Résonance paramétrique dans les disques d'accrétion

PETRI Jérôme
Université d'Utrecht

16/12/2003
Rencontre ASSNA - Orsay

1. But et rappel sur les QPOs
2. Instabilité paramétrique
   - Analyse linéaire
   - Simulations hydrodynamiques 2D
3. Courbes de lumière autour d'un trou noir
4. Conclusion et perspectives

But et rappel sur les QPOs

etablir un nouveau modèle pour les oscillations quasi-périodiques hautes fréquences (kHz QPOs) observées dans les disques d'accrétion autour des objets compacts.

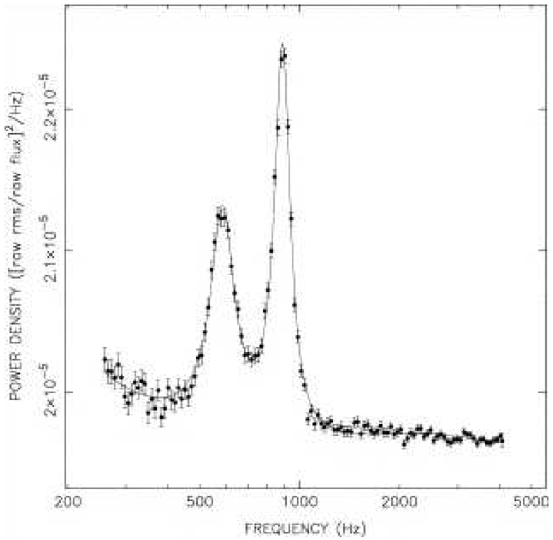
Qu'est-ce qu'une QPO ?

C'est une modulation de l'intensité du spectre X d'un disque d'accrétion dans les binaires X de faible masse (LMXB).

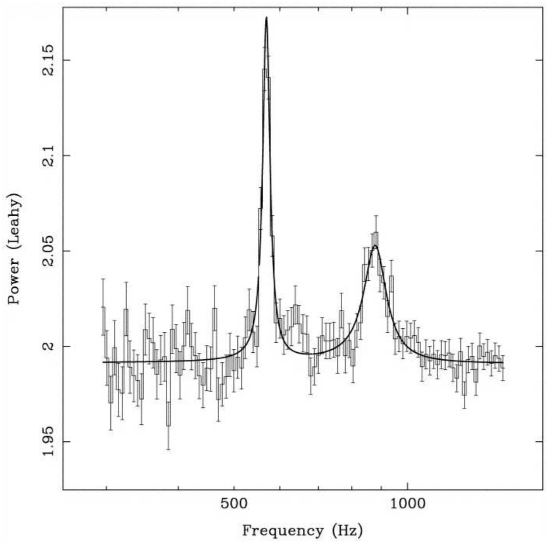
$\longrightarrow$ pic dans le spectre de Fourier de la courbe de lumière.

Détection de pics jumeaux proches de 1 kHz.

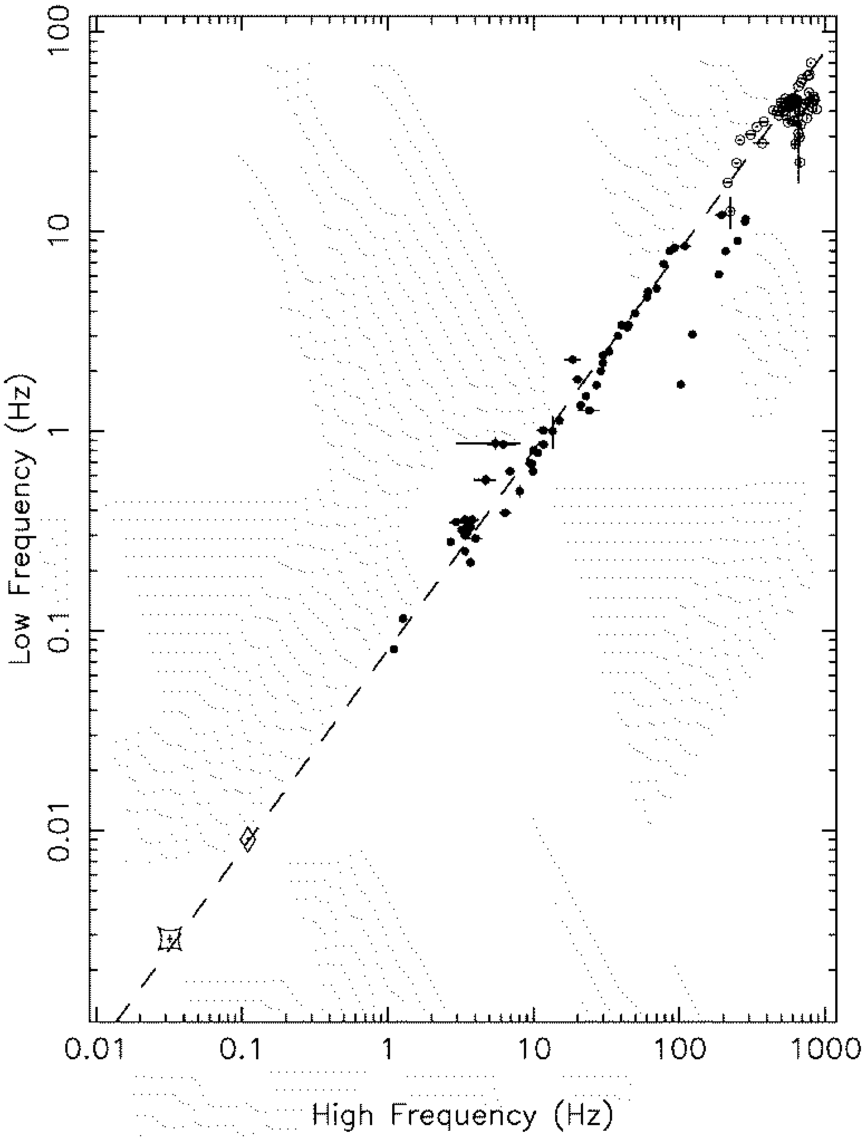
Source Sco X-1



Source 4U1608-52



Corrélation entre les basses ($\leq$10 Hz) et hautes ($\approx$1 kHz) fréquences pour les naines blanches, étoiles à neutrons et les trous noirs.



Ceci suggère l'existence d'un mécanisme physique identique pour les 3 types d'objets compacts.

Idée :

montrer qu'un disque d'accrétion évoluant dans un potentiel gravitationnel (pour les trous noirs) ou un champ magnétique (pour les étoiles à neutrons) non axisymétrique et tournant est sujet à une instabilité de type résonance paramétrique.

Équations de l'hydrodynamique d'un disque d'accrétion possédant un mouvement adiabatique :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}\,(\rho\,\vec{v}) &= 0 \\
\rho\left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\cdot\vec{\nabla}\,)\,\vec{v}\right] &= \rho\,\vec{g} - \vec{\nabla}\,p \\
\frac{D}{Dt}\left(\frac{p}{\rho^{\gamma}}\right) &= 0
\end{aligned}$$

Perturbe l'état d'équilibre en ajoutant une composante non axisymétrique au champ gravitationnel. Introduisant le déplacement Lagrangien $\vec{\xi}$, celui-ci vérifie une équation aux dérivées partielles du deuxième ordre en temps :

$$\begin{aligned}
\rho\,\frac{\partial^2\vec{\xi}}{\partial t^2} + 2\,\rho\,\vec{v}\cdot\vec{\nabla}\,\frac{\partial\vec{\xi}}{\partial t} - \vec{\nabla}(\gamma\,p\,\mathrm{div}\,\vec{\xi} + \vec{\xi}\cdot\vec{\nabla}\,p) - \mathrm{div}\,(\rho\,\vec{\xi}\,\vec{v}\cdot\vec{\nabla}\,\vec{v} - \rho\,\vec{v}\,\vec{v}\cdot\vec{\nabla}\,\vec{\xi}) \\
+\vec{g}\,\mathrm{div}\,(\rho\,\vec{\xi}) + (\mathrm{div}\,(\rho\,\vec{\xi}) - \rho)\,\delta\vec{g} = 0
\end{aligned}$$

3 types de résonance :

- résonance de corotation dans les régions où la vitesse de rotation du disque est égale à celle de l'étoile, possible uniquement dans le cas d'un mouvement prograde ;
- résonance due au forçage dans les régions où la fréquence épicyclique radiale/verticale est égale à la fréquence de rotation du potentiel gravitationnel ;
- résonance paramétrique engendrée par la variation temporelle périodique de la fréquence épicyclique radiale/verticale, (équation de Mathieu).

Les conditions de résonance sont :

- pour la corotation ;

$$\Omega_k = \Omega_* \tag{1}$$

- pour le forçage :

$$2\,(\Omega_* - \Omega_k) = \kappa_{r/z} \tag{2}$$

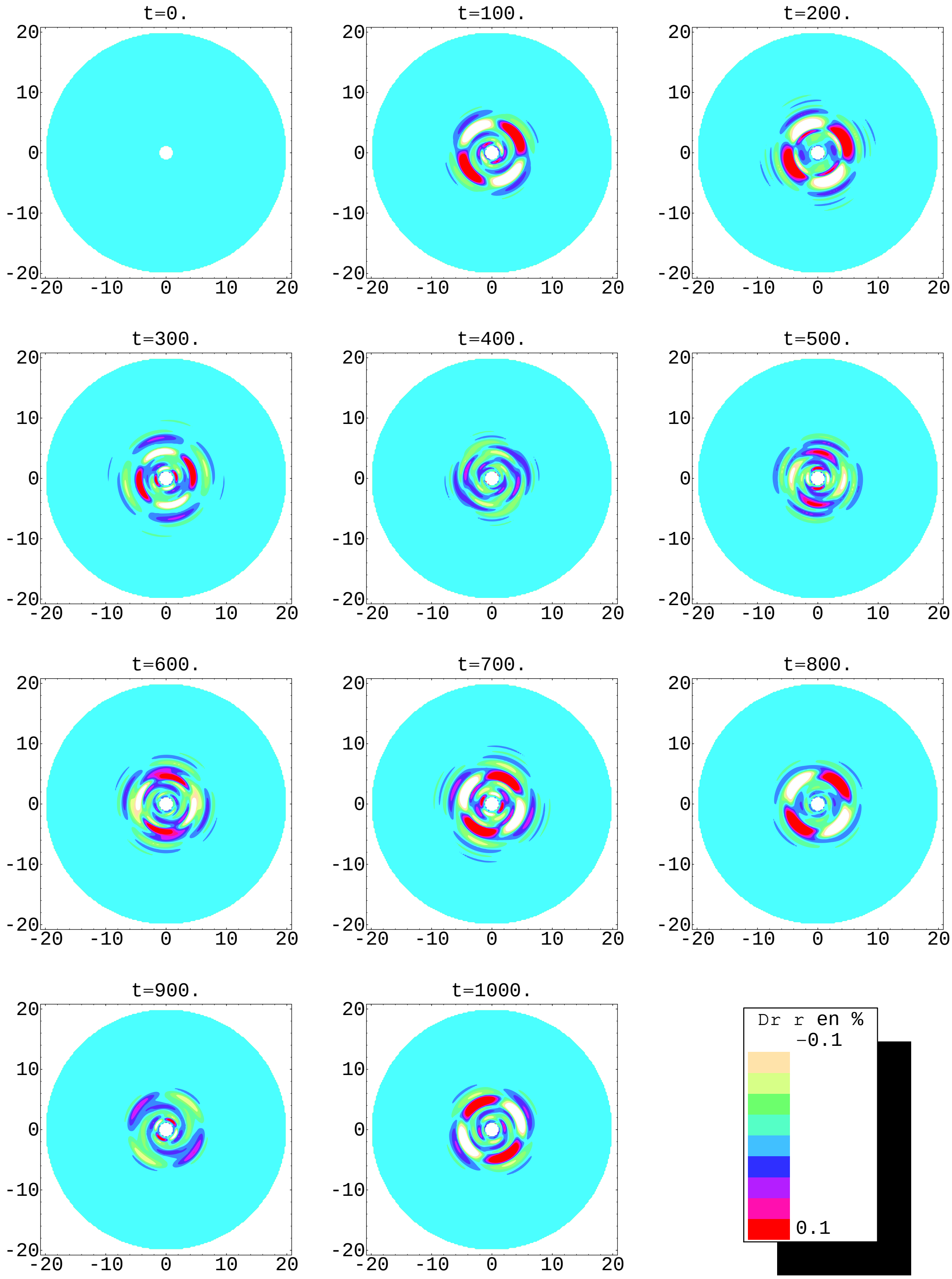
- pour la paramétrique :

$$|\Omega_* - \Omega_k| = \frac{\kappa_{r/z}}{n} \tag{3}$$

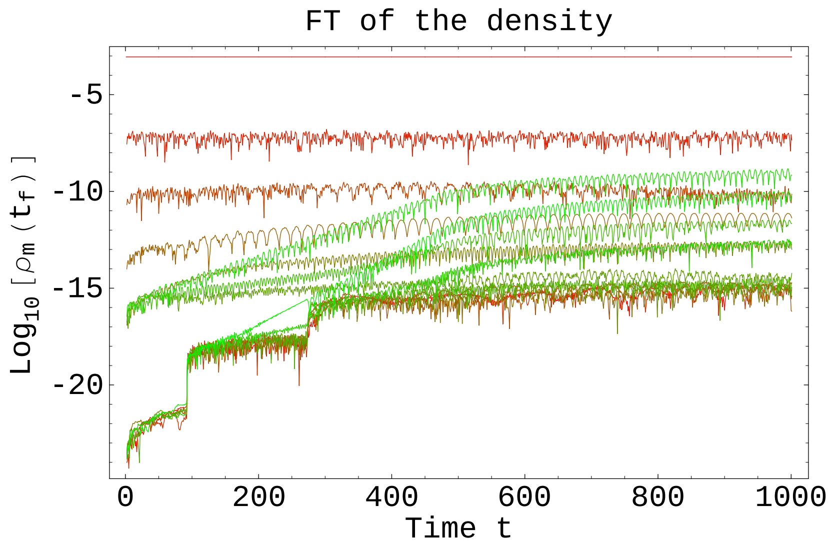
avec n entier et :

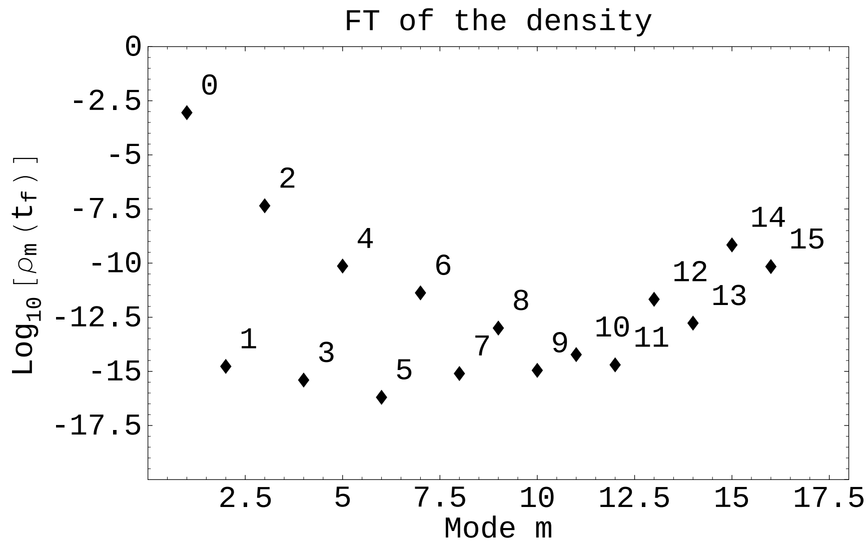
- Ω_*: vitesse de rotation de l'étoile ;
- Ω_k: vitesse de rotation (képlérienne) du disque ;
- $\kappa_{r/z}$: fréquence épicyclique radiale/verticale.

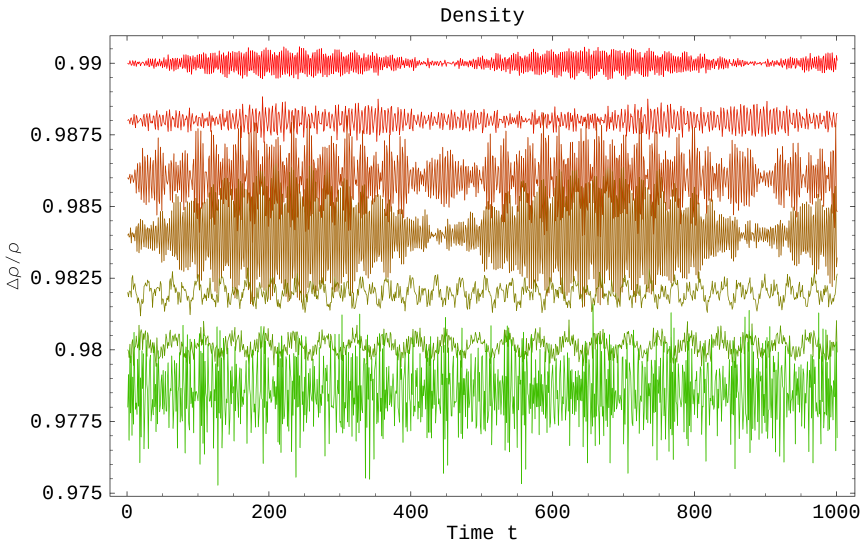
Perturbation en densité dans le disque pour $\Omega_* = 1$

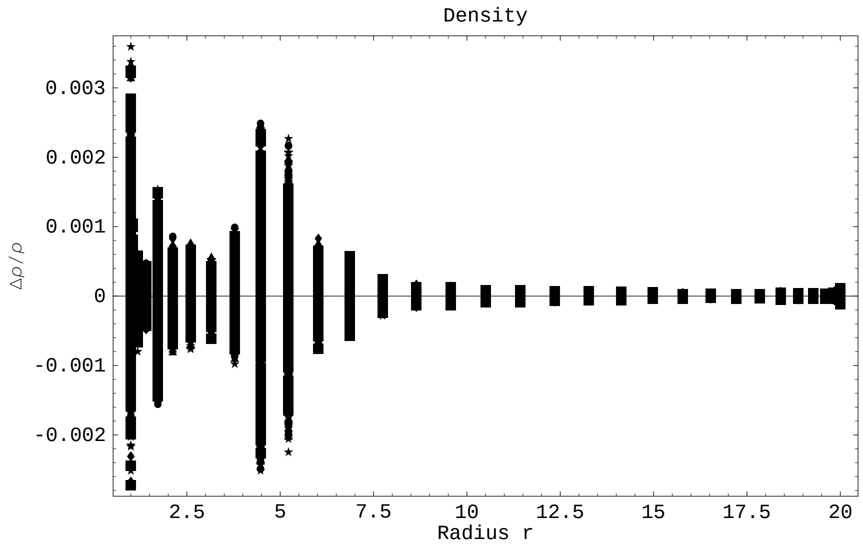


Analyse de Fourier



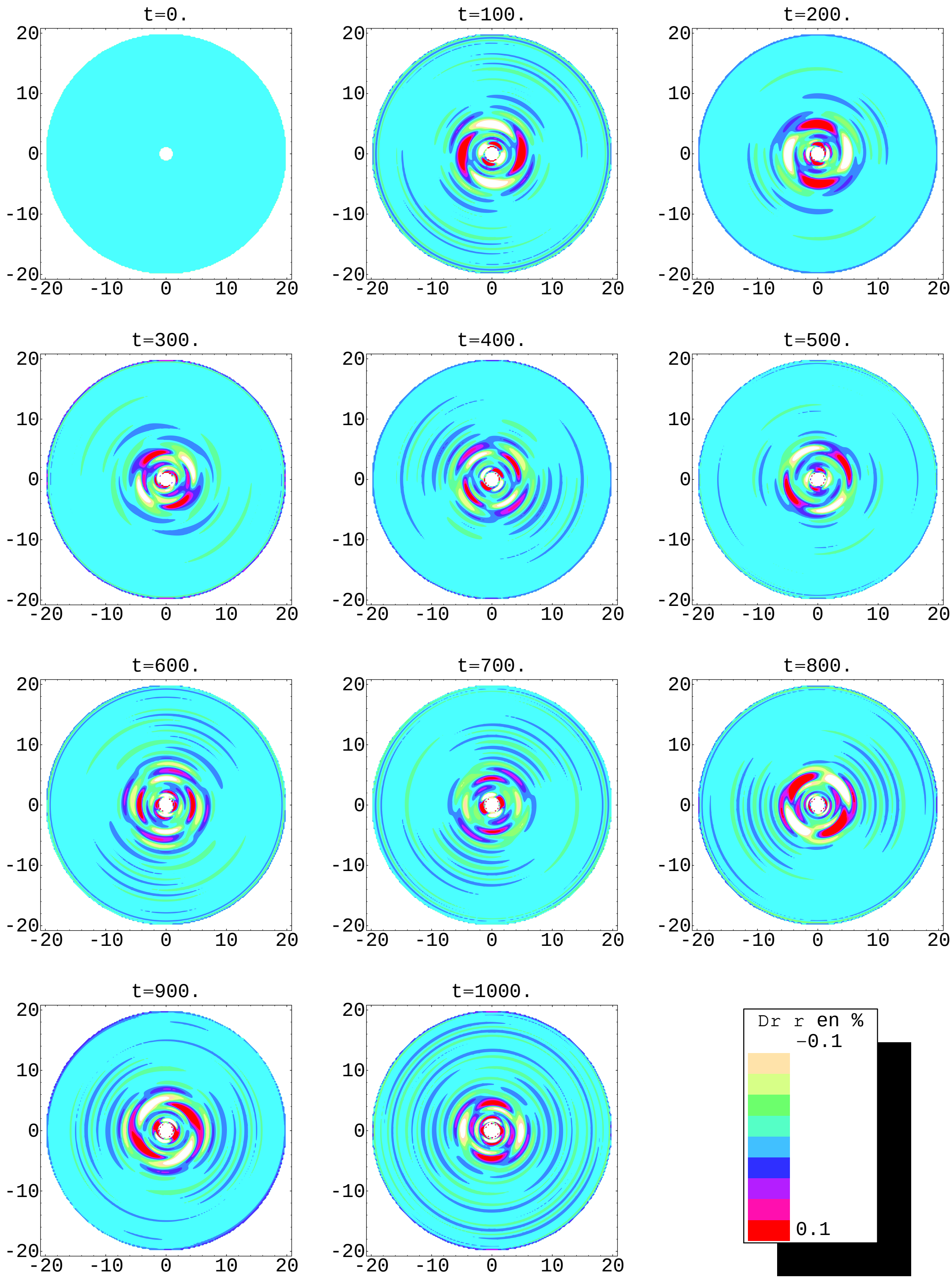




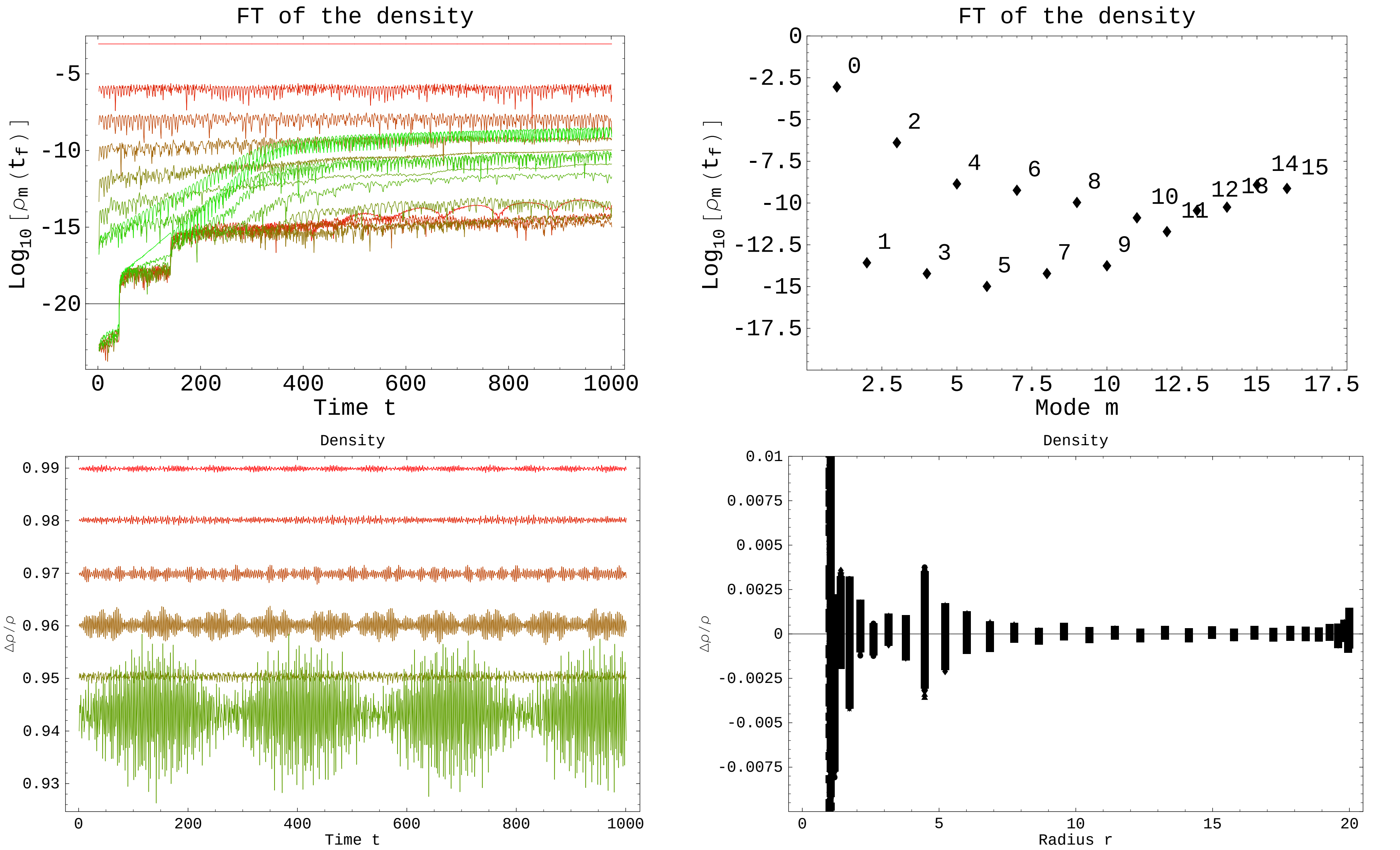


Potentiel pseudo-newtonien: résultats (1)

Perturbation en densité dans le disque pour $\Omega_* = 1$ et $R_s = 1/3$



Analyse de Fourier



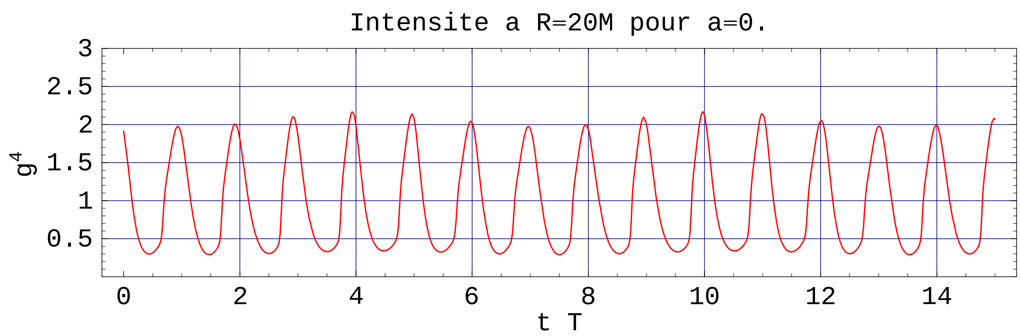
Principales caractéristiques :

- décalage spectral gravitationnel et par effet Doppler ;
- déviation du rayon lumineux dans l'espacetemps courbe.

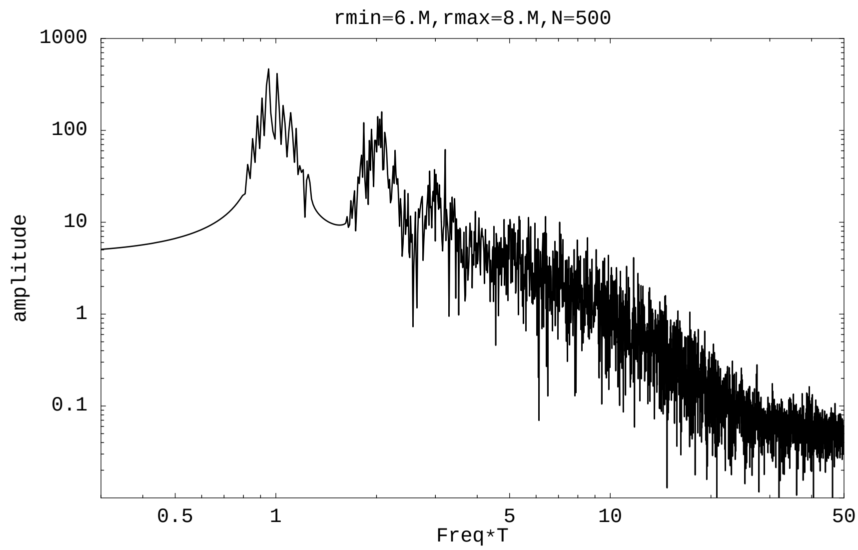
Hypothèses :

- source ponctuelle émettant de manière isotrope et orbitant autour du trou noir ;
- on ne tient compte que de l'image primaire.

Orbite elliptique pour $R = 20\,M$ dans le plan équatorial (métrique de Schwarzschild), $i = 80^o$.



Analyse de Fourier d'un ensemble de 500 sources ponctuelles orbitant entre $R = 6 - 8\,M$, $i = 80^o$.



Pour les disques d'accrétion

- instabilité localisée dans des bandes très étroites ;
- ajouter un terme de viscosité ;
- étendre l'étude de l'instabilité au cas d'un disque d'accrétion soumis à un champ magnétique externe attaché à l'étoile à neutrons.
- terminer la version général-relativiste à 2D et 3D, potentiel gravitationnel non axisymétrique remplacé par l'émission d'ondes gravitationnelles ;
- remplacer l'équation d'état polytropique par un mécanisme de transfert radiatif ;

Pour les courbes de lumière

- prendre en compte la dimension finie de la source de lumière ;
- combiner les codes de simulation des disques d'accrétion et de calcul des courbes de lumière pour confrontation avec les observations.