

# Gravitation Relativiste

LUTH

*Chercheurs permanents:*

Silvano Bonazzola, DR1

Brandon Carter, DR1

Joaquim Diaz, CR1

Ericourgoulhon, CR1

Jérôme Novak, CR2

Christiane Vilain, MDC1

*Post-docs:*

Christian Klein (fév. 2002)

Dorota Gondek-Rosińska

*Thésitifs:*

Nicolas Chamel

Philippe Grandclément

Loïc Villain

# 1

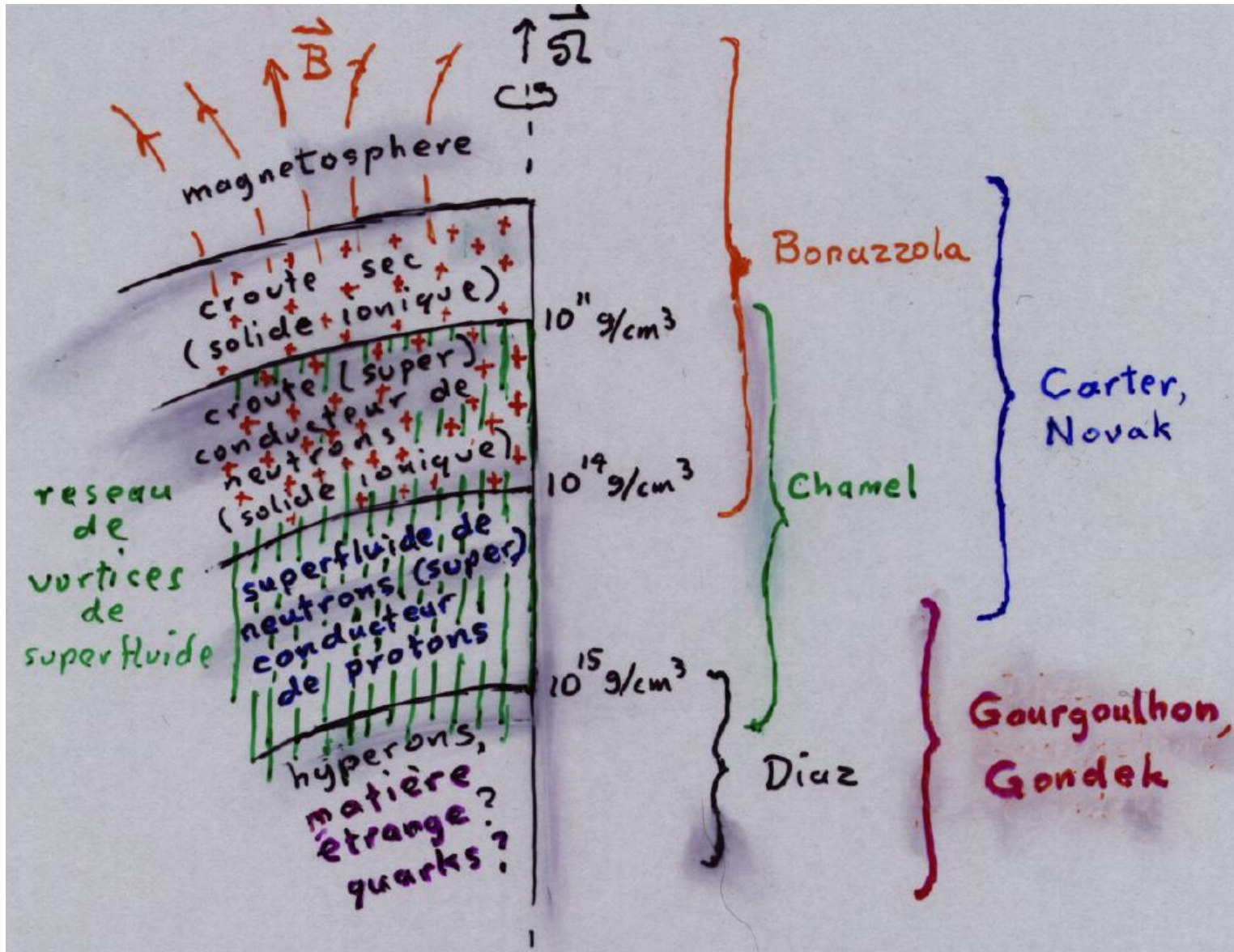
## Physique des objets compacts

1.1 Théorie quantique des champs et équation d'état

1.2 Superfluidité dans les étoiles à neutrons

1.3 Rotation rapide des étoiles à neutrons et des étoiles étranges

# Structure et dynamique interne des étoiles à neutrons au LUTH



## 1.1 Théorie quantique des champs et propriétés de la matière dense

*Cadre du travail de J. Diaz Alonso:*

Etat de la matière à  $\rho > \rho_{\text{nuc}} = 2 \times 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$ : système de protons, neutrons, hypérons relativistes en interaction forte.

Dynamique décrite par un lagrangien effectif, interaction forte modélisée par des échanges de mésons. Approximation de type champ moyen (modèle de Walecka)

*Collaborations: Université d'Oviedo (Espagne)*

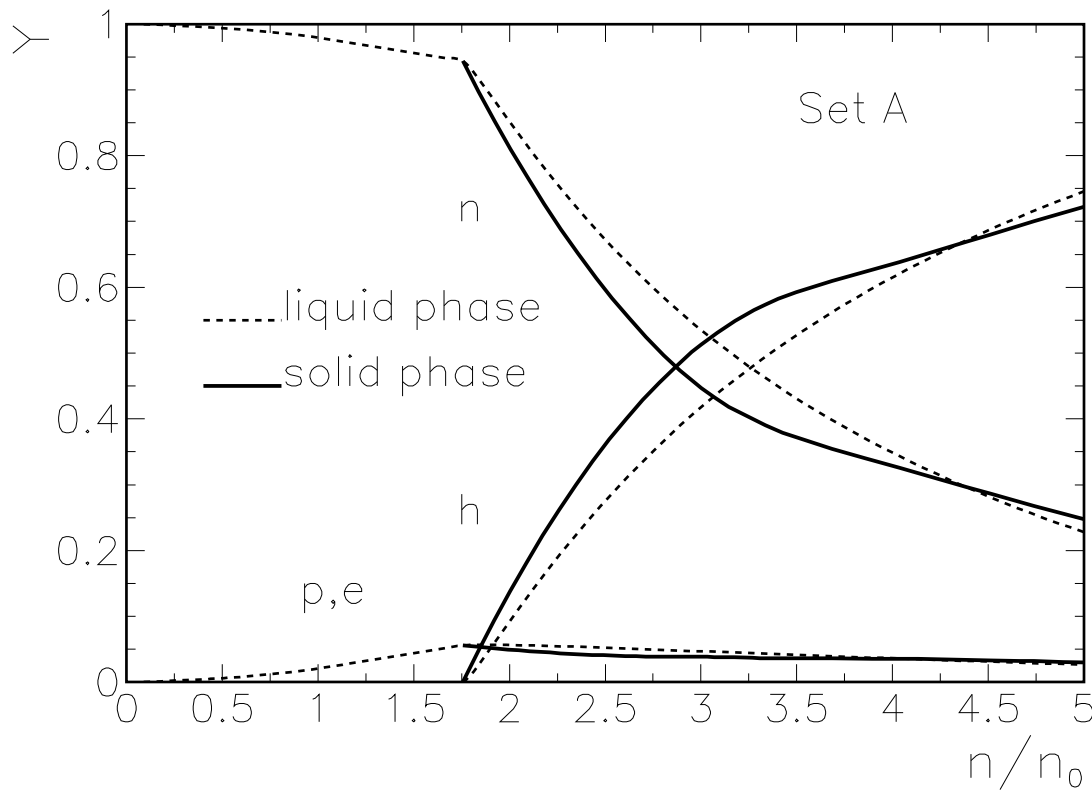
*Résultats récents:* Calcul des effets d'écrantage du milieu sur l'interaction nucléaire  $\implies$  modification importante des coefficients de transport dans la matière hadronique.

*Diaz Alonso & Mornas, Nucl. Phys. A 629, 679 (1998).*

*Diaz Alonso & Mornas, Phys. Lett. B 437, 12 (1998).*

*Sivak, Perez & Diaz Alonso, Prog. Theor. Phys. 105, N6 (2001).*

## Formation d'un cœur solide d'hypérons dans les étoiles à neutrons



Abondance des neutrons ( $n$ ), protons ( $p$ ) et hypérons  $\Lambda$  ( $h$ ) dans les phases solide et liquide en fonction de la densité baryonique  $n$  ( $n_0 = 0.2 \text{ fm}^{-3}$ ).

*Pérez García, Diaz Alonso, Corte Rodríguez, Mornas, & Suárez Curieses, Nucl. Phys. A, sous presse (2001).*

## 1.2 Superfluidité dans les étoiles à neutrons

*Cadre du travail de B. Carter et J. Novak:*

Théorie relativiste de la superfluidité (Carter, Khalatnikov et Langlois, 90's)

Collaborations: Université de Yerevan (Arménie), Université de Southampton (GB)

*Résultats récents:*

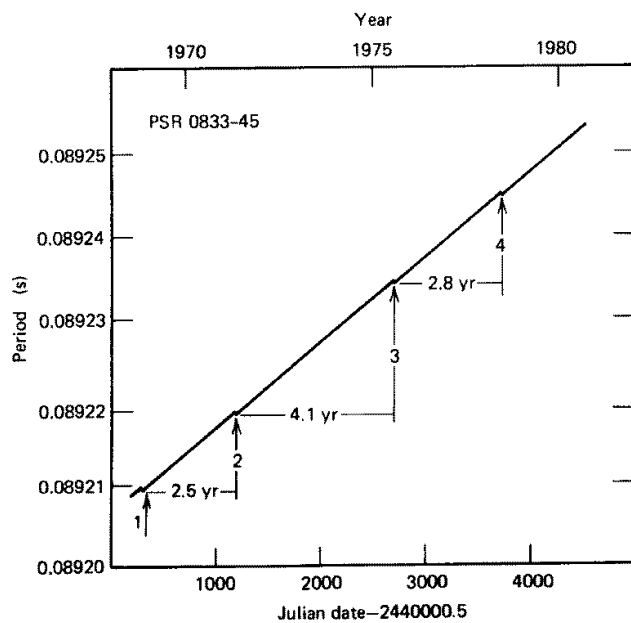
- Traitement des vortex magnétiques dans un supraconducteur en rotation

*Carter, Prix & Langlois, Phys. Rev. B 62, 9740 (2000).*

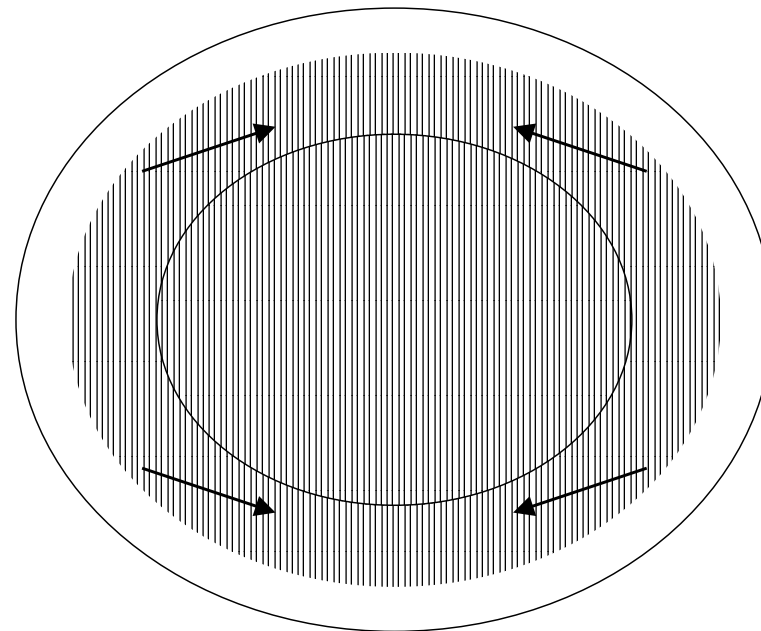
*Carter, Langlois & Prix, Phys. Rev. B 62, 9748 (2000).*

- Modèles numériques globaux d'étoiles à neutrons superfluides en relativité générale
- Incorporation des effets de solidité de la croûte ("pinning" entre le réseau ionique et les vortex du superfluide)

# Nouveau mécanisme pour expliquer les glitches des pulsars



Glitches du pulsar Vela



Flottabilité centrifuge

*Carter, Langlois & Sedrakian, A&A 361, 795 (2000)*

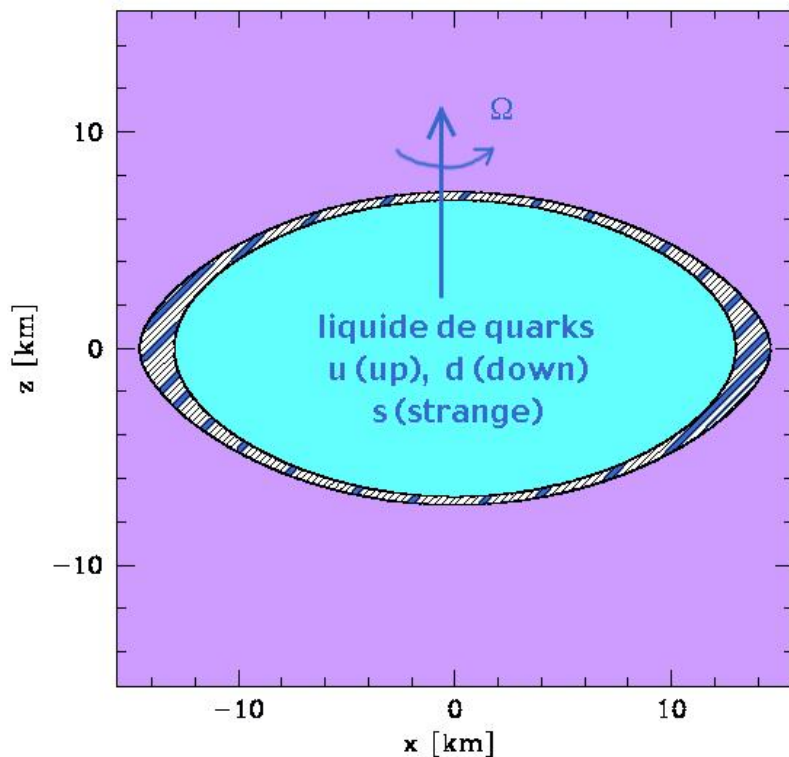
## 1.3 Etoiles étranges en rotation rapide

*Cadre du travail de E. Gourgoulhon et D. Gondek-Rosińska:*

Etoiles axisymétriques et stationnaire en relativité générale

Etat fondamental de la matière dense: plasma de quarks u, d, s déconfinés  
(*matière étrange*)

Collaborations: Centre Astronomique Nicolas Copernic, Varsovie (Pologne)

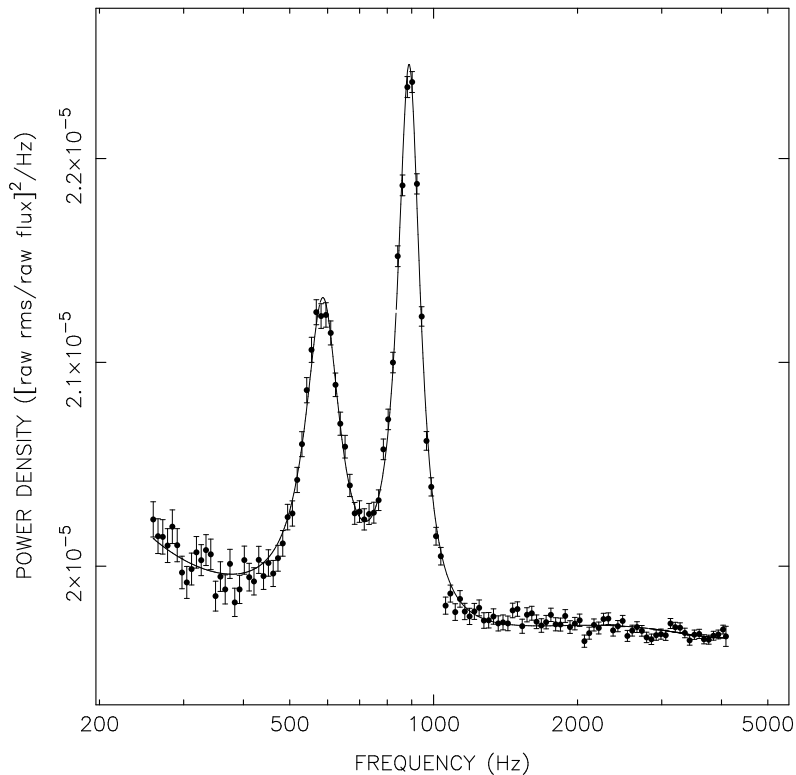


Modèle numérique d'étoile étrange de  $1.6M_{\odot}$ , en rotation à  $f = 1210$  Hz

*Zdunik, Haensel & Gourgoulhon, A&A 372, 535 (2001)*



## Contraintes observationnelles: QPO dans les binaires X



Oscillations quasi-périodiques observées dans la binaire X Sco X-1 par le satellite RXTE (1996)

*Interprétation "standard":*  $\max f_2 =$  fréquence de la dernière orbite stable autour de l'étoile

*Gondek-Rosińska et al., A&A 363, 1005 (2000)*

*Zdunik, Haensel, Gondek-Rosińska & Gourgoulhon, A&A 356, 612 (2000)*

*Zdunik & Gourgoulhon, Phys. Rev. D 63, 087501 (2001)*

*Zdunik, Haensel & Gourgoulhon, A&A 372, 535 (2001)*

*Gondek-Rosińska, Stergioulas, Bulik, Kluźniak & Gourgoulhon, A&A, sous presse (2001)*

# 2

## Sources d'ondes gravitationnelles

(VIRGO)

2.1 Effondrement gravitationnel en théorie tenseur-scalaire

2.2 Instabilités dans les étoiles à neutrons en rotation (modes inertiels)

2.3 Systèmes binaires d'étoiles à neutrons

2.4 Systèmes binaires de trous noirs

2.5 Equation d'onde

## 2.1 Effondrement gravitationnel

*Cadre du travail de J. Novak:*

Théorie tenseur-scalaire de la gravitation (Damour & Esposito-Farèse 1992)

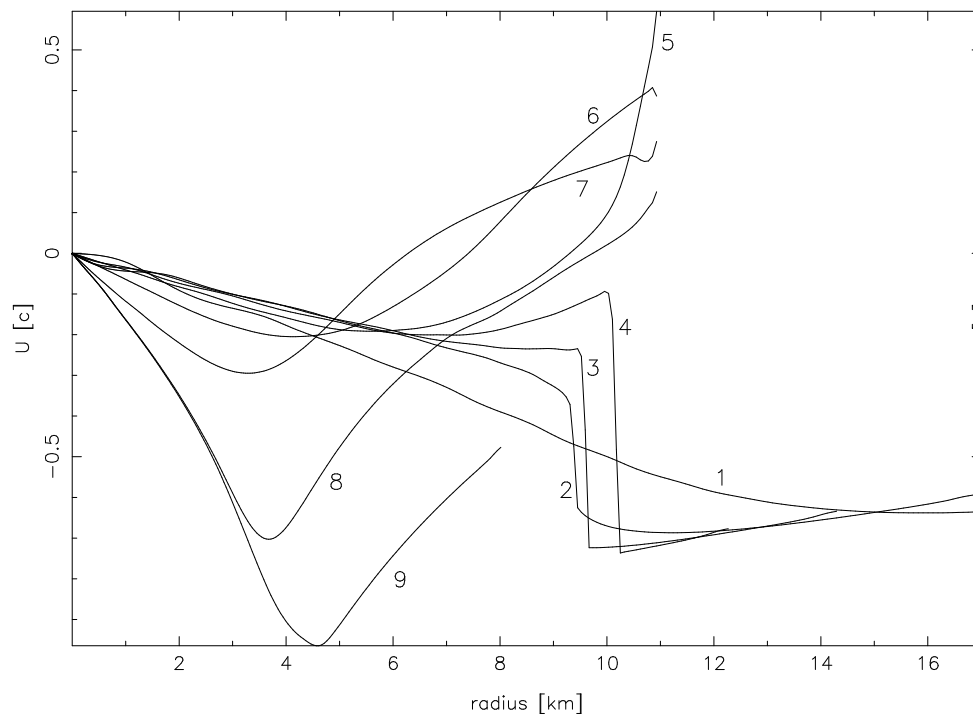
Collaborations: Université de Valencia (Espagne)

- Calcul des ondes gravitationnelles monopolaires émises par une supernova  
*Novak & Ibáñez, ApJ 533, 392 (2000)*
- Effondrement d'une étoile à neutrons et masse minimale d'un trou noir  
*Novak, A&A 376, 606 (2001)*

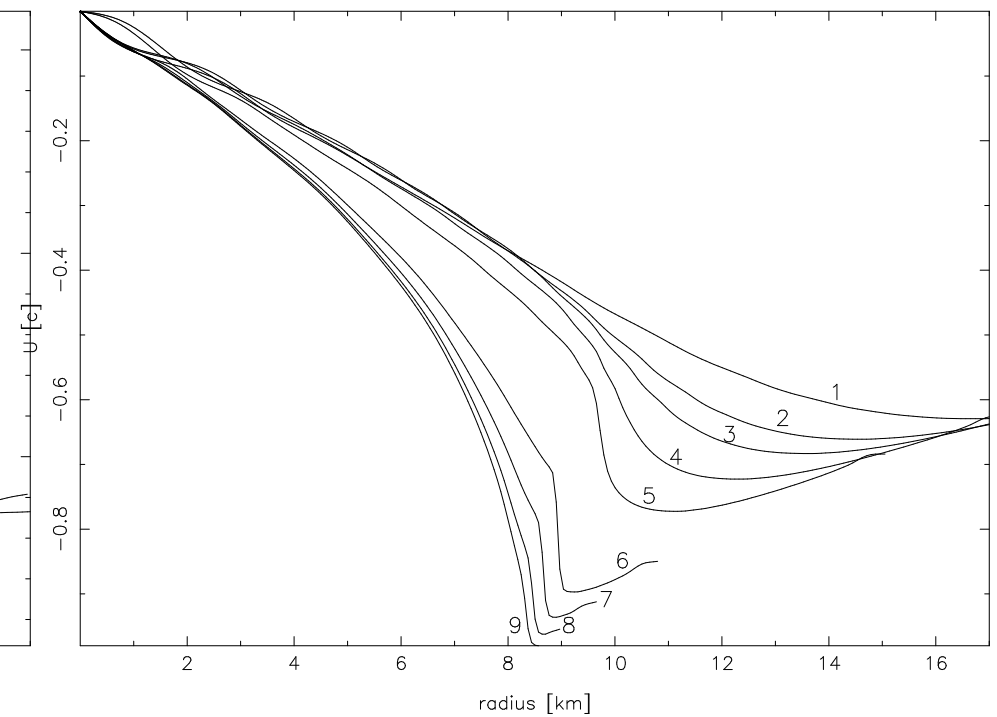
## Masse minimale d'un trou noir

Effondrement gravitationnel d'une étoile à neutrons de masse inférieure à la masse critique, avec une énergie cinétique centripète:

Radial velocity seen by eulerian observer



Radial velocity seen by eulerian observer

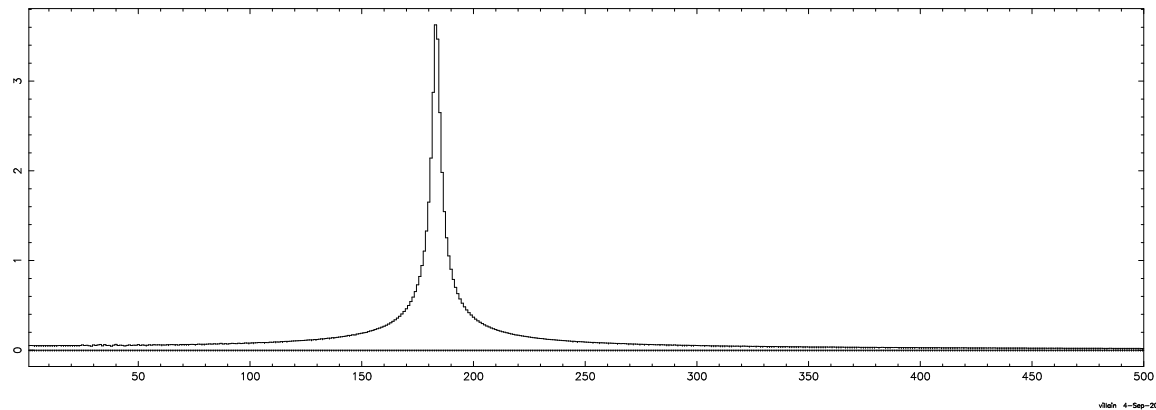
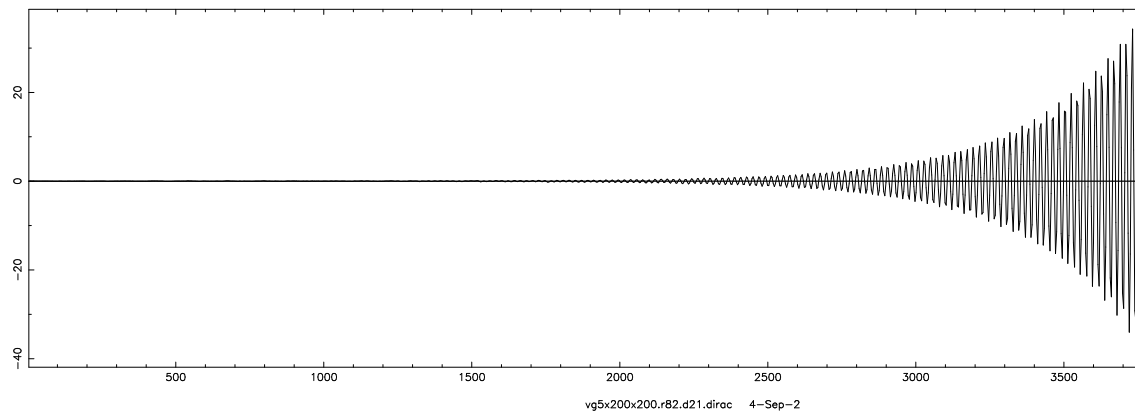


*Novak, A&A 376, 606 (2001)*

## 2.2 Instabilités dans les étoiles à neutrons en rotation

*Cadre du travail de S. Bonazzola et L. Villain:*

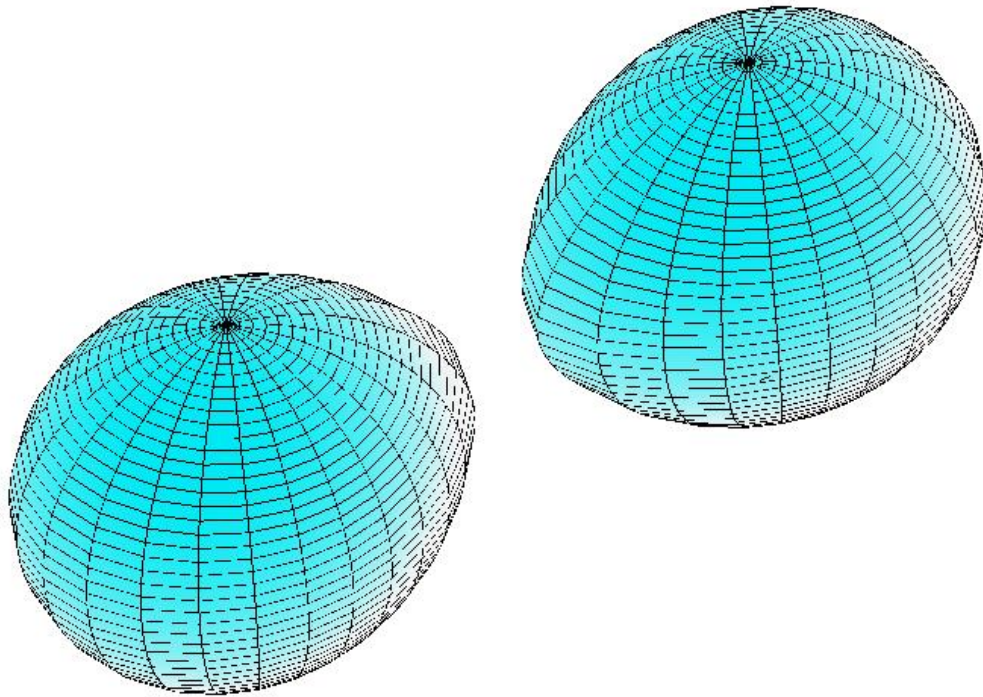
Modes-r ( $\sim$  ondes de Rossby) en régime non-linéaire dans les étoiles à neutrons;  
Approximation anélastique; rotation différentielle.



## 2.3 Systèmes binaires d'étoiles à neutrons

*Cadre du travail de S. Bonazzola, E. Gourgoulhon & P. Grandclément:*

Configurations binaires en relativité générale, dans l'approximation quasi-stationnaire et approximation de Wilson (5/10 eq. Einstein)



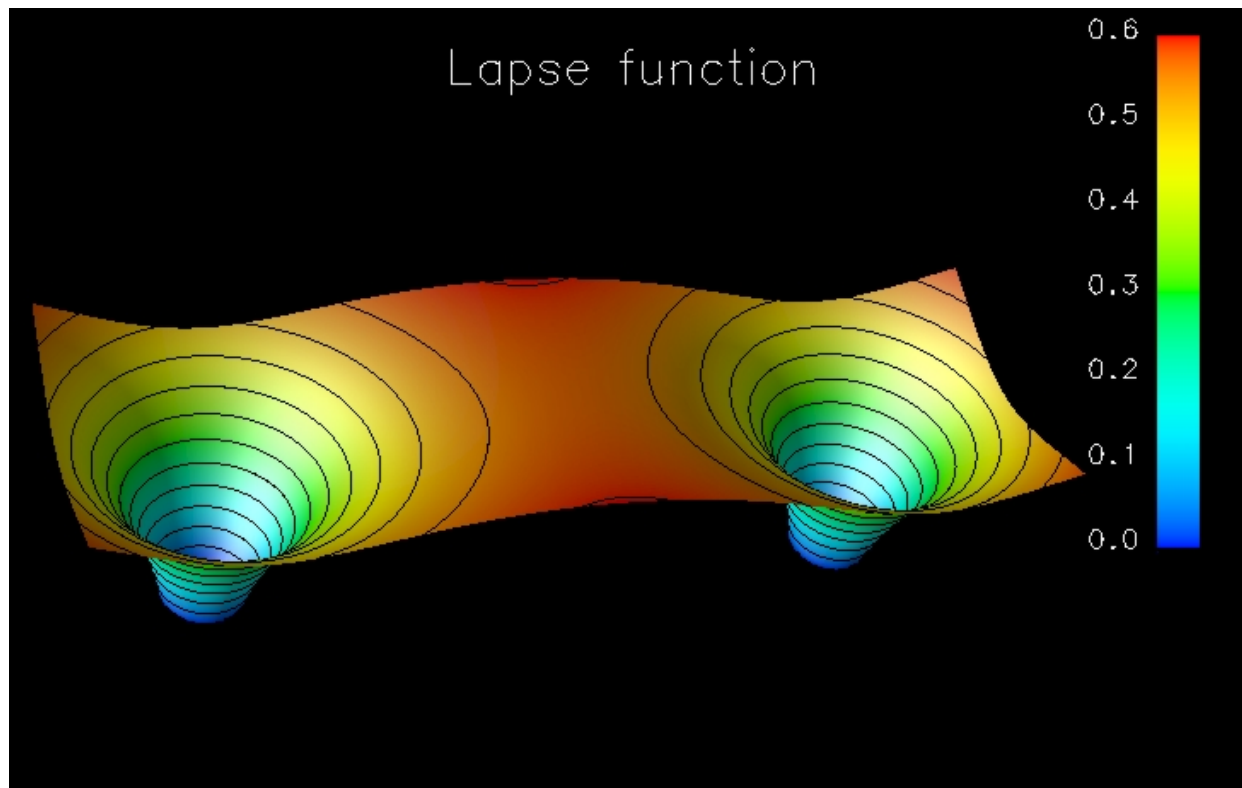
Méthodes spectrales multi-domaines  
(C++/LORENE)

Premiers calculs d'étoiles à neutrons binaires irrotationnelles  $\implies$  résolution du problème de l'effondrement en trou noir avant la coalescence

*Gourgoulhon, Grandclément, Taniguchi, Bonazzola & Marck, Phys. Rev. D **63**, 064029 (2001)*  
*Taniguchi, Gourgoulhon & Bonazzola, Phys. Rev. D **64**, 064012 (2001)*  
*Taniguchi & Gourgoulhon, Phys. Rev. D, soumis [astro-ph/0108086]*

## 2.4 Trous noirs binaires

Premiers calculs réalistes des orbites d'un système binaire de trous noirs



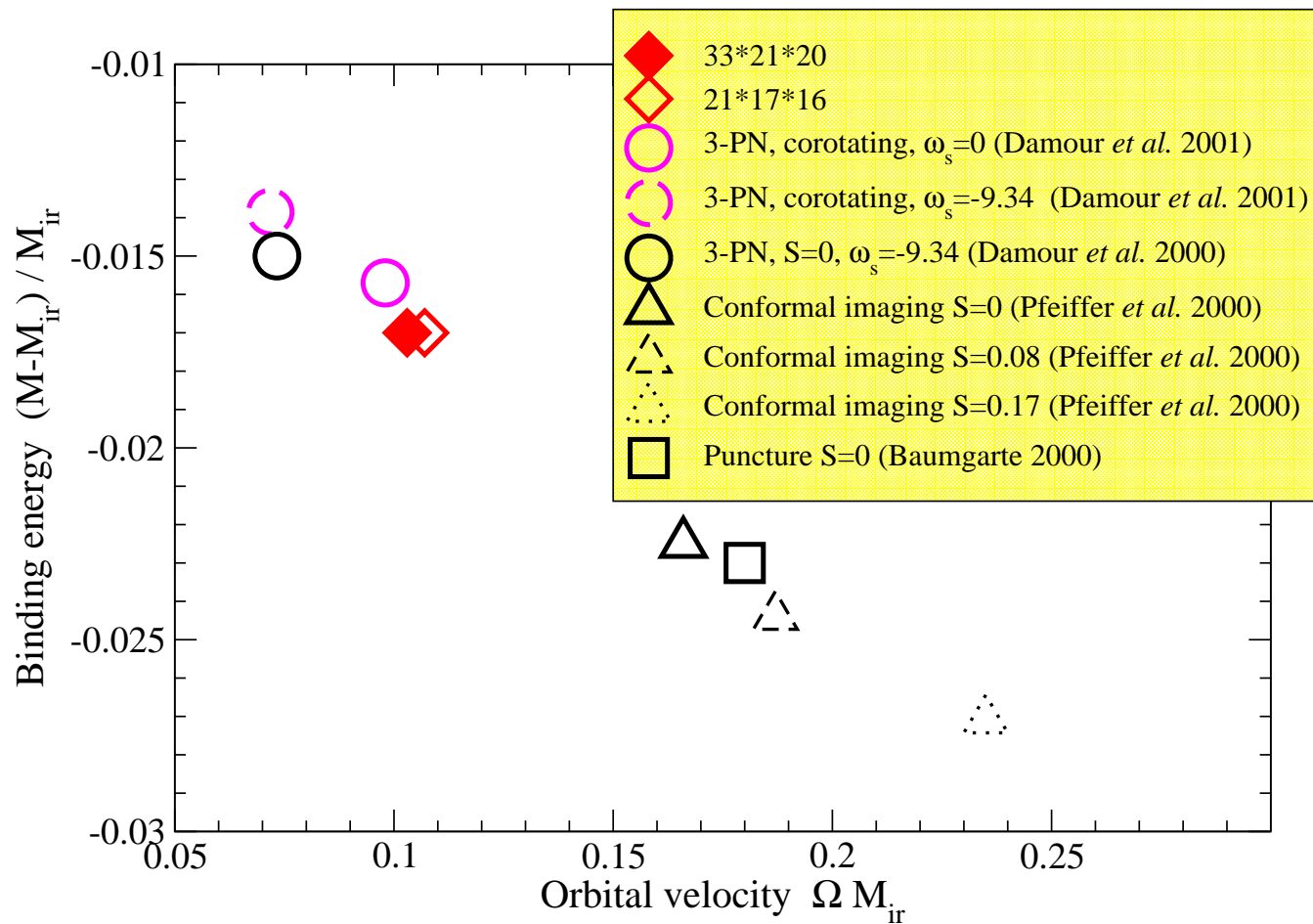
⇒ conditions initiales  
pour les calculs de coa-  
lescence effectués dans le  
cadre du Réseau Européen  
*Sources of gravitational  
waves*

*Gourgoulhon, Grandclément & Bonazzola, Phys. Rev. D, soumis [gr-qc/0106015]*

*Grandclément, Gourgoulhon & Bonazzola, Phys. Rev. D, soumis [gr-qc/0106015]*

# Comparaison avec les calculs post-newtoniens

Position de la dernière orbite stable





## 2.5 Evolution temporelle des equations d'Einstein

Nouvelle méthode numérique pour résoudre l'équation de d'Alembert 3-D avec des conditions d'onde sortante (J. Novak)

