

Ondes gravitationnelles et physique des astres compacts

Jérôme Novak

Journée du LUTH, 13 novembre 2003

Contexte scientifique

- Mise en marche des détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles

VIRGO



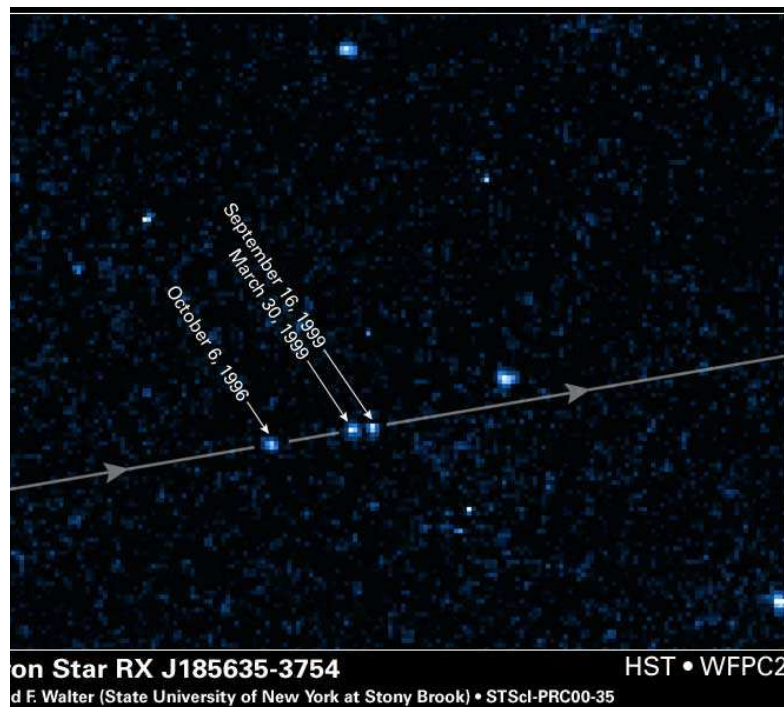
(CNRS/INFN, à
Pise)



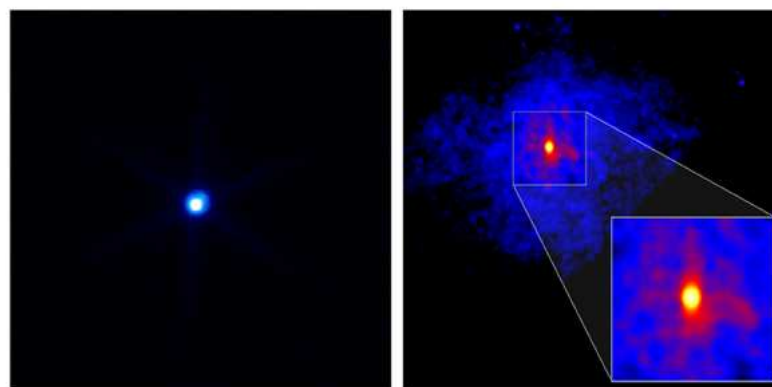
LIGO (NSF, à Livingston
et Hanford)



– Observations d'étoiles à neutrons isolées



3C58 (Chandra) et
RX J185635-3754
(Chandra + HST)



- Manque de données expérimentales sur la matière nucléaire stellaire (noyaux terrestres différents de la matière des étoiles à neutrons)
 - Difficultés d'expérimentation sur le champ gravitationnel fort
 - Accroissement de la puissance et de la mémoire des ordinateurs permettent des modèles plus complets
- ⇒ Modélisation analytique et expérimentation numérique.

Composition de l'équipe

- Silvano Bonazzola (chercheur)
- Brandon Carter (chercheur)
- Élie Chachoua (thésitif)
- Nicolas Chamel (thésitif)
- Joaquin Diaz-Alonso (chercheur)
- Dorota Gondek-Rosińska (post-doc)
- Éricourgoulhon (chercheur)
- Philippe Grandclément (associé, Université de Tours)
- Pawel Haensel (associé, Institut Copernic, Pologne)
- José-Luis Jaramillo (post-doc)
- François Limousin (thésitif)
- Jérôme Novak (chercheur)
- Loïc Villain (associé, Université de Valence, Espagne)

1. Propriétés des étoiles à neutrons et étoiles de quarks
2. Systèmes binaires d'astres compacts
3. Expérimentation numérique
4. Effondrements gravitationnels

Propriétés des étoiles à neutrons et étoiles de quarks

- Étoile à neutrons : cœur composé essentiellement de matière n, p, e à l'équilibre bêta. Équilibre entre gravité et interaction nucléaire forte.
- Étoile de quarks : presque (sauf une fine écorce) entièrement composée de quarks u, d, s déconfinés. Liée par l'interaction forte.

Résultats de l'évolution d'étoiles massives par l'intermédiaire d'une *supernova*.

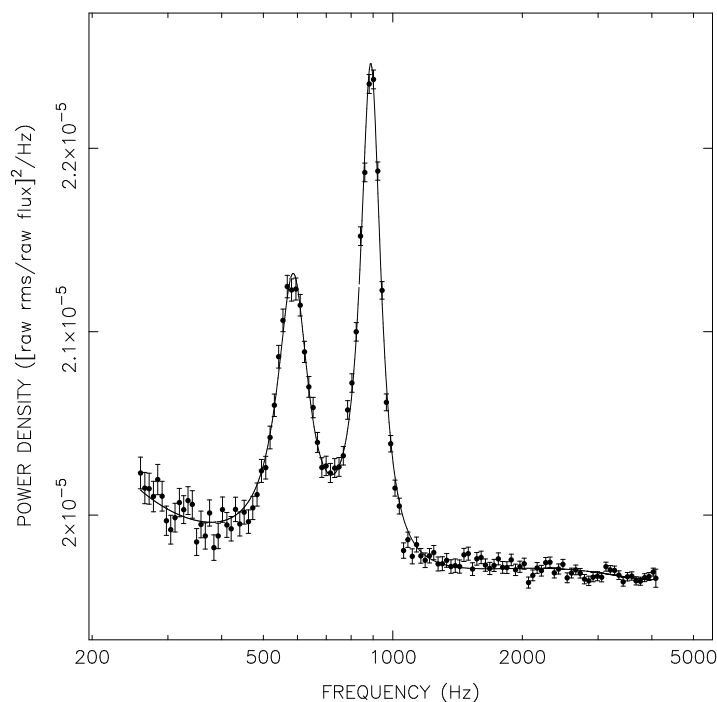
Astres compacts : $M/R \sim 0.2$ très loin des conditions physiques accessibles dans les expériences terrestres.

Études passées / observations — enjeux actuels.

Dernière orbite stable, binaires X

Binaires X de faibles masses (LMXB) montrent des oscillations quasi-périodiques

(QPO)



Fréquence la plus élevée
 \iff fréquence orbitale au-
tour de l'astre

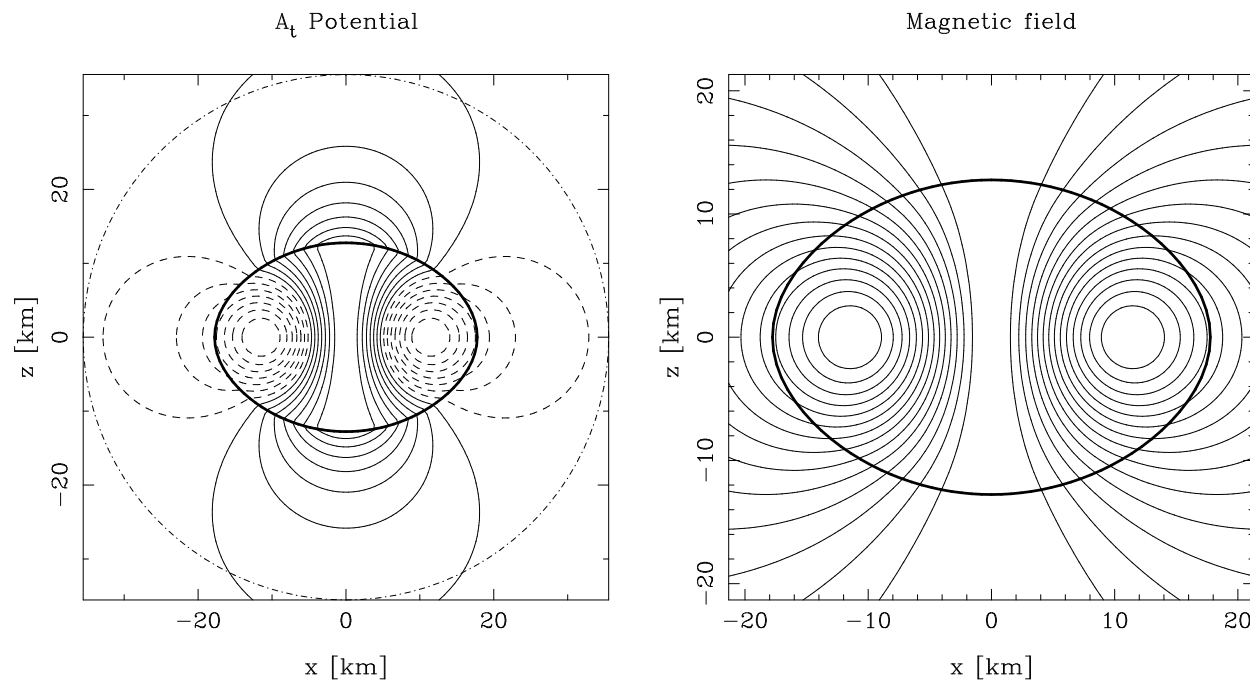
Dernière orbite stable dépend de la nature de l'astre (étoile à neutrons, de quarks) et de l'équation d'état : on pourrait ainsi faire une différence entre les deux.

J.L.Zdunik, P.Haensel, D.Gondek-Rosińska et E.Gourgoulhon, Astron. & Astrophys. 356, (2000).

Champ magnétique, magnétars

Champ magnétique des magnétars $\rightarrow 10^{13}$ T.

Modèles stationnaires d'étoiles en rotation rapide + axe magnétique aligné



Déformation due à la pression magnétique importante que dans le cas des magnétars :

M.Bocquet, S.Bonazzola, E.Gourgoulhon et J.N., Astron. & Astrophys. 301,(1995).

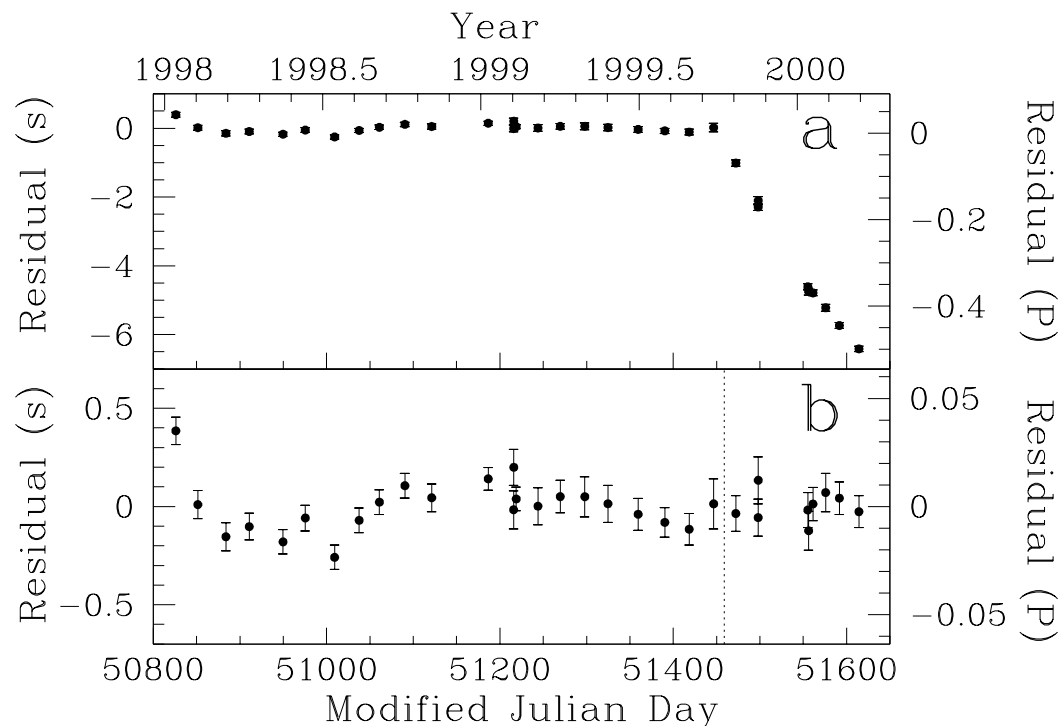
Possibilité d'émission d'ondes gravitationnelles : *S.Bonazzola et E.Gourgoulhon, Astron. & Astrophys. 312,(1996).*

Rapport gyromagnétique : *J.N. et E.Marcq, Class. Quant. Grav. 20, (2003).*

Superfluidité, écorce et glitches

Glitches observés sur plusieurs pulsars ...

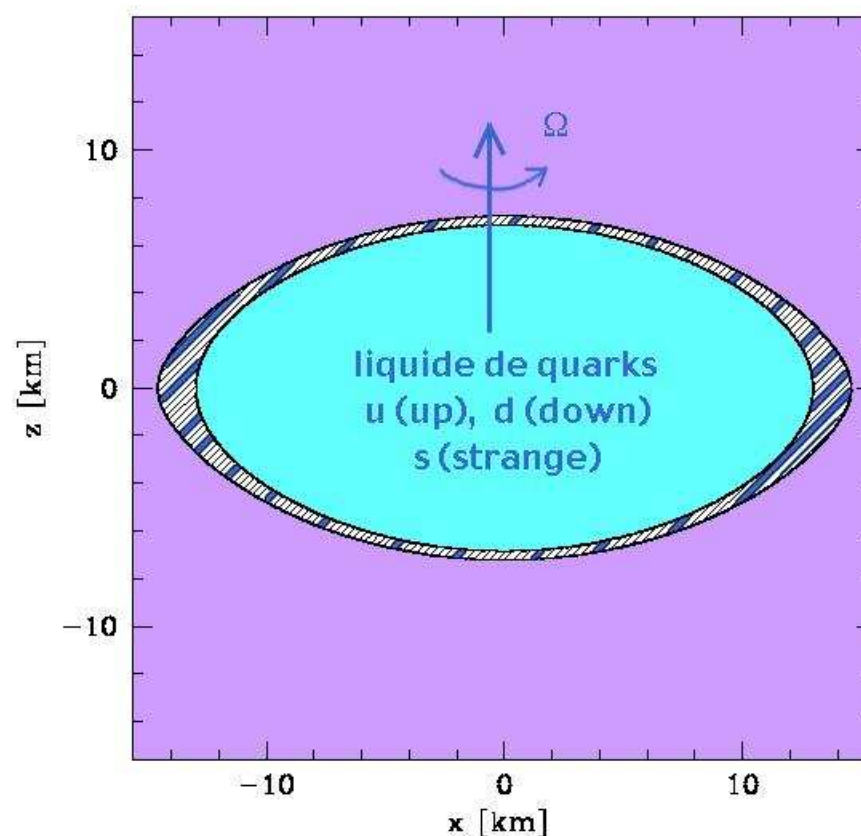
Augmentation soudaine de
la fréquence
⇒ composante rigide.



Composante superfluide (neutrons) tournant plus vite que l'écorce (freinée), transfert de moment cinétique de l'une vers l'autre : *B.Carter, D.Langlois et D.Sedrakian, Astron. & Astrophys. 361, (2000).*

Écorce autour d'étoiles de quarks

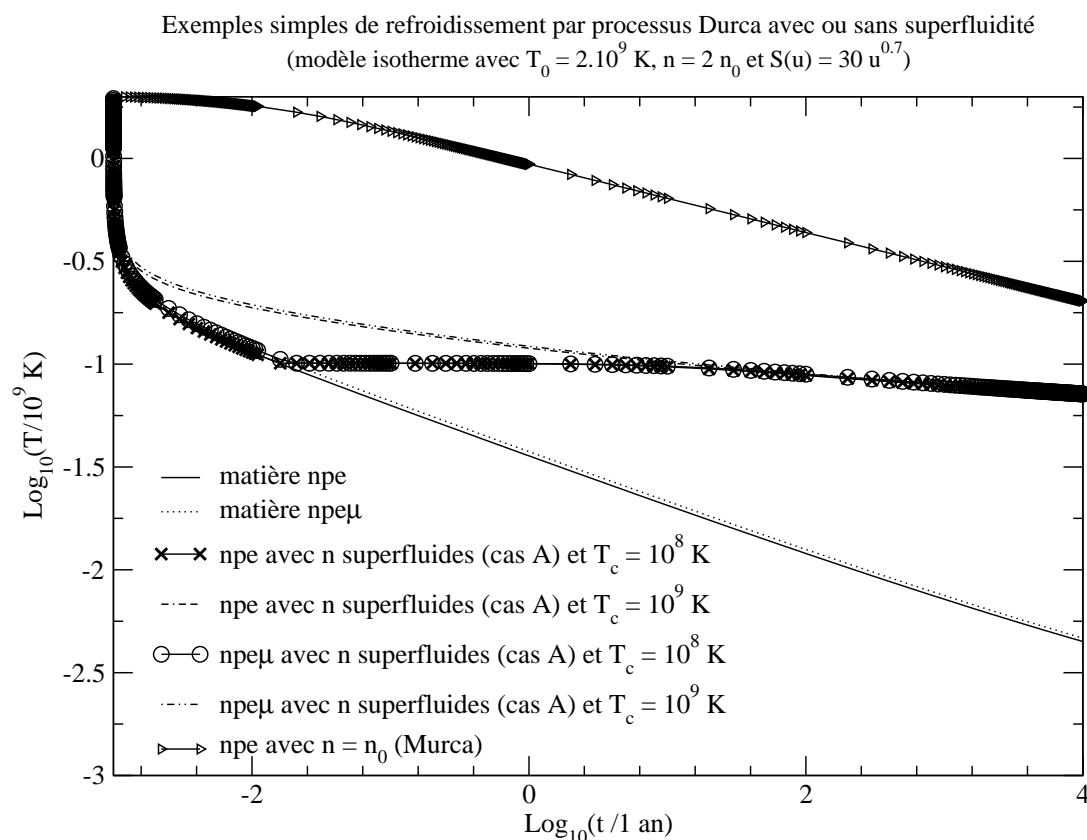
Nécessité d'une écorce de matière "normale" autour d'étoile de quarks.



Influence sur la dernière orbite stable (importante pour les QPO) : *J.L.Zdunik, P.Haensel et E.Gourgoulhon, *Astron. & Astrophys.* **372**, (2001).*

Émissions en X d'étoiles à neutrons isolées

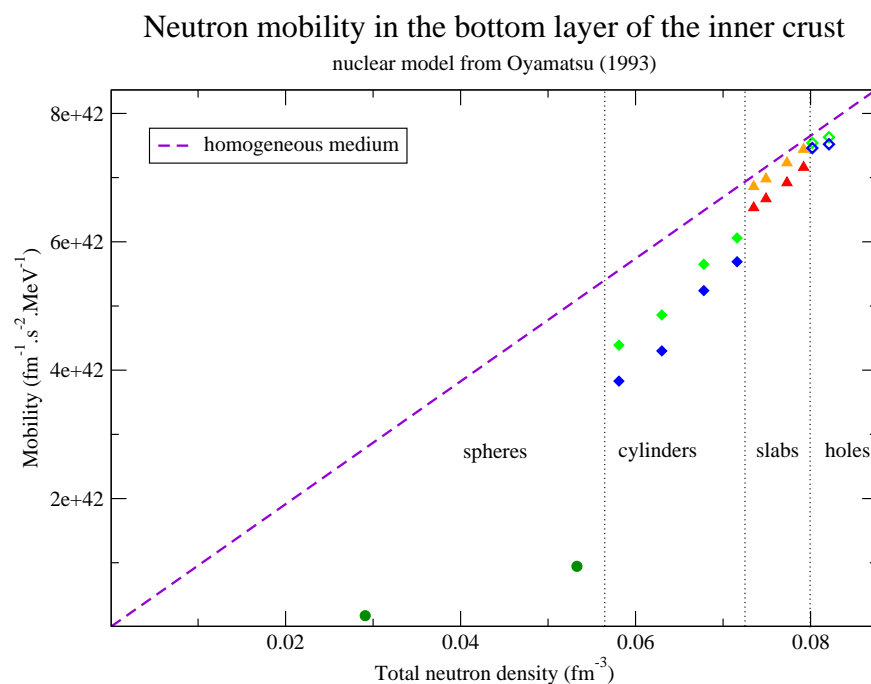
Mesures du refroidissement d'étoiles à neutrons de quelques centaines d'années (Crabe, Vela, ...)



Le refroidissement par les neutrinos est assez fortement dépendant des propriétés de la matière (superfluidité, présence de particules exotiques, ...) : *D.G. Yakovlev et P. Haensel, Astron. & Astrophys. 407*, (2003), Cf. aussi la thèse de L. Villain.

Enjeux : astrophysique nucléaire

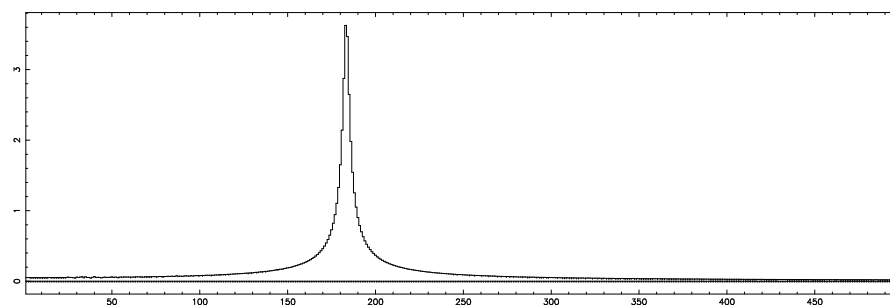
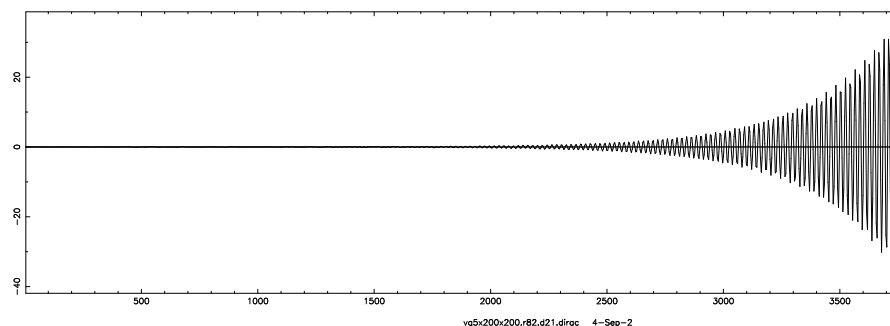
- Description des propriétés de la matière des étoiles à neutrons / étoiles de quarks : J.Diaz-Alonso (réseau cristallin d'hypérons) et P.Haensel (conséquences observables, étude de l'écorce,...) ;
- Propriétés de l'écorce et de l'interface avec le fluide de neutrons : N. Chamel et B.Carter ([astro-ph/0305186](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0305186)) ;
- Modèles d'étoiles à neutrons prenant en compte la superfluidité (2 fluides en RG) : B.Carter et J.Novak (avec R.Prix et G.Comer : [gr-qc/0211105](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0211105))



Enjeux : étoiles isolées comme sources d'ondes gravitationnelles

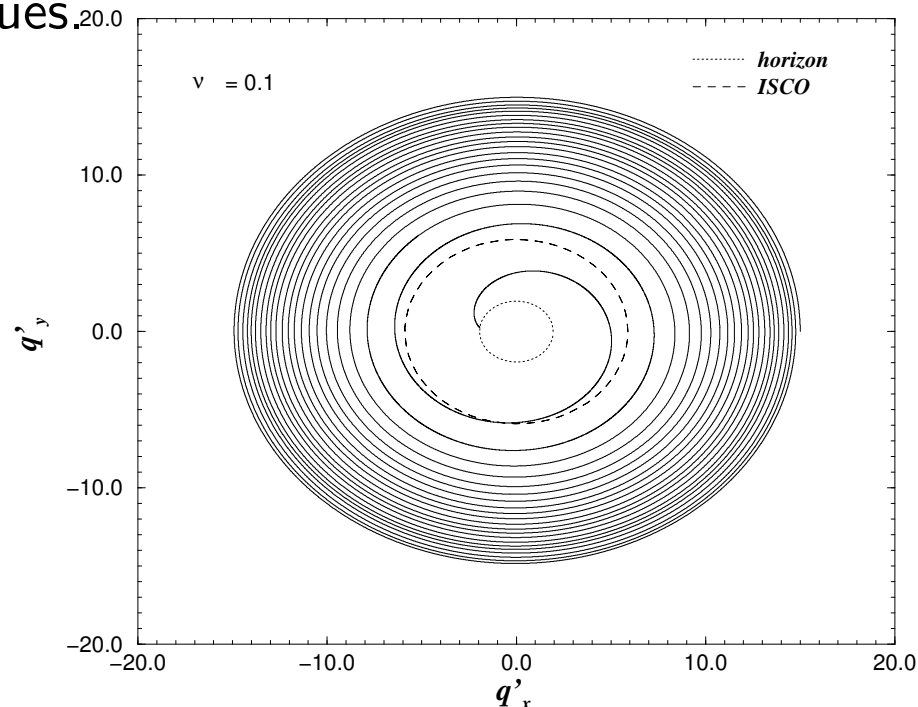
Une étoile en rotation doit être déformée pour émettre des ondes (modification du moment quadrupolaire)

- déformation par le champ magnétique : *S.Bonazzola et E.Gourgoulhon, Astron. & Astrophys. 312*,(1996) ; ou l'écorce
- instabilité séculaire – brisure spontanée de symétrie : D.Gondek-Rosińska, E.Gourgoulhon et P.Haensel [astro-ph/0311128](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0311128)
- instabilité dynamique – modes d'oscillations : *L.Villain et S.Bonazzola, Phys. Rev. D 66*,(2002)



Systèmes binaires d'astres compacts

Ce sont des systèmes relativistes, avec un champ gravitationnel intense et fortement asymétriques.



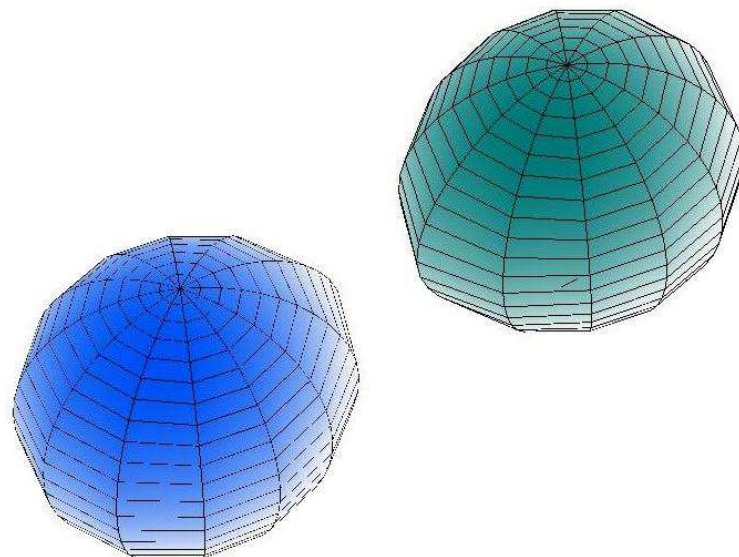
Calculs post-newtoniens supposent des masses ponctuelles.

La dernière étape (fortement dynamique) devrait émettre le plus d'ondes détectables.

⇒ données initiales (quasi-stationnaires) pour l'évolution dynamique.

Étoiles à neutrons binaires

Observation de pulsars binaires → les ondes gravitationnelles existent !



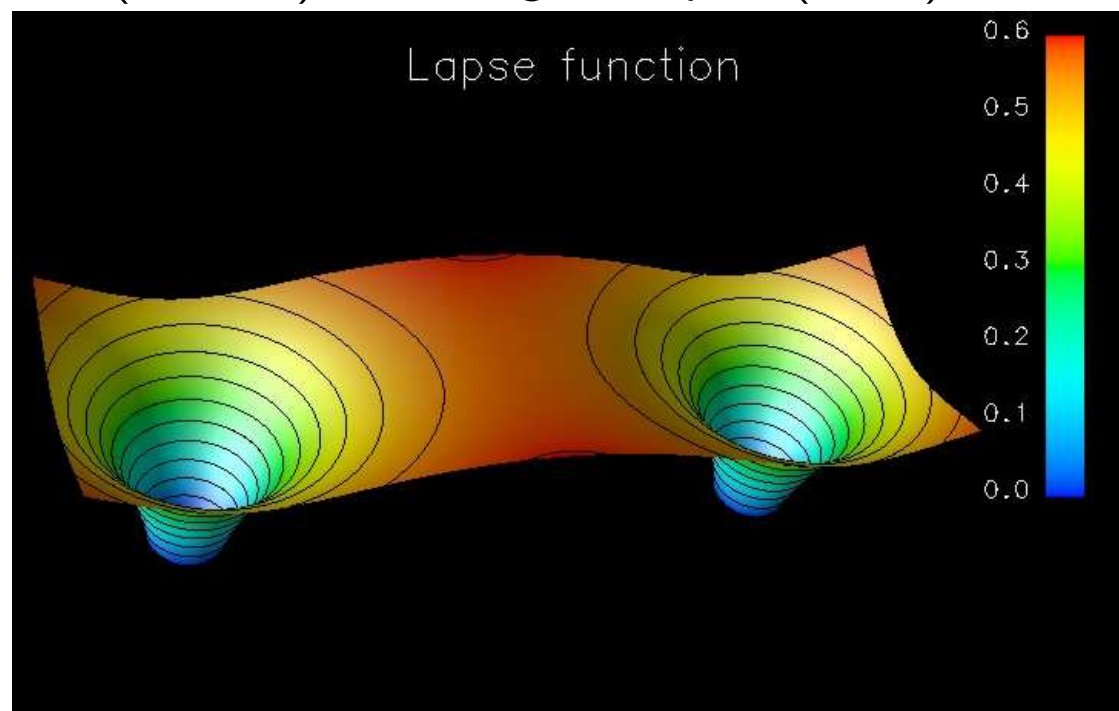
- Hypothèses d'irrotationalité et de quasi-stationnarité
- 5 équations d'Einstein résolues / 10
- Pas d'ondes gravitationnelles, mais informations sur l'évolution du système.

S.Bonazzola, E.Gourgoulhon et J.A.Marck, Phys. Rev. Lett. 82 (1999).

K.Taniguchi et E.Gourgoulhon, Phys. Rev. D 66 (2002).

Trous noirs binaires

Trous noirs stellaires (VIRGO) comme galactiques (LISA) sont intéressants.



- Première simulation “réaliste”
- Bon accord avec les calculs post-newtoniens
- Localisation de la dernière orbite stable primordiale pour le traitement du signal.

P.Grandclément, E.Gourgoulhon et S.Bonazzola, Phys. Rev. D 65 (2002).

T.Damour, E.Gourgoulhon et P.Grandclément, Phys. Rev. D 66 (2002).

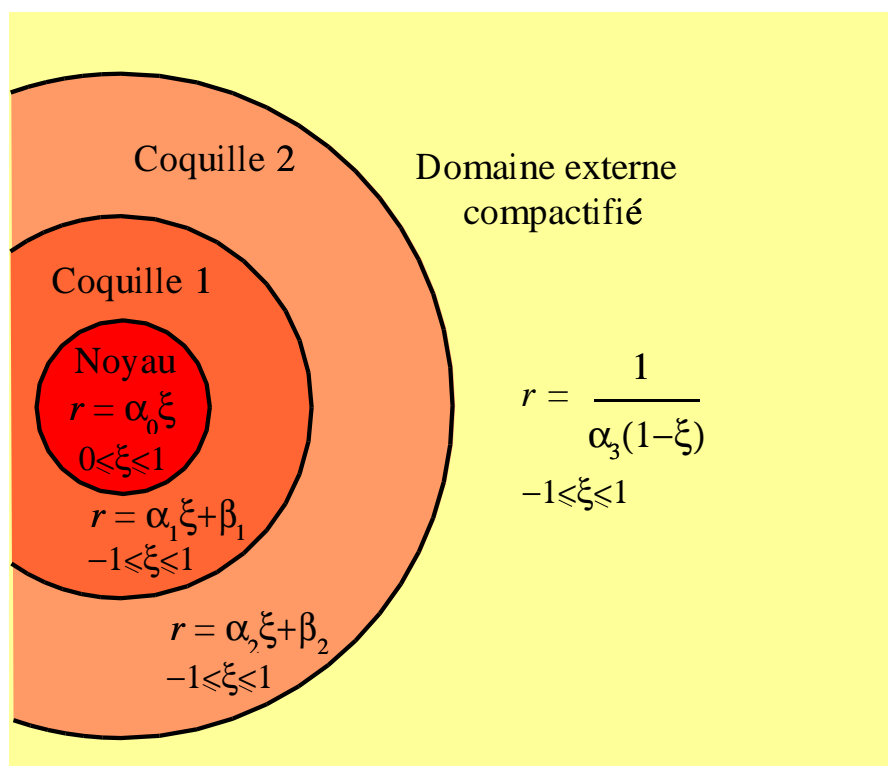
Enjeux : évolution dynamique et résultats de la fusion

- Obtention de *patterns* absolument nécessaire... l'étape de la fusion est peu ou pas connue.
 - amélioration des modèles quasi-stationnaires (étoiles à neutrons comme trous noirs) : résoudre plus précisément les équations du champ (F.Limousin), intégrer plus de “micro-physique”
 - étude de systèmes mixtes : étoile à neutrons / trou noir (P.Grandclément, K.Taniguchi et E.Gourgoulhon) fortement asymétriques. Jamais encore réalisé.
 - évolution dynamique (S.Bonazzola, E.Gourgoulhon, P.Grandclément, et J.N. : [gr-qc/0307082](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0307082), et aussi J.L.Jaramillo et F.Limousin) : formulation des équations, choix de jauge, conditions aux bords, ...
- Question sur l'objet résultant : trou noir, étoile à neutrons (→ trou noir après refroidissement), disque d'accrétion (tore ?), état de rotation, champ magnétique, jets, instabilités,... Lien avec les études de proto-étoiles à neutrons (D.Gondek-Rosińska, L.Villain) ou les sursauts gamma.
- inversion des signaux gravitationnels ? ⇒ évolution stellaire

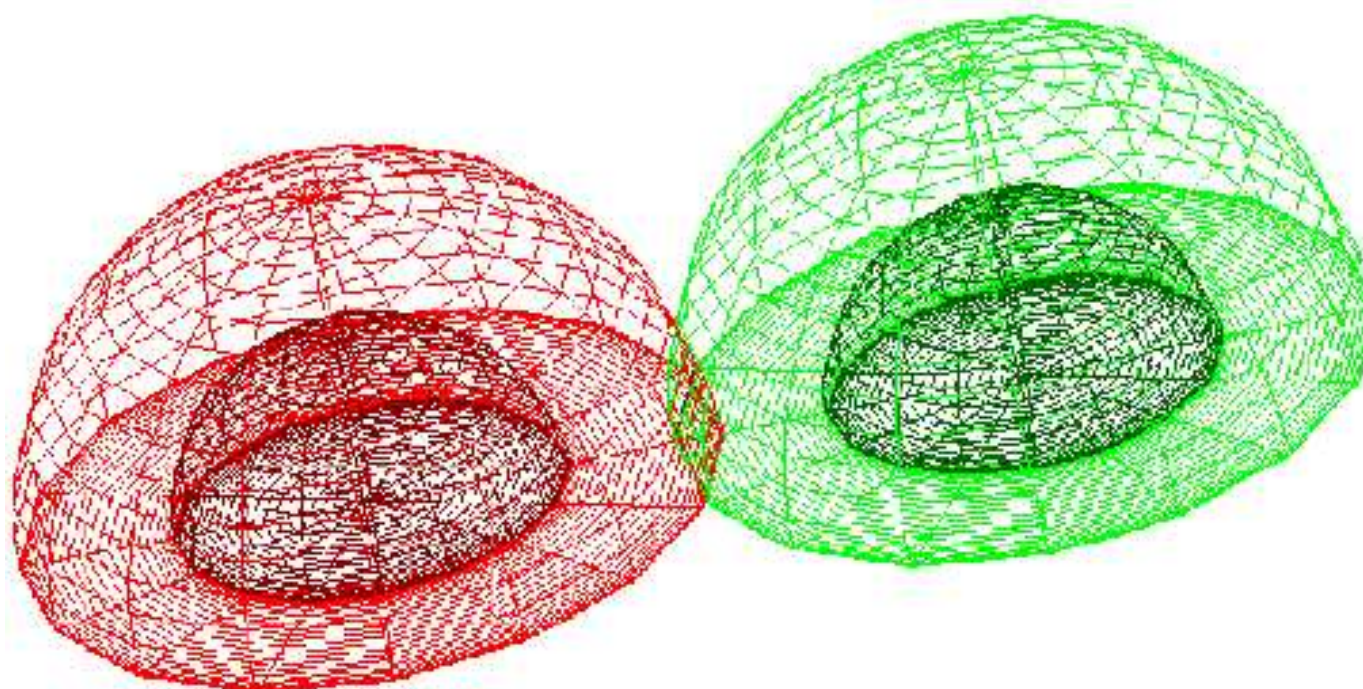
Expérimentation numérique

Bibliothèque numérique LORENE mise à disposition de la communauté sous licence publique GNU : <http://www.lorene.obspm.fr>.

Méthodes spectrales multigrille + coordonnées sphériques



Décomposition :
 Polynômes de Tchebyshev en ξ ,
 Fourier ou Y_l^m pour la partie angulaire (θ, ϕ) ,
 + utilisation des symétries.



- Conditions aux bords bien imposées,
- Grande précision, peu de mémoire utilisée,
- Inversion des opérateurs différentiels \iff inversion de matrices de tailles raisonnables (30-60).

S.Bonazzola, E.Gourgoulhon et J.A.Marck, J. Comp. Appl. Math. 109 (1999).

Études et développements numériques

- résolution de l'équation de Poisson $\Delta\phi = \sigma$ tri-dimensionnelle avec une source à support non-compact, dans les cas scalaire et vectoriel \Rightarrow précision de $\sim 10^{-10}$ sur la solution *P.Grandclément, S.Bonazzola, E.Gourgoulhon et J.A.Marck, J. Comp. Phys. 170 (2001).*
- résolution de l'équation d'onde (variable temporelle traitée avec des différences finies), problème des conditions aux bords transparentes : J.N. et S.Bonazzola [gr-qc/0203102](#).

Collaborations et contacts avec chercheurs en mathématiques appliquées : Centre de Mathématiques Appliquées de l'École Polytechnique et Laboratoire Jacques-Louis Lions (Paris 6).

- travail sur la formulation analytique des équations en vue de l'implémentation numérique : schéma contraint et équation de Poisson tensorielle en composantes sphériques : S.Bonazzola, E.Gourgoulhon, P.Grandclément, et J.N. [gr-qc/0307082](#),
- problème de l'“excision” des trous noirs (J.L.Jaramillo)

Effondrements gravitationnels : vers la simulation des *supernovæ* ?

Motivations :

- toujours du mal à les faire “exploser” sur ordinateur : Cf. Buras *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003)
- sources intéressantes d’ondes gravitationnelles

Mais aussi :

- signal neutrinique
- courbes de rotations pour les proto-étoiles à neutrons
- *hypernovæ*...

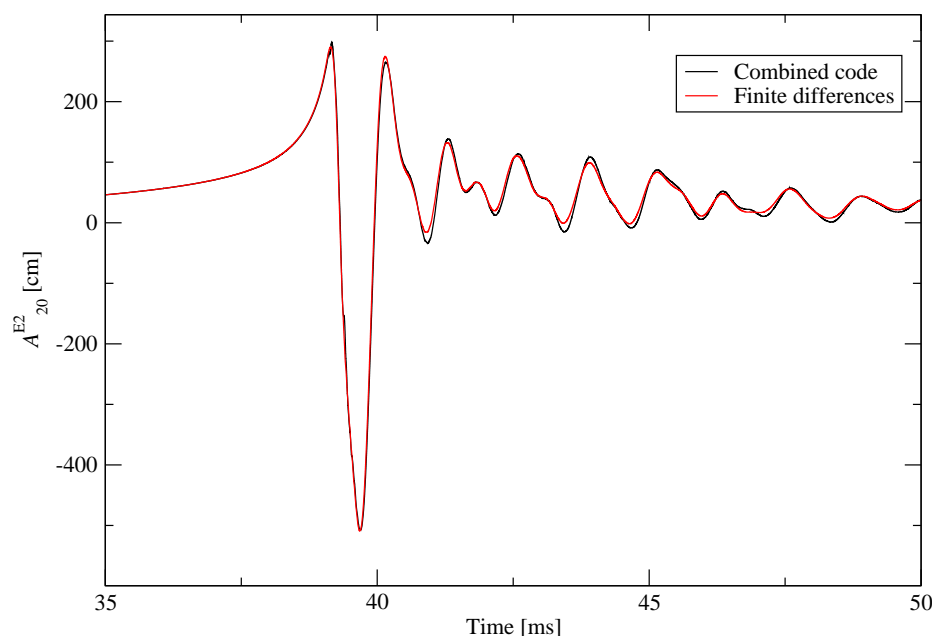
Innovation numérique

Modèle physique très riche et trop complexe...

Commence par modélisation hydro + champ gravitationnel relativiste (Einstein) :

- méthodes spectrales pour modéliser la gravité (faibles besoins informatiques),
- méthodes de type Godunov (capture de chocs) pour traiter les discontinuités hydrodynamique.

Quadrupole amplitude



Collaboration avec le Max-Planck-Institut für Astrophysik (Garching) et le Departamento d'Astronomia y Astrofisica (Valencia) : H.Dimmelmeier, J.N., J.A. Font, E.Müler et J.M.Ibañez *en préparation*.

Conclusions/perspectives

- modèles très complets d'étoiles relativistes en rotation rapide, afin de mieux comprendre un certain nombre d'observations (surtout en X)
- calculs de modèles quasi-stationnaires de binaires (étoiles à neutrons ou trou noir)

⇒ simulation de phénomènes dynamiques afin d'estimer le rayonnement gravitationnel.

Intéressés par de multiples problèmes astrophysiques, pas uniquement à la recherche d'ondes gravitationnelles.

Développement de codes, algorithmes et modèles numériques ouverts (publics) afin d'améliorer la collaboration et la fiabilité des résultats.

LIGO opérationnel, VIRGO presque ... il faut être prêt !