Longaretti 2005, A&A**
- Résultats partiellement confirmés par de nouvelles expériences de Couette-Taylor (Ji et al. 2006, Nature)

# Résultats

## Efficacité de l'instabilité sous-critique

- Si l'instabilité existe dans les disques, le Reynolds de transition est très élevé ( $Re_c \sim 10^8$ )
- Coefficient de transport de l'ordre de  $1/Re_c$
- Transport dû à cette instabilité dans les disques  $\alpha \sim 10^{-8}$

### Conclusion

- L'instabilité sous-critique ne peut être totalement exclue, mais le transport associé est trop faible pour expliquer les observations ( $\alpha > 10^{-3}$ ) **Lesur & Longaretti 2005, A&A**
- Résultats partiellement confirmés par de nouvelles expériences de Couette-Taylor (Ji et al. 2006, Nature)

# Résultats

## Efficacité de l'instabilité sous-critique

- Si l'instabilité existe dans les disques, le Reynolds de transition est très élevé ( $Re_c \sim 10^8$ )
- Coefficient de transport de l'ordre de  $1/Re_c$
- Transport dû à cette instabilité dans les disques  $\alpha \sim 10^{-8}$

### Conclusion

- L'instabilité sous-critique ne peut être totalement exclue, mais le transport associé est trop faible pour expliquer les observations ( $\alpha > 10^{-3}$ ) **Lesur & Longaretti 2005, A&A**
- Résultats partiellement confirmés par de nouvelles expériences de Couette-Taylor (Ji et al. 2006, Nature)

# Sommaire

- 1 Le transport dans les disques d'accrétion
- 2 Instabilité Sous-Critique
- 3 Instabilité Strato-Rotationnelle**
- 4 Instabilité Magnéto-Rotationnelle
- 5 Conclusions et perspectives

# Instabilité strato-rotationnelle

## Historique & Motivations

- Première étude linéaire par Kushner et al. (1998)
- Mise en évidence numérique (Couette-Taylor, Brandenburg & Rudiger 2005)
- Mise en évidence expérimentale (Couette-Taylor, Le Bar & Le Gal 2007)
- Instabilité locale/globale ? (Goodman & Balbus 2001, Dubrulle et al. 2005, Umrhan 2006)
- *Rôle des conditions aux limites ?*

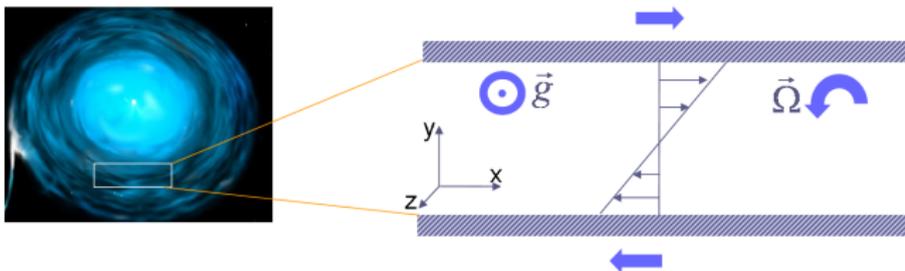






# Écoulement prototype

Nombres sans dimension



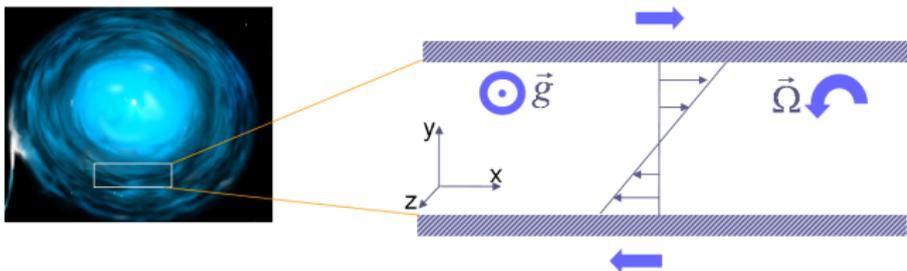
- Ajout d'une stratification verticale *uniforme* ( $\mathbf{g} = g\mathbf{e}_z$ )
- Fréquence de Brunt-Väisälä :  $N^2 = (\gamma - 1) \frac{g^2}{c_s^2} + g\partial_z \ln c_s^2$

Nombres sans dimension associés

- Nombre de Reynolds  $Re = \frac{SH^2}{\nu}$
- Nombre de Rotation  $R_\Omega = -\frac{2\Omega}{S}$
- Nombre de Froude  $F = \Omega/N \quad F \sim 1$

# Écoulement prototype

## Nombres sans dimension



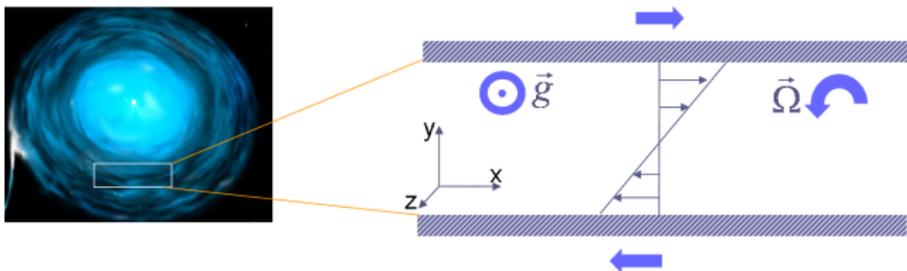
- Ajout d'une stratification verticale *uniforme* ( $\mathbf{g} = g\mathbf{e}_z$ )
- Fréquence de Brunt-Väisälä :  $N^2 = (\gamma - 1) \frac{g^2}{c_s^2} + g\partial_z \ln c_s^2$

### Nombres sans dimension associés

- Nombre de Reynolds  $Re = \frac{SH^2}{\nu}$
- Nombre de Rotation  $R_\Omega = -\frac{2\Omega}{S}$
- Nombre de Froude  $F = \Omega/N \quad F \sim 1$

# Écoulement prototype

Nombres sans dimension



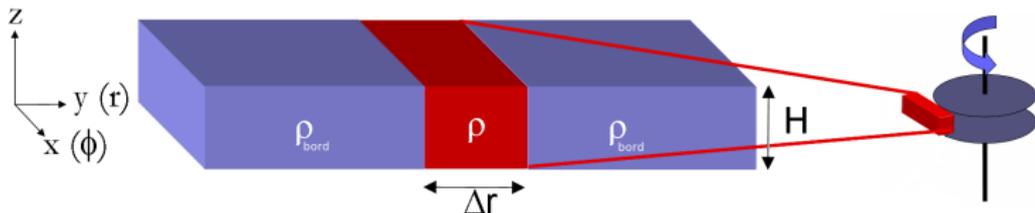
- Ajout d'une stratification verticale *uniforme* ( $\mathbf{g} = g\mathbf{e}_z$ )
- Fréquence de Brunt-Väisälä :  $N^2 = (\gamma - 1) \frac{g^2}{c_s^2} + g\partial_z \ln c_s^2$

## Nombres sans dimension associés

- Nombre de Reynolds  $Re = \frac{SH^2}{\nu}$
- Nombre de Rotation  $R_\Omega = -\frac{2\Omega}{S}$
- Nombre de Froude  $F = \Omega/N \quad F \sim 1$

# Etude linéaire analytique : modes exponentiels

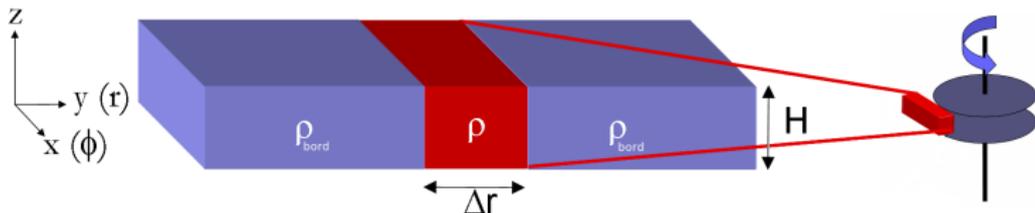
## Conditions aux limites radiales



- Milieu d'étude (densité massique  $\rho$ ) entouré de deux milieux de densité  $\rho_{\text{bord}}$
- Largeur du milieu d'étude  $\Delta r$  et hauteur du disque  $H$
- Milieux latéraux infinis
- 2 cas limites :
  - $\rho_{\text{bord}} \gg \rho$  : murs
  - $\rho_{\text{bord}} \ll \rho$  : conditions aux limites libres

# Etude linéaire analytique : modes exponentiels

## Conditions aux limites radiales



- Milieu d'étude (densité massique  $\rho$ ) entouré de deux milieux de densité  $\rho_{\text{bord}}$
- Largeur du milieu d'étude  $\Delta r$  et hauteur du disque  $H$
- Milieux latéraux infinis
- 2 cas limites :
  - $\rho_{\text{bord}} \gg \rho$  : murs
  - $\rho_{\text{bord}} \ll \rho$  : conditions aux limites libres

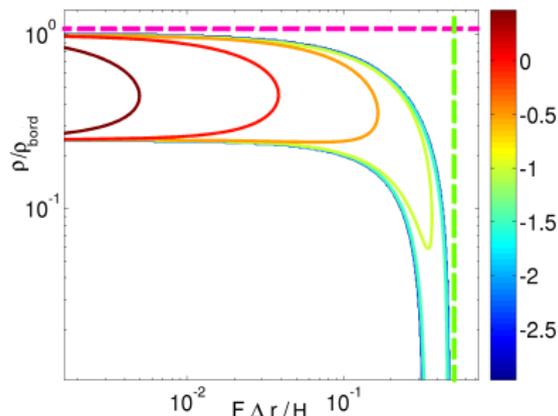
# Étude linéaire analytique : modes exponentiels

Taux de croissance

Existence de l'instabilité lorsque :

- $\rho < \rho_{\text{bord}}$  (gap peu dense)
- Dans la limite  $\rho \ll \rho_{\text{bord}}$  (murs) :

$$F\Delta r/H < 0.47$$



Conclusion de l'étude linéaire

- Dans les disques  $F \gtrsim 1$
- Le gap doit être extrêmement étroit ( $\Delta r < 0.5H$ )

*La SRI ne peut expliquer le transport dans tout le disque*

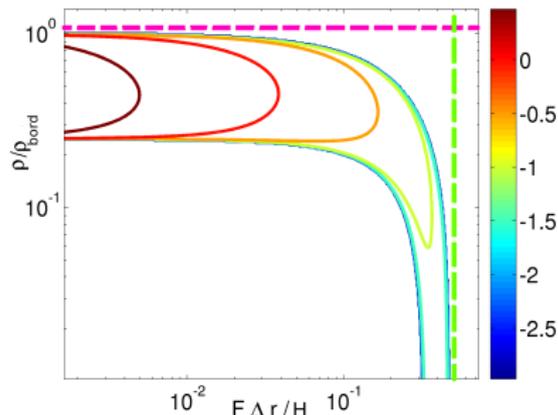
# Étude linéaire analytique : modes exponentiels

Taux de croissance

Existence de l'instabilité lorsque :

- $\rho < \rho_{\text{bord}}$  (gap peu dense)
- Dans la limite  $\rho \ll \rho_{\text{bord}}$  (murs) :

$$F\Delta r/H < 0.47$$



Conclusion de l'étude linéaire

- Dans les disques  $F \gtrsim 1$
- Le gap doit être extrêmement étroit ( $\Delta r < 0.5H$ )

*La SRI ne peut expliquer le transport dans tout le disque*

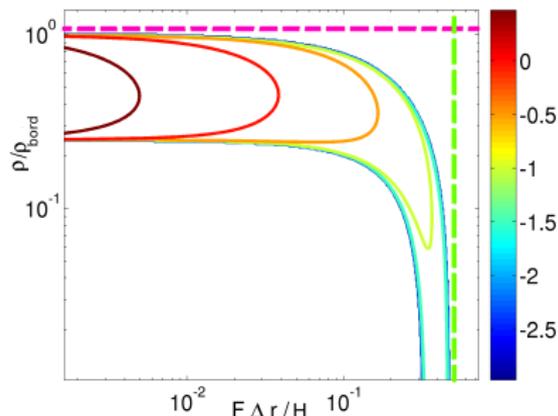
# Étude linéaire analytique : modes exponentiels

Taux de croissance

Existence de l'instabilité lorsque :

- $\rho < \rho_{\text{bord}}$  (gap peu dense)
- Dans la limite  $\rho \ll \rho_{\text{bord}}$  (murs) :

$$F\Delta r/H < 0.47$$



Conclusion de l'étude linéaire

- Dans les disques  $F \gtrsim 1$
- Le gap doit être extrêmement étroit ( $\Delta r < 0.5H$ )

*La SRI ne peut expliquer le transport dans tout le disque*

# Étude non linéaire

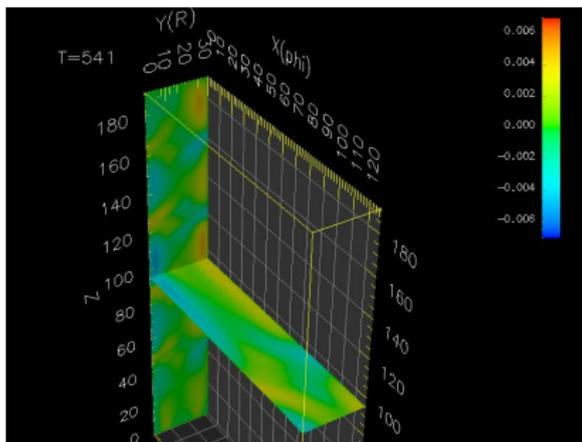
## Simulations de SRI, conditions aux limites

- Simulation de SRI pour  $Re = 500$  dans un écoulement avec murs.
- Disparition de la SRI lors de l'utilisation de conditions aux limites shearing-sheet ( $t = 150$ )

# Étude non linéaire

Simulations de SRI, conditions aux limites

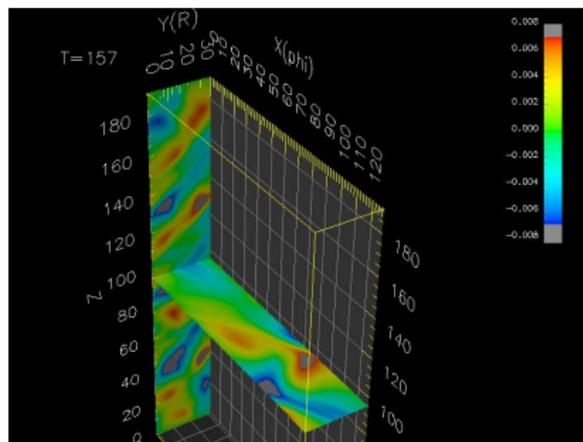
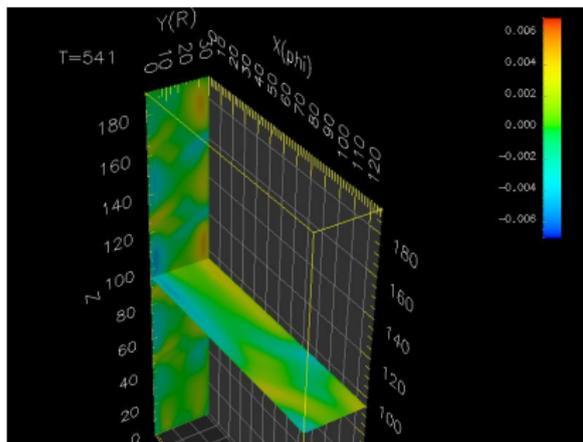
- Simulation de SRI pour  $Re = 500$  dans un écoulement avec murs.
- Disparition de la SRI lors de l'utilisation de conditions aux limites shearing-sheet ( $t = 150$ )



# Étude non linéaire

Simulations de SRI, conditions aux limites

- Simulation de SRI pour  $Re = 500$  dans un écoulement avec murs.
- Disparition de la SRI lors de l'utilisation de conditions aux limites shearing-sheet ( $t = 150$ )



# Conclusions

- Instabilité *globale* fortement dépendante des conditions aux limites radiales
- Requier des structures spatiales étroites radialement
- Développement possible dans les sillons pauvres en gaz ouverts par les planètes géantes
- Comportement globalement cohérent (ondes stationnaires)

## Pertinence astrophysique

- L'instabilité strato-rotationnelle ne peut pas être une source de transport local dans les disques (**Lesur & Longaretti en prep.**)
- Elle peut néanmoins avoir un rôle dans certains phénomènes locaux (migration de planètes, ...)

# Conclusions

- Instabilité *globale* fortement dépendante des conditions aux limites radiales
- Requier des structures spatiales étroites radialement
- Développement possible dans les sillons pauvres en gaz ouverts par les planètes géantes
- Comportement globalement cohérent (ondes stationnaires)

## Pertinence astrophysique

- L'instabilité strato-rotationnelle ne peut pas être une source de transport local dans les disques (**Lesur & Longaretti en prep.**)
- Elle peut néanmoins avoir un rôle dans certains phénomènes locaux (migration de planètes, ...)

# Conclusions

- Instabilité *globale* fortement dépendante des conditions aux limites radiales
- Requier des structures spatiales étroites radialement
- Développement possible dans les sillons pauvres en gaz ouverts par les planètes géantes
- Comportement globalement cohérent (ondes stationnaires)

## Pertinence astrophysique

- L'instabilité strato-rotationnelle ne peut pas être une source de transport local dans les disques (Lesur & Longaretti en prep.)
- Elle peut néanmoins avoir un rôle dans certains phénomènes locaux (migration de planètes, ...)

# Conclusions

- Instabilité *globale* fortement dépendante des conditions aux limites radiales
- Requier des structures spatiales étroites radialement
- Développement possible dans les sillons pauvres en gaz ouverts par les planètes géantes
- Comportement globalement cohérent (ondes stationnaires)

## Pertinence astrophysique

- L'instabilité strato-rotationnelle ne peut pas être une source de transport local dans les disques (**Lesur & Longaretti en prep.**)
- Elle peut néanmoins avoir un rôle dans certains phénomènes locaux (migration de planètes, ...)

# Conclusions

- Instabilité *globale* fortement dépendante des conditions aux limites radiales
- Requier des structures spatiales étroites radialement
- Développement possible dans les sillons pauvres en gaz ouverts par les planètes géantes
- Comportement globalement cohérent (ondes stationnaires)

## Pertinence astrophysique

- L'instabilité strato-rotationnelle ne peut pas être une source de transport local dans les disques (**Lesur & Longaretti en prep.**)
- Elle peut néanmoins avoir un rôle dans certains phénomènes locaux (migration de planètes, ...)

# Sommaire

- 1 Le transport dans les disques d'accrétion
- 2 Instabilité Sous-Critique
- 3 Instabilité Strato-Rotationnelle
- 4 Instabilité Magnéto-Rotationnelle**
- 5 Conclusions et perspectives





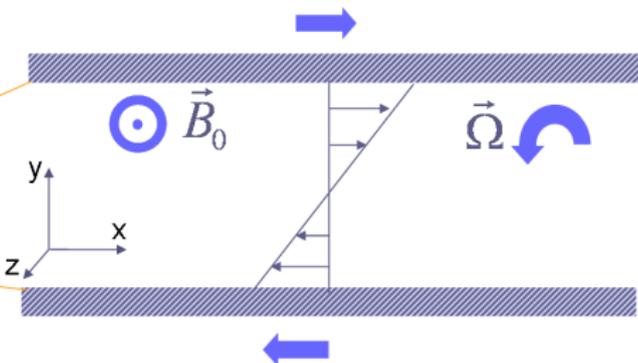
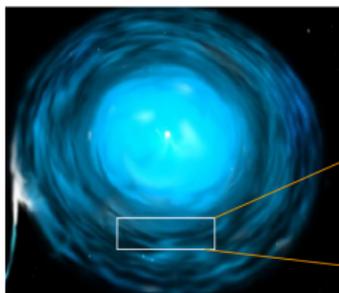






# Écoulement prototype

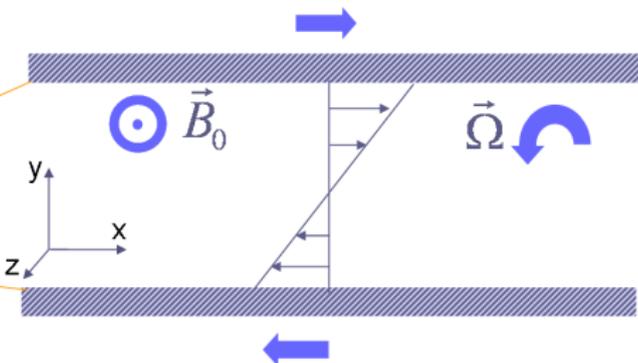
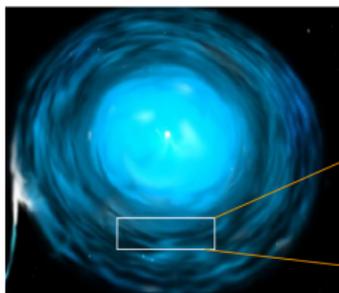
Nombres sans dimension



- Intensité du champ magnétique
  - $\beta = (\Omega H / V_a)^2 \simeq (c_s / V_a)^2$
- Viscosité moléculaire (Reynolds)
  - $Re = SH^2 / \nu$
- Résistivité moléculaire (Reynolds magnétique)
  - $Rm = SH^2 / \eta$
- Rapport viscosité/résistivité : Prandtl Magnétique
  - $Pm = Rm / Re = \nu / \eta$

# Écoulement prototype

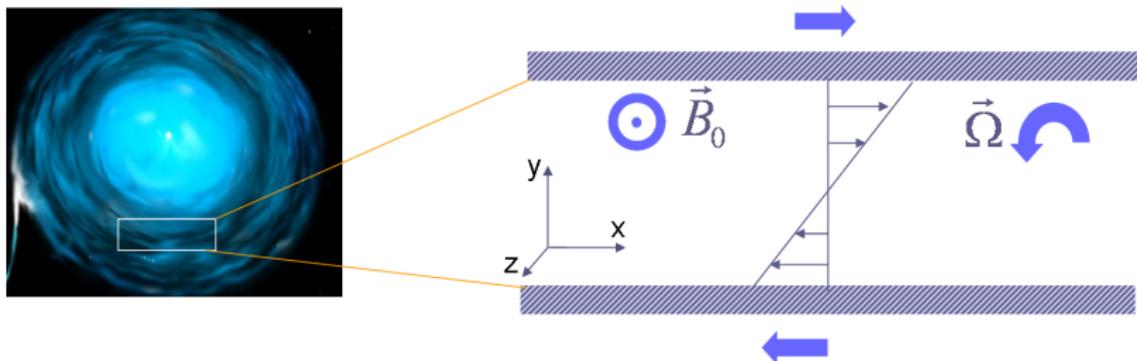
Nombres sans dimension



- Intensité du champ magnétique
  - $\beta = (\Omega H / V_a)^2 \simeq (c_s / V_a)^2$
- Viscosité moléculaire (Reynolds)
  - $Re = SH^2 / \nu$
- Résistivité moléculaire (Reynolds magnétique)
  - $Rm = SH^2 / \eta$
- Rapport viscosité/résistivité : Prandtl Magnétique
  - $Pm = Rm / Re = \nu / \eta$

# Écoulement prototype

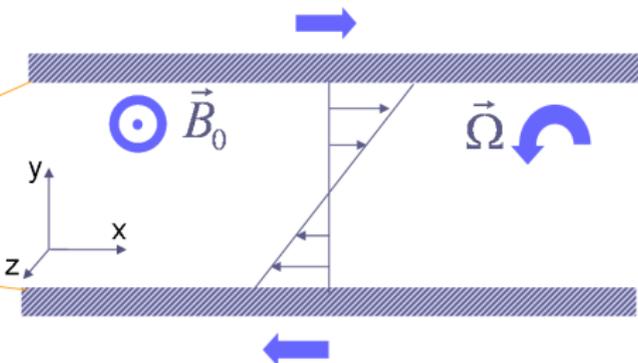
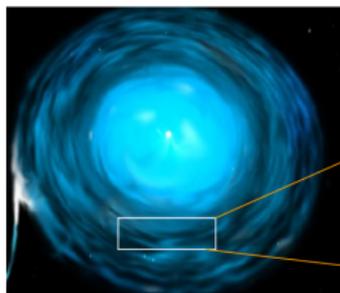
Nombres sans dimension



- Intensité du champ magnétique
  - $\beta = (\Omega H / V_a)^2 \simeq (c_s / V_a)^2$
- Viscosité moléculaire (Reynolds)
  - $Re = SH^2 / \nu$
- Résistivité moléculaire (Reynolds magnétique)
  - $Rm = SH^2 / \eta$
- Rapport viscosité/résistivité : Prandtl Magnétique
  - $Pm = Rm / Re = \nu / \eta$

# Écoulement prototype

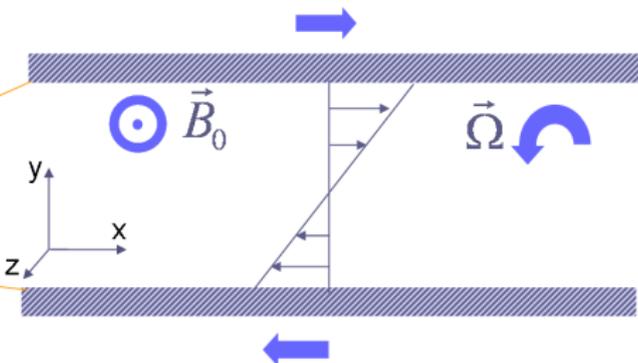
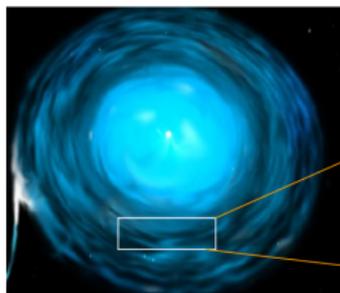
Nombres sans dimension



- Intensité du champ magnétique
  - $\beta = (\Omega H / V_a)^2 \simeq (c_s / V_a)^2$
- Viscosité moléculaire (Reynolds)
  - $Re = SH^2 / \nu$
- Résistivité moléculaire (Reynolds magnétique)
  - $Rm = SH^2 / \eta$
- Rapport viscosité/résistivité : Prandtl Magnétique
  - $Pm = Rm / Re = \nu / \eta$

# Écoulement prototype

Nombres sans dimension



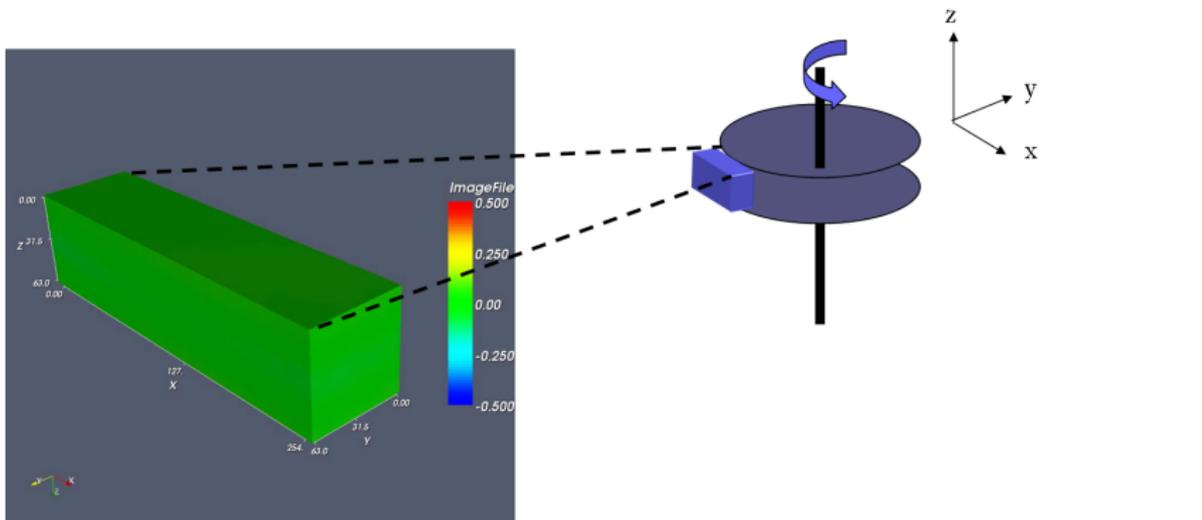
- Intensité du champ magnétique
  - $\beta = (\Omega H / V_a)^2 \simeq (c_s / V_a)^2$
- Viscosité moléculaire (Reynolds)
  - $Re = SH^2 / \nu$
- Résistivité moléculaire (Reynolds magnétique)
  - $Rm = SH^2 / \eta$
- Rapport viscosité/résistivité : Prandtl Magnétique
  - $Pm = Rm / Re = \nu / \eta$

# Exemple de simulation MRI

Exemple pour  $Re = 2.10^3$ ,  $Pm = 1$ ,  $\beta = 100$

$128 \times 64 \times 64$

Carte 3D de  $v_r$  ( $v_y$ ) sur 20 orbites





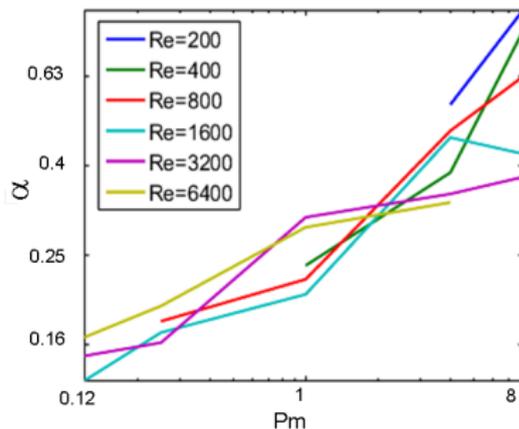
# Effet du nombre de Prandtl

## Description

- Le nombre de Prandtl modifie l'efficacité du transport

$$\alpha \propto Pm^\delta \quad 0.25 < \delta < 0.5$$

- Efficacité de la MRI dans les étoiles jeunes ( $Pm \ll 1$ ) et les AGN ( $Pm \gg 1$  au voisinage du trou noir) ?



## Problématique

- $Pm \gg 1$  ou  $Pm \ll 1$  non atteignable numériquement
- Description de l'effet  $Pm - \alpha$  loin de  $Pm = 1$  (saturation ?)

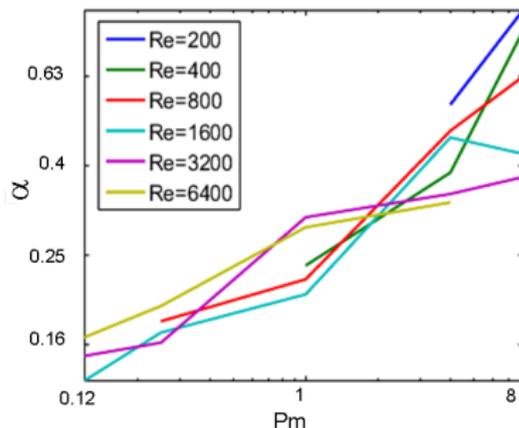
# Effet du nombre de Prandtl

## Description

- Le nombre de Prandtl modifie l'efficacité du transport

$$\alpha \propto Pm^\delta \quad 0.25 < \delta < 0.5$$

- Efficacité de la MRI dans les étoiles jeunes ( $Pm \ll 1$ ) et les AGN ( $Pm \gg 1$  au voisinage du trou noir) ?



## Problématique

- $Pm \gg 1$  ou  $Pm \ll 1$  non atteignable numériquement
- Description de l'effet  $Pm - \alpha$  loin de  $Pm = 1$  (saturation ?)

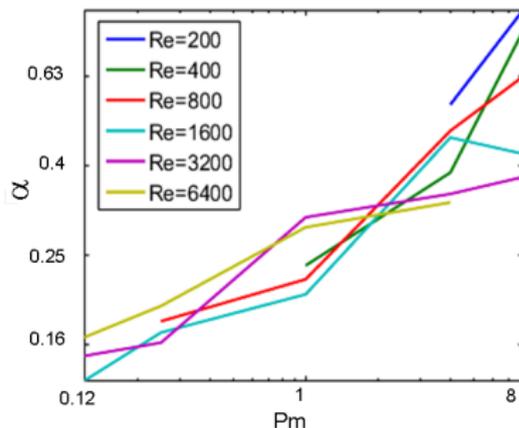
# Effet du nombre de Prandtl

## Description

- Le nombre de Prandtl modifie l'efficacité du transport

$$\alpha \propto Pm^\delta \quad 0.25 < \delta < 0.5$$

- Efficacité de la MRI dans les étoiles jeunes ( $Pm \ll 1$ ) et les AGN ( $Pm \gg 1$  au voisinage du trou noir) ?



## Problématique

- $Pm \gg 1$  ou  $Pm \ll 1$  non atteignable numériquement
- Description de l'effet  $Pm - \alpha$  loin de  $Pm = 1$  (saturation ?)

# Effet du nombre de Prandtl

## Analyse spectrale

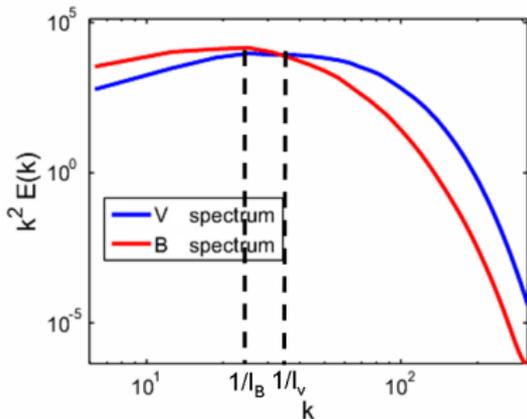
Spectre de dissipation  $Pm = 0.25$

Spectre de dissipation  $Pm = 4$

- $Pm$  modifie le rapport des échelles de dissipation  $l_V/l_B$
- Réaction des échelles  $< 1/l_V$  sur le transport ?

# Effet du nombre de Prandtl

## Analyse spectrale



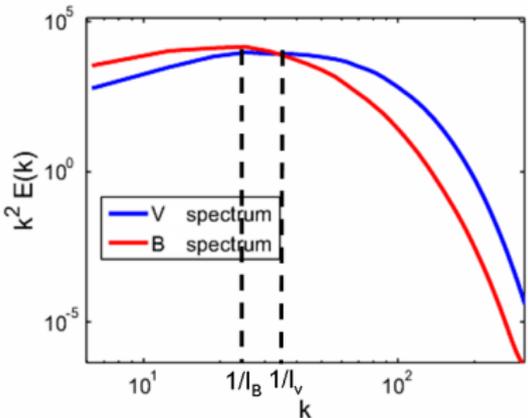
Spectre de dissipation  $Pm = 0.25$

Spectre de dissipation  $Pm = 4$

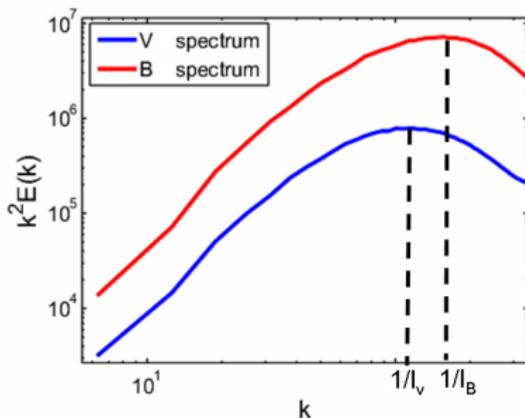
- $Pm$  modifie le rapport des échelles de dissipation  $l_V/l_B$
- Réaction des échelles  $< 1/l_V$  sur le transport ?

# Effet du nombre de Prandtl

## Analyse spectrale



Spectre de dissipation  $Pm = 0.25$

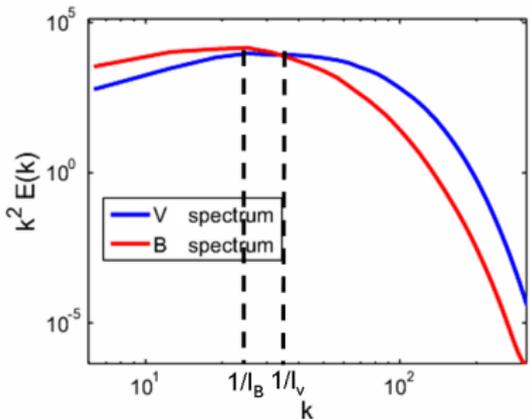


Spectre de dissipation  $Pm = 4$

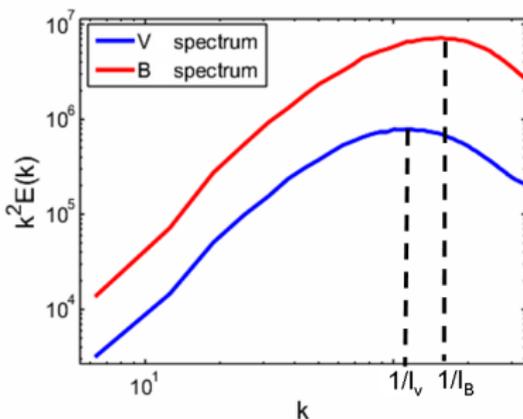
- $Pm$  modifie le rapport des échelles de dissipation  $l_V/l_B$
- Réaction des échelles  $< 1/l_V$  sur le transport ?

# Effet du nombre de Prandtl

## Analyse spectrale



Spectre de dissipation  $Pm = 0.25$

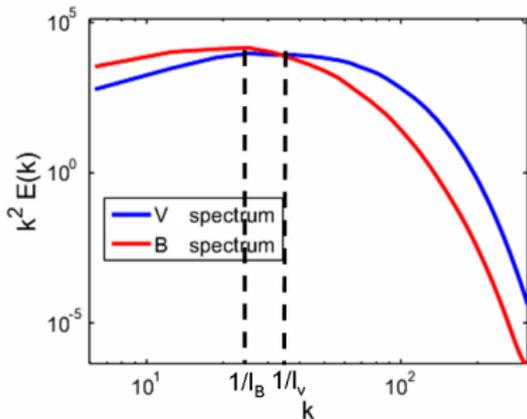


Spectre de dissipation  $Pm = 4$

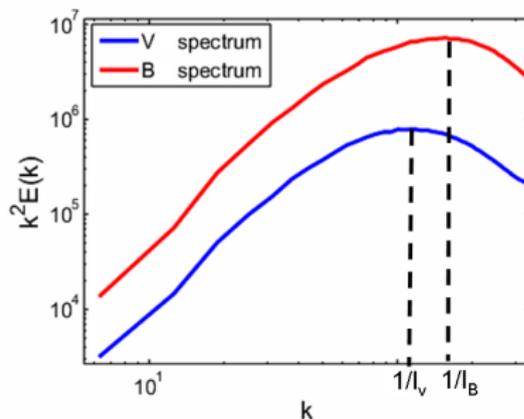
- $Pm$  modifie le rapport des échelles de dissipation  $l_v/l_B$
- Réaction des échelles  $< 1/l_v$  sur le transport ?

# Effet du nombre de Prandtl

## Analyse spectrale



Spectre de dissipation  $Pm = 0.25$



Spectre de dissipation  $Pm = 4$

- $Pm$  modifie le rapport des échelles de dissipation  $l_V/l_B$
- Réaction des échelles  $< 1/l_V$  sur le transport ?

# Effet du nombre de Prandtl

Phénoménologie proposée

- Turbulence en milieu homogène isotrope &  $Pm > 1$ , spectre en  $k^{-1}$  (Cho, Lazarian & Vishniac)
  - Réaction de la région en  $k^{-1}$  sur les grandes échelles ( $1/l$ ) ?
  - Lorsque  $Pm$  augmente, la réaction devrait saturer
- 
- Courbe  $Pm - \alpha$  attendue
  - *Que valent  $\alpha^+$  et  $\alpha^-$  ?*

# Effet du nombre de Prandtl

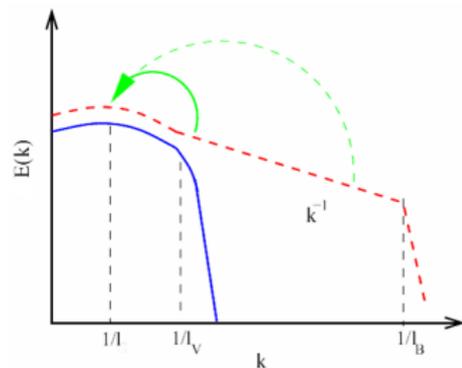
Phénoménologie proposée

- Turbulence en milieu homogène isotrope &  $Pm > 1$ , spectre en  $k^{-1}$  (Cho, Lazarian & Vishniac)
  - Réaction de la région en  $k^{-1}$  sur les grandes échelles ( $1/l$ ) ?
  - Lorsque  $Pm$  augmente, la réaction devrait saturer
- 
- Courbe  $Pm - \alpha$  attendue
  - *Que valent  $\alpha^+$  et  $\alpha^-$  ?*

# Effet du nombre de Prandtl

## Phénoménologie proposée

- Turbulence en milieu homogène isotrope &  $Pm > 1$ , spectre en  $k^{-1}$  (Cho, Lazarian & Vishniac)
- Réaction de la région en  $k^{-1}$  sur les grandes échelles ( $1/l$ ) ?
- Lorsque  $Pm$  augmente, la réaction devrait saturer

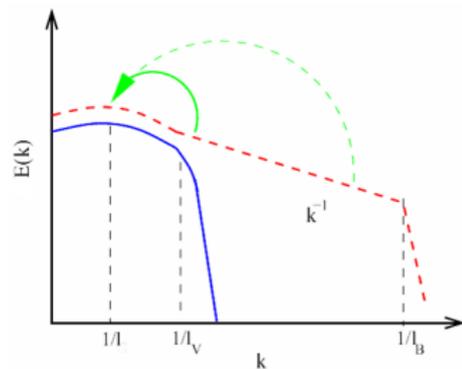


- Courbe  $Pm - \alpha$  attendue
- Que valent  $\alpha^+$  et  $\alpha^-$  ?

# Effet du nombre de Prandtl

Phénoménologie proposée

- Turbulence en milieu homogène isotrope &  $Pm > 1$ , spectre en  $k^{-1}$  (Cho, Lazarian & Vishniac)
- Réaction de la région en  $k^{-1}$  sur les grandes échelles ( $1/l$ ) ?
- Lorsque  $Pm$  augmente, la réaction devrait saturer



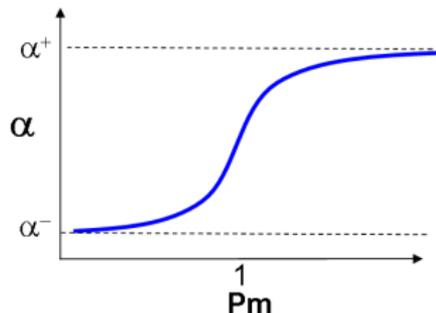
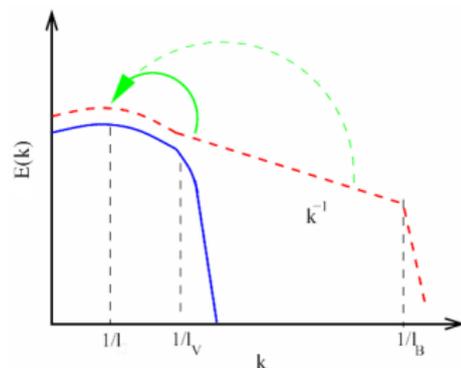
- Courbe  $Pm - \alpha$  attendue
- Que valent  $\alpha^+$  et  $\alpha^-$  ?

# Effet du nombre de Prandtl

Phénoménologie proposée

- Turbulence en milieu homogène isotrope &  $Pm > 1$ , spectre en  $k^{-1}$  (Cho, Lazarian & Vishniac)
- Réaction de la région en  $k^{-1}$  sur les grandes échelles ( $1/l$ ) ?
- Lorsque  $Pm$  augmente, la réaction devrait saturer

- Courbe  $Pm - \alpha$  attendue
- *Que valent  $\alpha^+$  et  $\alpha^-$  ?*

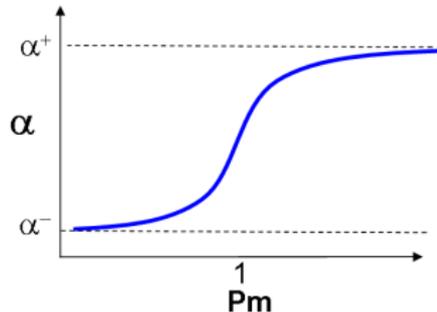
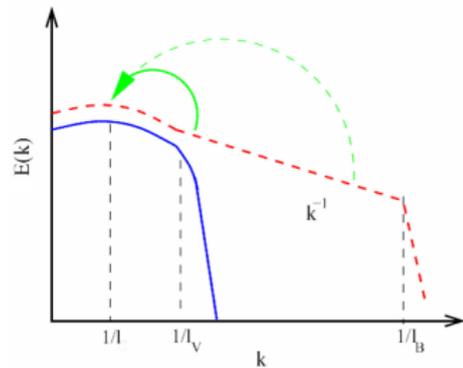


# Effet du nombre de Prandtl

Phénoménologie proposée

- Turbulence en milieu homogène isotrope &  $Pm > 1$ , spectre en  $k^{-1}$  (Cho, Lazarian & Vishniac)
- Réaction de la région en  $k^{-1}$  sur les grandes échelles ( $1/l$ ) ?
- Lorsque  $Pm$  augmente, la réaction devrait saturer

- Courbe  $Pm - \alpha$  attendue
- Que valent  $\alpha^+$  et  $\alpha^-$  ?



# Instabilité Magnéto-rotationnelle

## Conclusions

- Les effets *non idéaux* (petite échelle) semblent avoir un effet sur le transport (grande échelle) (Lesur & Longaretti 2007)
- Les études numériques devraient se concentrer sur le contrôle de la dissipation numérique (Fromang et al. 2007a et b)
- L'efficacité réelle de la MRI dans les vrais disques reste incertaine

## Perspectives

- Prise en compte de la stratification verticale
- Rôle des autres termes non idéaux (MHD Hall, ...)
- Rôle des conditions aux limites radiales (shearing sheet/murs)

# Instabilité Magnéto-rotationnelle

## Conclusions

- Les effets *non idéaux* (petite échelle) semblent avoir un effet sur le transport (grande échelle) (**Lesur & Longaretti 2007**)
- Les études numériques devraient se concentrer sur le contrôle de la dissipation numérique (Fromang et al. 2007a et b)
- L'efficacité réelle de la MRI dans les vrais disques reste incertaine

## Perspectives

- Prise en compte de la stratification verticale
- Rôle des autres termes non idéaux (MHD Hall, ...)
- Rôle des conditions aux limites radiales (shearing sheet/murs)

# Instabilité Magnéto-rotationnelle

## Conclusions

- Les effets *non idéaux* (petite échelle) semblent avoir un effet sur le transport (grande échelle) (**Lesur & Longaretti 2007**)
- Les études numériques devraient se concentrer sur le contrôle de la dissipation numérique (Fromang et al. 2007a et b)
- L'efficacité réelle de la MRI dans les vrais disques reste incertaine

## Perspectives

- Prise en compte de la stratification verticale
- Rôle des autres termes non idéaux (MHD Hall, ...)
- Rôle des conditions aux limites radiales (shearing sheet/murs)

# Sommaire

- 1 Le transport dans les disques d'accrétion
- 2 Instabilité Sous-Critique
- 3 Instabilité Strato-Rotationnelle
- 4 Instabilité Magnéto-Rotationnelle
- 5 Conclusions et perspectives**

# Résumé (1)

- Aspects Numériques
  - Développement d'un code spectral 3D MHD pour les disques d'accrétion
  - Développement d'un code aux différences finies d'ordre élevé pour les problèmes non périodiques
  - Contrôle des phénomènes dissipatifs
  - Parallélisation massive (SCCI, CIMENT, IDRIS) ~ 22 ans et 10 mois de calcul cumulé
- Instabilité sous-critique hydrodynamique
  - Mise en évidence d'une instabilité sous-critique dans les écoulements cisailés en rotation
  - Transport éventuellement dû à l'instabilité sous-critique beaucoup trop faible dans les disques astrophysiques

# Résumé (1)

- Aspects Numériques
  - Développement d'un code spectral 3D MHD pour les disques d'accrétion
  - Développement d'un code aux différences finies d'ordre élevé pour les problèmes non périodiques
  - Contrôle des phénomènes dissipatifs
  - Parallélisation massive (SCCI, CIMENT, IDRIS) ~ 22 ans et 10 mois de calcul cumulé
- Instabilité sous-critique hydrodynamique
  - Mise en évidence d'une instabilité sous-critique dans les écoulements cisailés en rotation
  - Transport éventuellement dû à l'instabilité sous-critique beaucoup trop faible dans les disques astrophysiques

# Résumé (1)

- Aspects Numériques
  - Développement d'un code spectral 3D MHD pour les disques d'accrétion
  - Développement d'un code aux différences finies d'ordre élevé pour les problèmes non périodiques
  - Contrôle des phénomènes dissipatifs
  - Parallélisation massive (SCCI, CIMENT, IDRIS) ~ 22 ans et 10 mois de calcul cumulé
- Instabilité sous-critique hydrodynamique
  - Mise en évidence d'une instabilité sous-critique dans les écoulements cisailés en rotation
  - Transport éventuellement dû à l'instabilité sous-critique beaucoup trop faible dans les disques astrophysiques

# Résumé (2)

- Instabilité strato-rotationnelle
  - Instabilité globale, nécessitant des conditions aux limites radiales très restrictives
  - Ne peut expliquer le transport dans l'ensemble d'un disque
- Instabilité magnéto-rotationnelle
  - Rôle des effets non idéaux (résistivité et viscosité) sur l'efficacité du transport dans les disques ?
  - Comportement non stationnaire en champ magnétique fort ?

# Résumé (2)

- Instabilité strato-rotationnelle
  - Instabilité globale, nécessitant des conditions aux limites radiales très restrictives
  - Ne peut expliquer le transport dans l'ensemble d'un disque
- Instabilité magnéto-rotationnelle
  - Rôle des effets non idéaux (résistivité et viscosité) sur l'efficacité du transport dans les disques ?
  - Comportement non stationnaire en champ magnétique fort ?

# Résumé (2)

- Instabilité strato-rotationnelle
  - Instabilité globale, nécessitant des conditions aux limites radiales très restrictives
  - Ne peut expliquer le transport dans l'ensemble d'un disque
- Instabilité magnéto-rotationnelle
  - Rôle des effets non idéaux (résistivité et viscosité) sur l'efficacité du transport dans les disques ?
  - Comportement non stationnaire en champ magnétique fort ?

# Perspectives

- Étude du rôle des conditions aux limites (au delà de la « shearing box » ?)
- Construction d'un modèle de transport physiquement cohérent avec la turbulence

## Long terme

- Simulations grandes échelles *LES* à partir de modèles sous-maillages locaux
- Génération d'un champ magnétique grande échelle à partir du disque par effet dynamo ?



# Perspectives

- Étude du rôle des conditions aux limites (au delà de la « shearing box » ?)
- Construction d'un modèle de transport physiquement cohérent avec la turbulence

## Long terme

- Simulations grandes échelles *LES* à partir de modèles sous-maillages locaux
- Génération d'un champ magnétique grande échelle à partir du disque par effet dynamo ?



