

ETUDES

- ↳ **2008-10** L3-M1 à l'ENS de Cachan
- ↳ **2010-11** Préparation à l'Agrégation
- ↳ **2012-13** M2 A&A à l'Observatoire de Paris-Meudon



RECHERCHE

- ↳ **2010** Simulations à N corps avec Jean-François Lestrade (M1)
- ↳ **2011-12** Systèmes binaires et exoplanètes avec Saul Rappaport
- ↳ **2013** Disques d'accrétion avec Fabien Casse (M2)
- ↳ **2013-16** Thèse sur l'accrétion par vent sur les objets compacts
sous la direction de Fabien Casse & Andrea Goldwurm à l'APC
- ↳ **2016-17** Contrat postdoctoral avec Rony Keppens au
Center for mathematical Plasma Astrophysics, KU Leuven
- ↳ **2017-20** Bourse [Pegasus]² Marie Skłodowska-Curie



KU LEUVEN



Binaires X de forte masse – Motivations



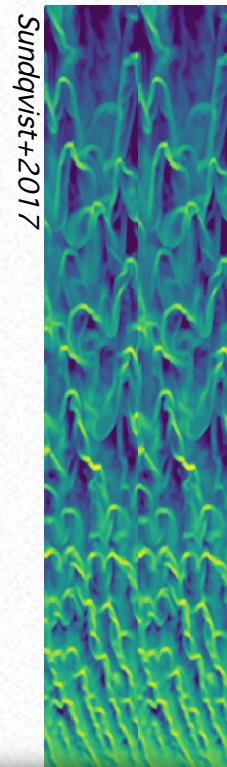
OBJETS COMPACTS

- Étoiles à neutron
 - ↳ équation d'état
 - ↳ champ magnétique
 - ↳ structure
- Trous noirs
 - ↳ formation



ONDES GRAVITATIONNELLES

- ↳ progéniteurs?
- ↳ taux de coalescence
- ↳ conditions



*La majorité des étoiles massives
a au moins un compagnon
dont la présence impacte l'évolution*

Sana+2012

HAUTES ÉNERGIES

- ↳ chocs & jets
- ↳ processus radiatifs
- ↳ reconnection magnétique
- ↳ accélération de particules

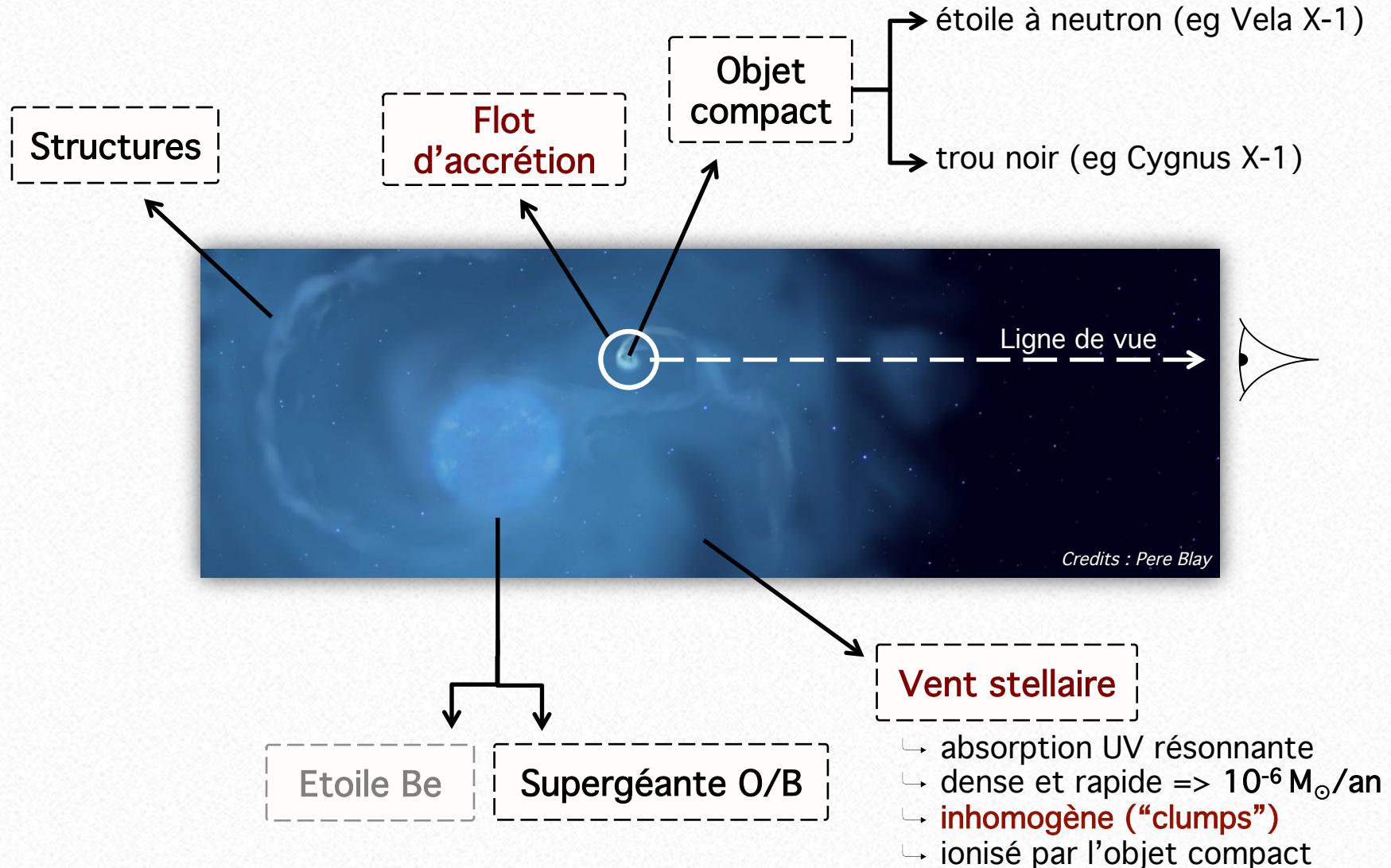


ÉVOLUTION STELLAIRE

- ↳ vents
- ↳ transferts

Étoile massive

Binaires X de forte masse – Portrait



Méthodologie : modélisation & simulations numériques

MPI-AMRVAC 2.0

LA PHYSIQUE

- ↪ lois de conservation (magnéto-)hydrodynamiques
- ↪ transfert radiatif
- ↪ classique ou relativiste

$$\text{flux} + \text{sources} \Rightarrow \partial_t$$

CALCUL HAUTE PERFORMANCE

- ↪ parallélisable sur des milliers de CPU
- ↪ 3Mh·CPU consommées

CONTRIBUTIONS SIGNIFICATIVES

- ↪ grille auto-similaire
- ↪ conservation du moment angulaire
- ↪ flux visqueux

LE NUMÉRIQUE

- ↪ volumes finis
- ↪ maille adaptative
- ↪ géométries multiples

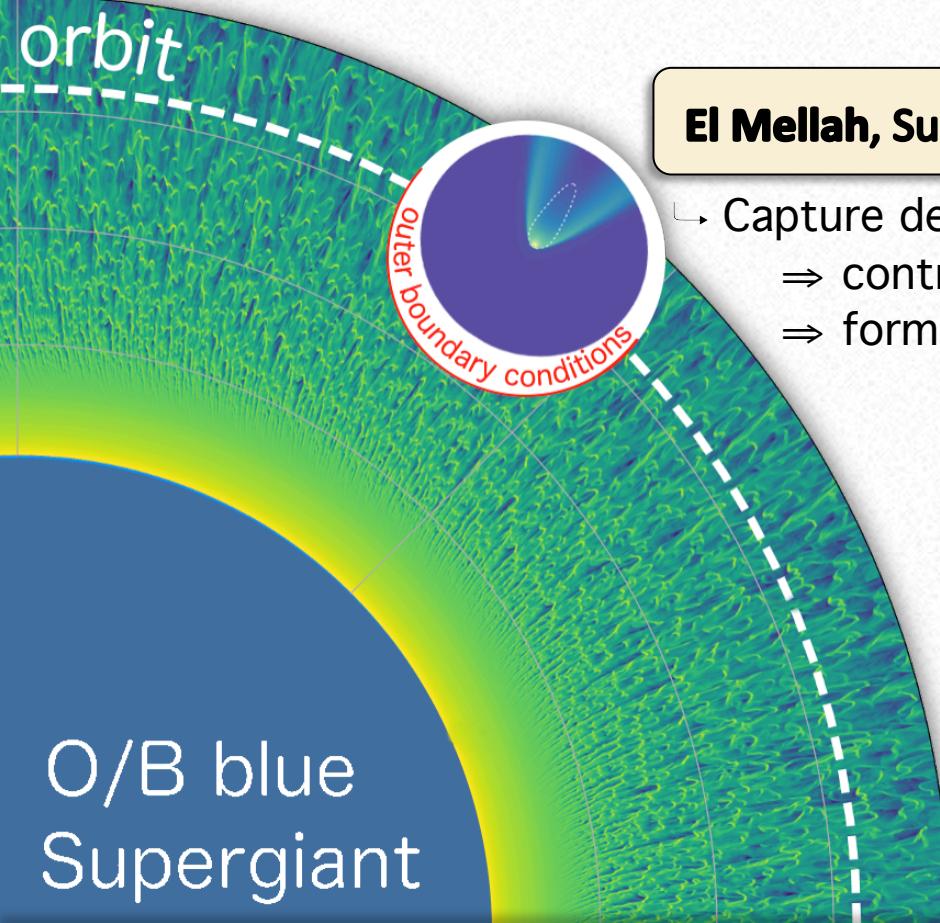
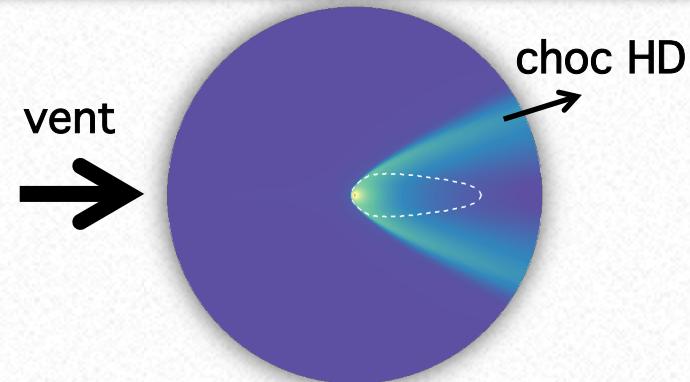


Xia, Teunissen, El Mellah et al., ApJS 2018

Binaires X de forte masse – le vent stellaire

El Mellah & Casse, MNRAS 2015

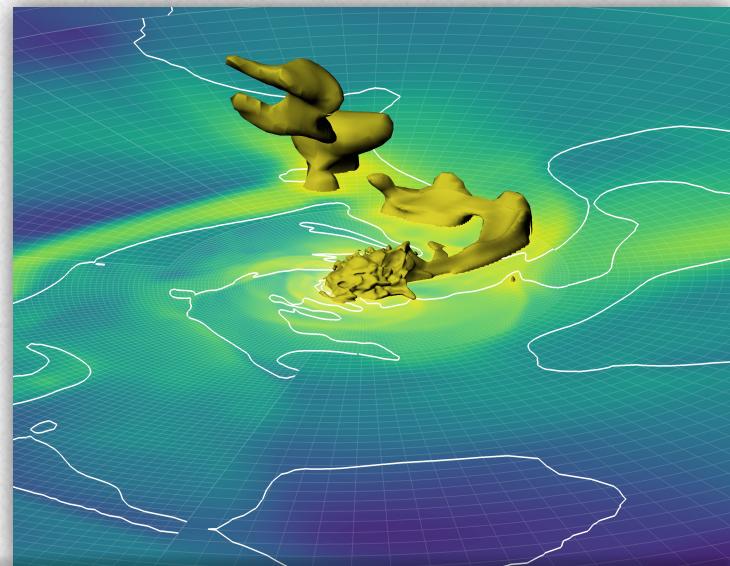
- Accrétion d'un vent homogène par un objet compact
 - mesure du taux d'accrétion de masse
 - structure du choc hydrodynamique



El Mellah, Sundqvist & Keppens, MNRAS 2018

- Capture des clumps et variabilité temporelle de l'émission
 - contribution mineure des clumps à la variabilité
 - formation de disques transitoires

vent

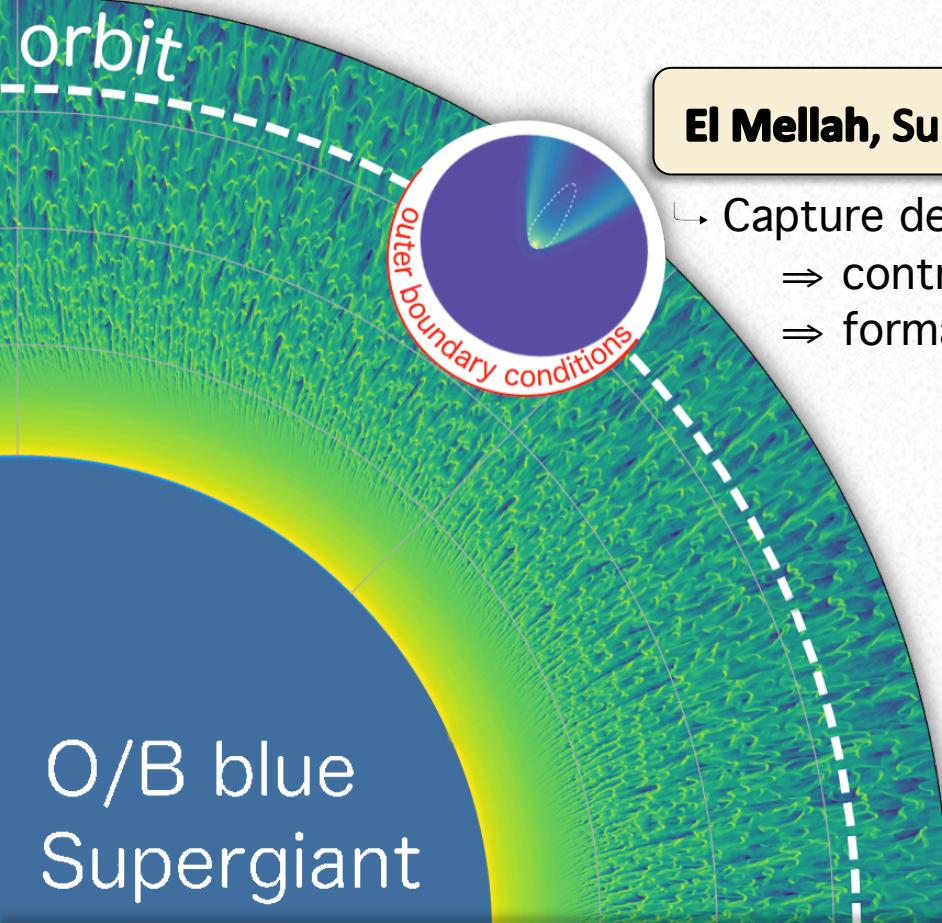
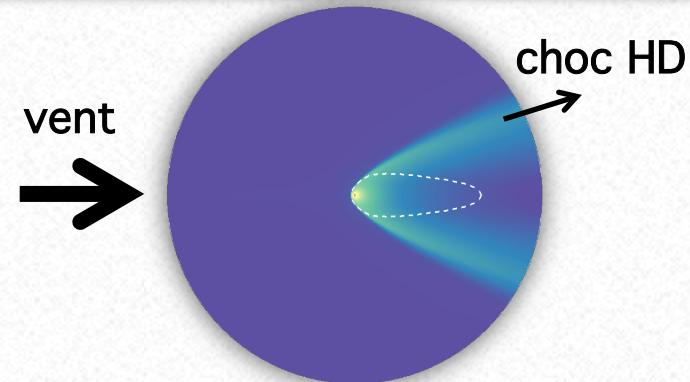


Binaires X de forte masse – le vent stellaire

Binaires X de forte masse – le vent stellaire

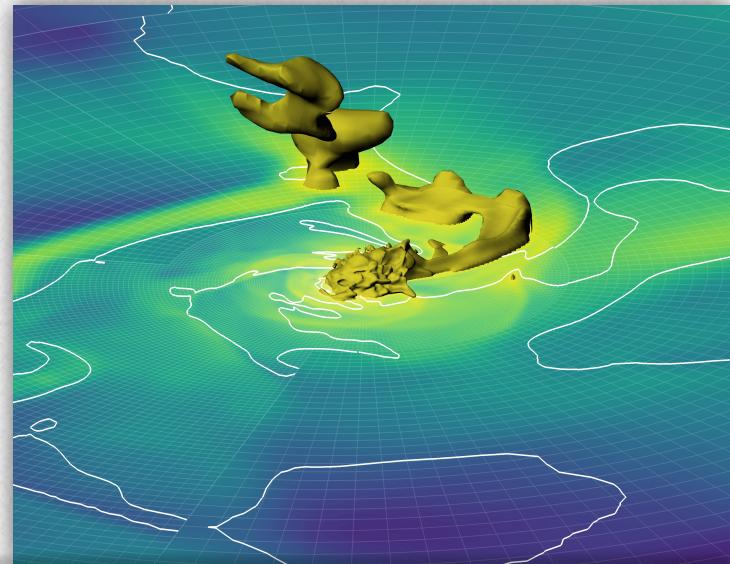
El Mellah & Casse, MNRAS 2015

- Accrétion d'un vent homogène par un objet compact
 - mesure du taux d'accrétion de masse
 - structure du choc hydrodynamique



El Mellah, Sundqvist & Keppens, MNRAS 2018

- Capture des clumps et variabilité temporelle de l'émission
 - contribution mineure des clumps à la variabilité
 - formation de disques transitoires



Binaires X de forte masse – le vent stellaire

Binaires X de forte masse – le vent stellaire

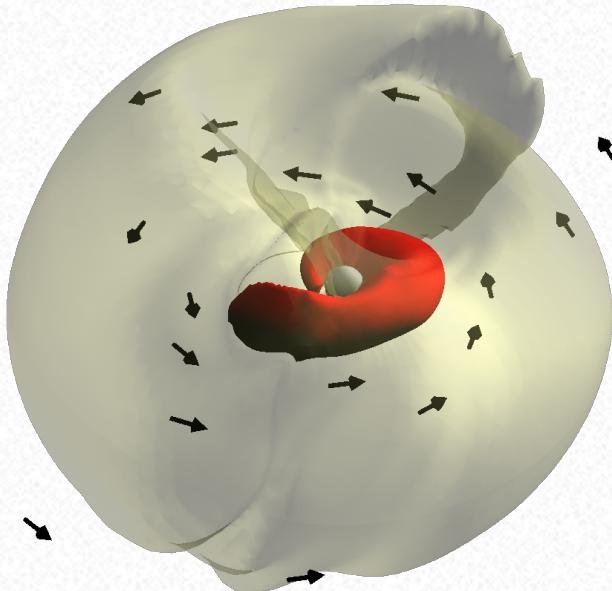


Binaires X de forte masse – le flot d'accrétion

El Mellah & Casse, MNRAS 2017

WASO code

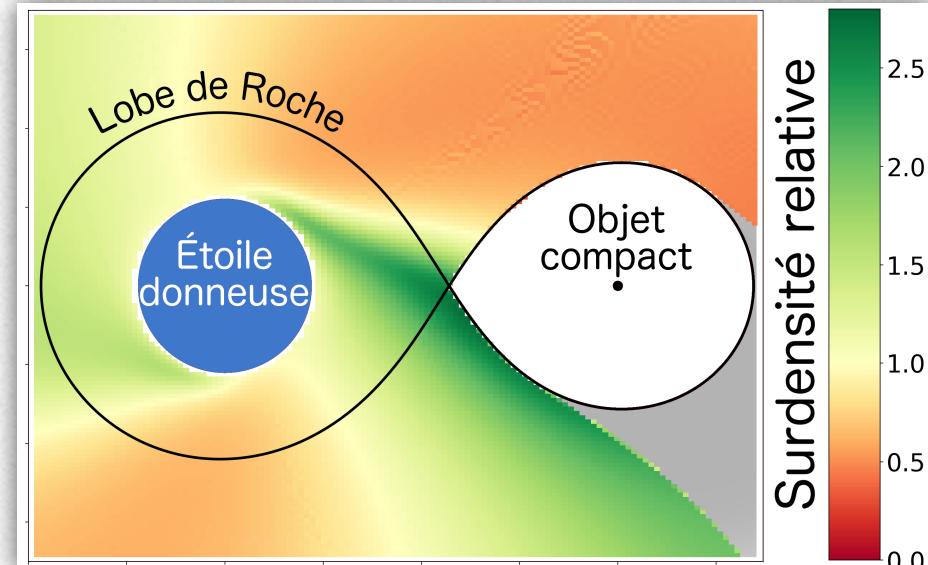
- Identification des paramètres favorables à la formation d'un disque



El Mellah, Sundqvist & Keppens, A&A 2019

El Mellah, Sander, Sundqvist & Keppens, A&A 2019

- Caractérisation des disques formés par capture du vent
 - ⇒ origine du disque observé dans Cygnus X-1
 - ⇒ prédiction d'un disque dans Vela X-1



- Nouveau mécanisme de transfert de masse accéléré dans les systèmes binaires
⇒ les sources X ultra-lumineuses ne nécessitent pas de remplissage de lobe de Roche (eg M101 ULX-1)

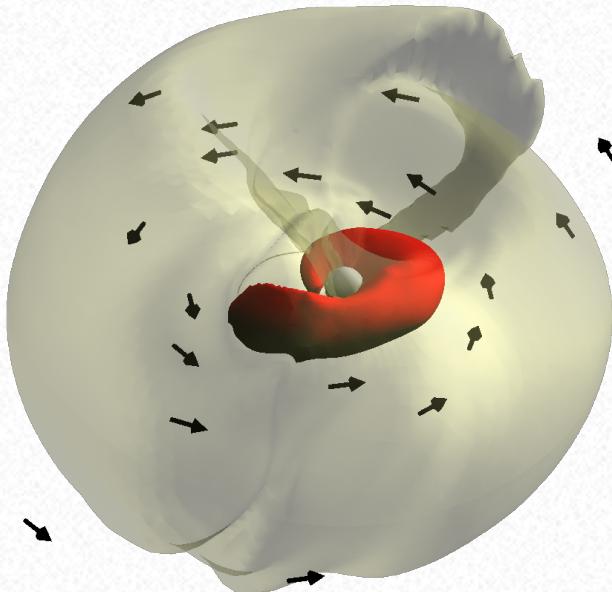
Binaires X de forte masse – le flot d'accrétion

Binaires X de forte masse – le flot d'accrétion

El Mellah & Casse, MNRAS 2017

WASO code

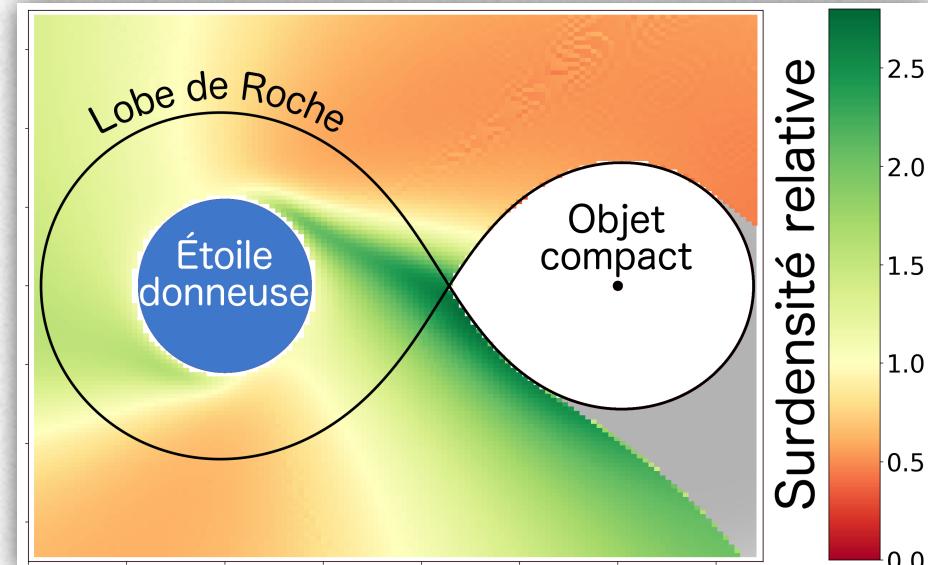
- Identification des paramètres favorables à la formation d'un disque



El Mellah, Sundqvist & Keppens, A&A 2019

El Mellah, Sander, Sundqvist & Keppens, A&A 2019

- Caractérisation des disques formés par capture du vent
 - ⇒ origine du disque observé dans Cygnus X-1
 - ⇒ prédiction d'un disque dans Vela X-1

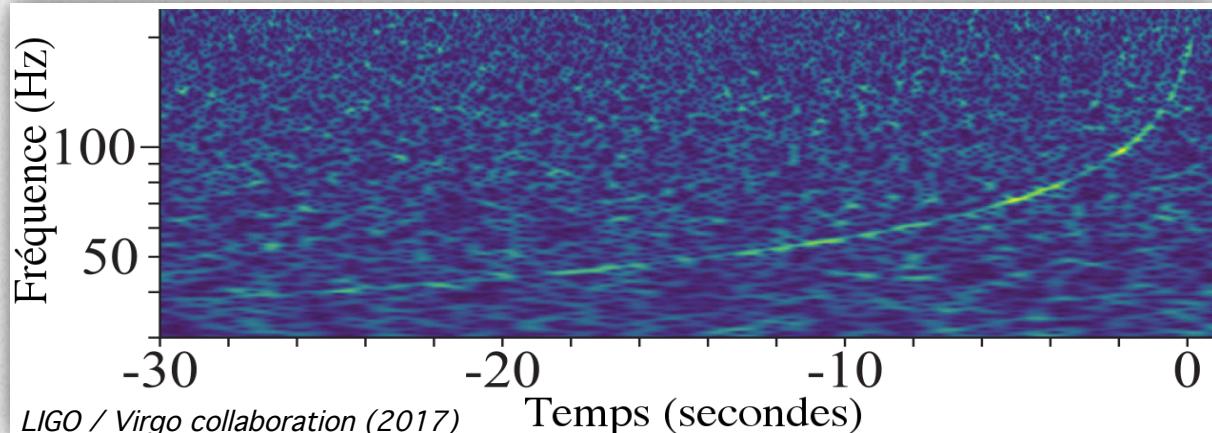


- Nouveau mécanisme de transfert de masse accéléré dans les systèmes binaires
⇒ les sources X ultra-lumineuses ne nécessitent pas de remplissage de lobe de Roche (eg M101 ULX-1)

Contreparties électromagnétiques de la coalescence d'objets compacts

ONDES GRAVITATIONNELLES

- ↳ coalescence entre étoiles à neutron
- ↳ nature du reliquat?



SURSAUT GAMMA COURT

Emission transitoire (<2s)

Mécanisme

- ↳ jet relativiste
- ↳ chocs internes
- => émission γ focalisée

KILONOVA

Pique après ~ 1 semaine
Optique → proche infra-rouge

- Sources de chauffage
- ↳ capture de neutrons
 - ↳ retombées d'accrétion
 - ↳ chauffage magnétique

RÉMANENCE

Emission synchrotron
Rayons X → radio
Choc externe

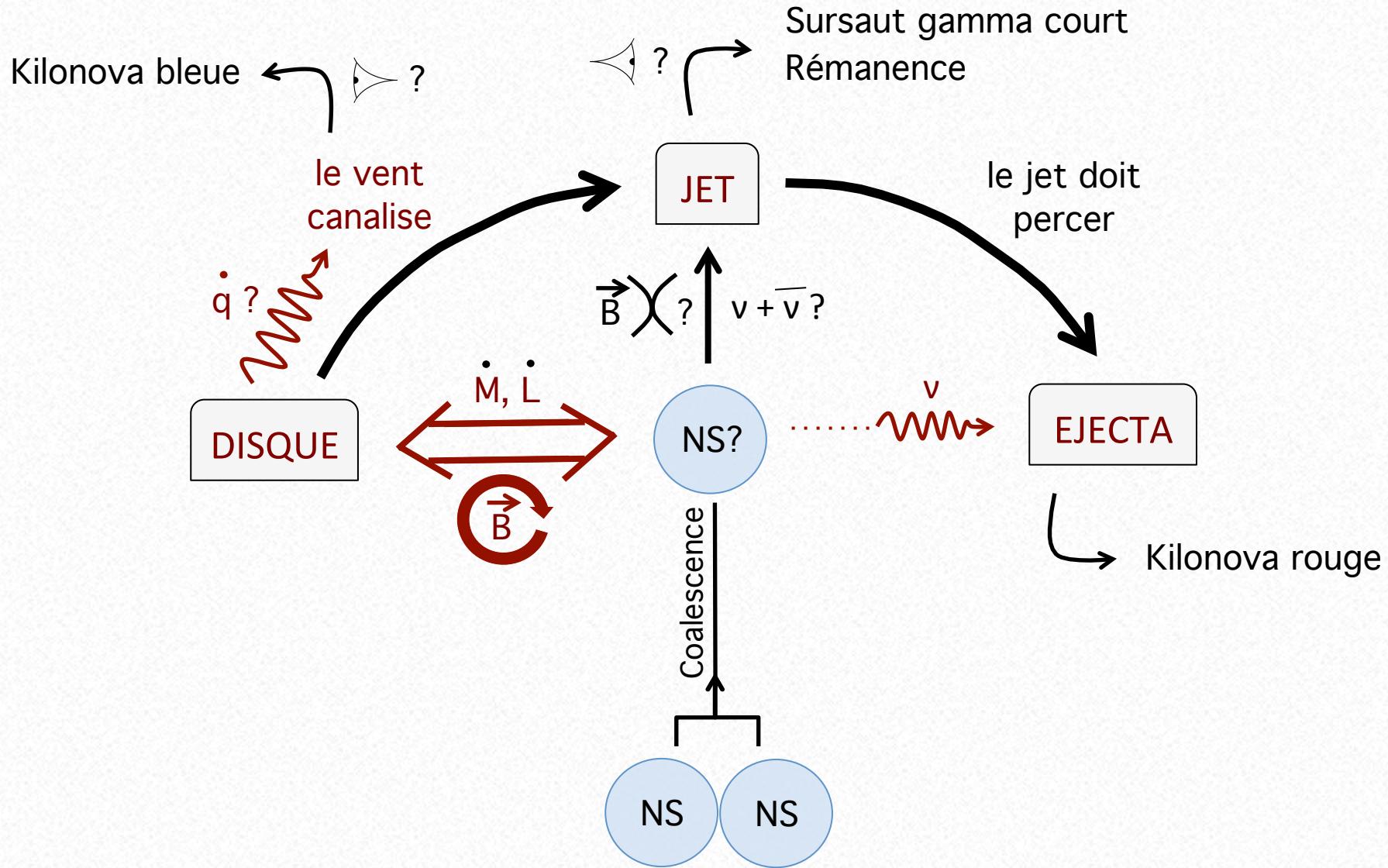
*"We should not expect the first [...] GW chirps from NS-NS/BH-NS mergers to be accompanied by a GRB [because] the jetted GRB emission will be relativistically beamed out of our **line of sight**"*

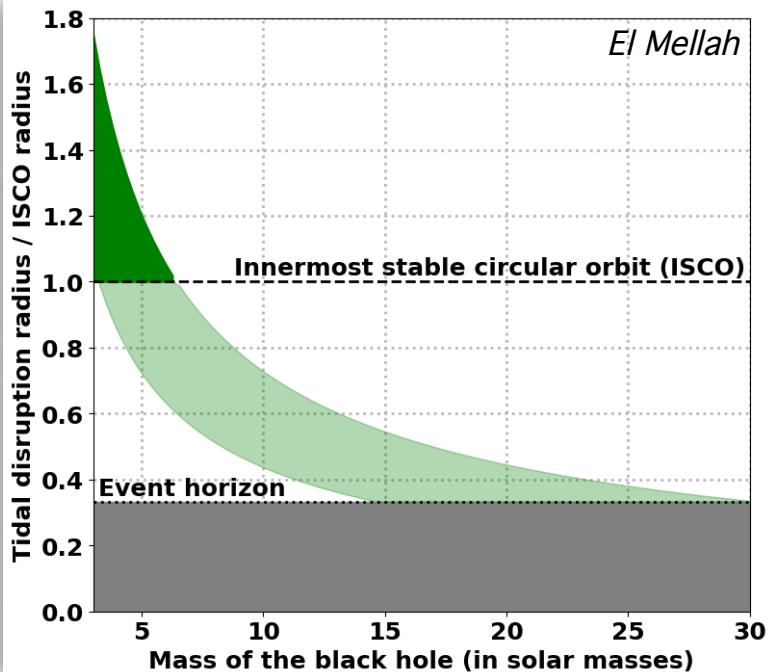
Metzger 2017

Kilonova bleue et lumineuse avec sursaut gamma ténu

Troja+2018

Synthèse du projet de recherche





DISQUE D'ACCÉRATION

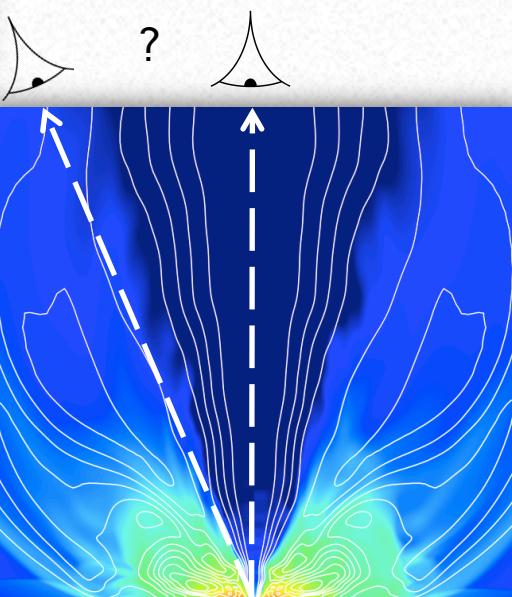
Masse & propriétés?

Développements post-newtoniens

- GReCO
 - ↳ Gilles Esposito-Farese
 - ↳ Luc Blanchet
 - ↳ Guillaume Faye

Vent de disque

- ↳ absorption UV
- ↳ clumps
- ↳ transport des neutrinos



JET RELATIVISTE

Chocs internes

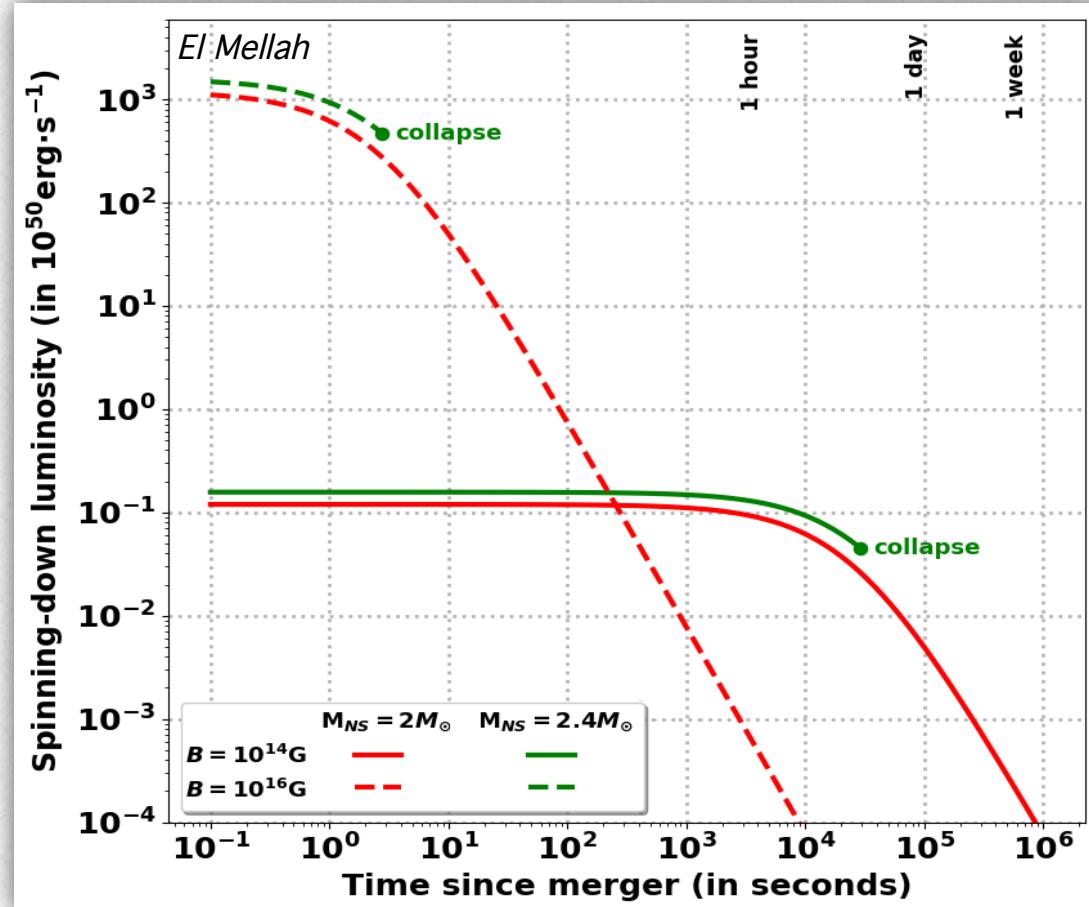
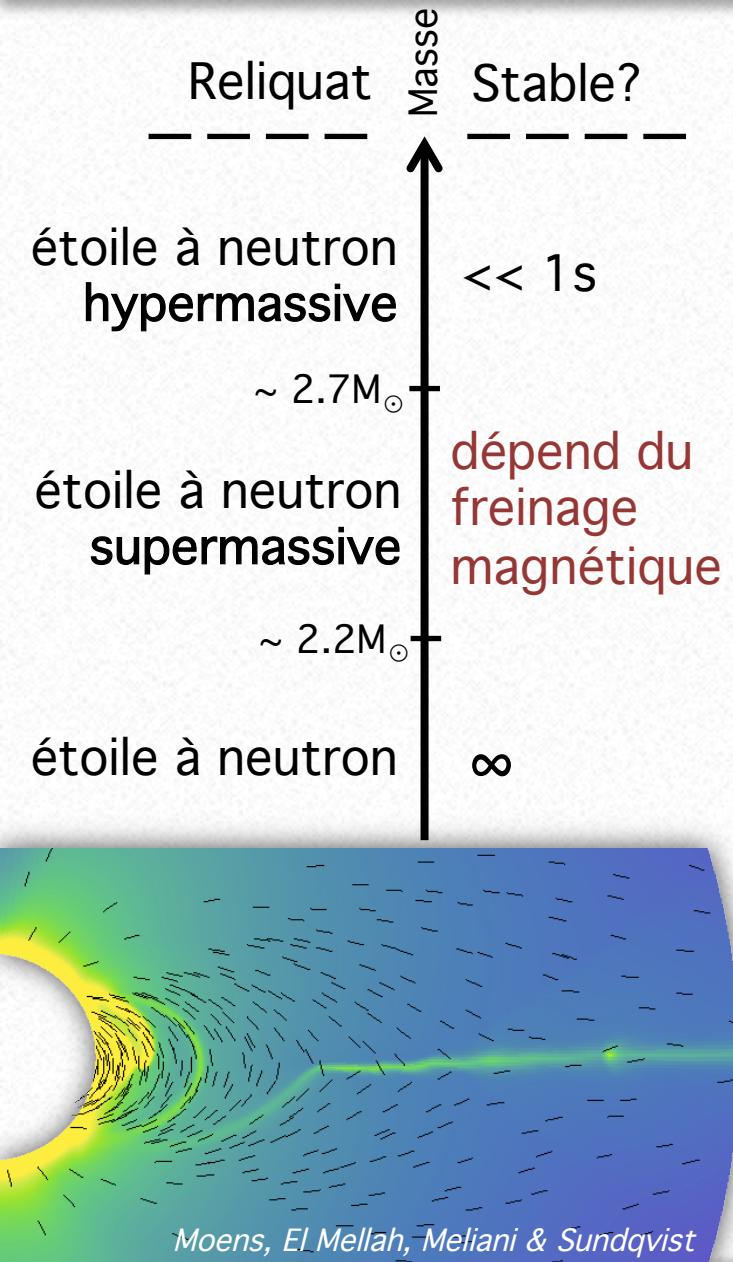
- ↳ Frédéric Daigne
- ↳ Robert Mochkovitch

Accélération de particules

- ↳ Martin Lemoine



↳ Patrick Petitjean



Couplage magnétosphère / ejecta

- ↳ géométrie du flux : disque? sphérique?
- ↳ vent de disque
- ↳ interaction ejecta / vent de pulsar

Decin et al., Nature Astronomy 2019

- ↳ Morphologie de l'enveloppe circumstellaire autour des supergéantes rouges
- ↳ ma contribution : impact d'un companion
⇒ paramétrisation de l'ejecta

El Mellah, Decin et al., in prep

CHAUFFAGE NUCLÉAIRE DE LA KILONOVA

Fraction électronique?

Paramétrisation ↳ Elisabeth Vangioni

- ↳ capture rapide de neutrons
 - ↳ refroidissement par émission de neutrinos
- A plus long terme
- ↳ couplage avec réseau de réactions

IAP

Decin et al., Nature Astronomy 2019

- ↳ Morphologie de l'enveloppe circumstellaire autour des supergéantes rouges
- ↳ ma contribution : impact d'un companion
⇒ paramétrisation de l'ejecta

El Mellah, Decin et al., in prep

CHAUFFAGE NUCLÉAIRE DE LA KILONOVA

Fraction électronique?

Paramétrisation ↳ [Elisabeth Vangioni](#)

- ↳ capture rapide de neutrons
- ↳ refroidissement par émission de neutrinos

A plus long terme

- ↳ couplage avec réseau de réactions

Expérience d'enseignement

QUALIFICATIONS

- ↳ 2012 Agrégation de Sciences physiques, option Physique – reçu 2nd
- ↳ 2017 Qualification aux fonctions d'enseignant-chercheur

MONITORAT

- ↳ 32h TD L1 Etudes médecine & santé (PACES) – Isabelle Grenier
- ↳ 32h TP M1 Systèmes et signaux déterministes – Laurent Daudet
- ↳ 128h TD L1 Mécanique du point – Cécile Roucelle

EN POSTDOC

- ↳ 60h cours M2 Computational methods for Astrophysics – Ileyk El Mellah
 - ↳ 40h TD M2 Computational methods for Astrophysics – Rony Keppens
 - ↳ 30h TD L1 Algèbre linéaire – Rony Keppens
-
- ↳ Co-encadrement de la thèse de Nicolas Moens avec Jon Sundqvist
“Radiation-hydrodynamics of the most massive stars in our Universe”

université

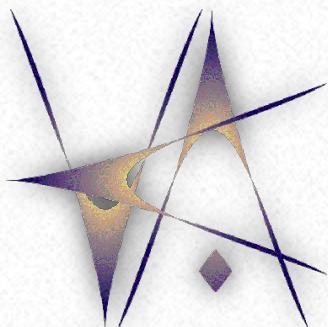
PARIS
DI
DEROT
PARIS 7

KU LEUVEN

Expérience d'enseignement

MÉTHODOLOGIE PÉDAGOGIQUE

- ↳ inductif
- ↳ immersif
- ↳ interactif



VERSATILE
ADDITION CODE

PROBLÈME DE ROCHE

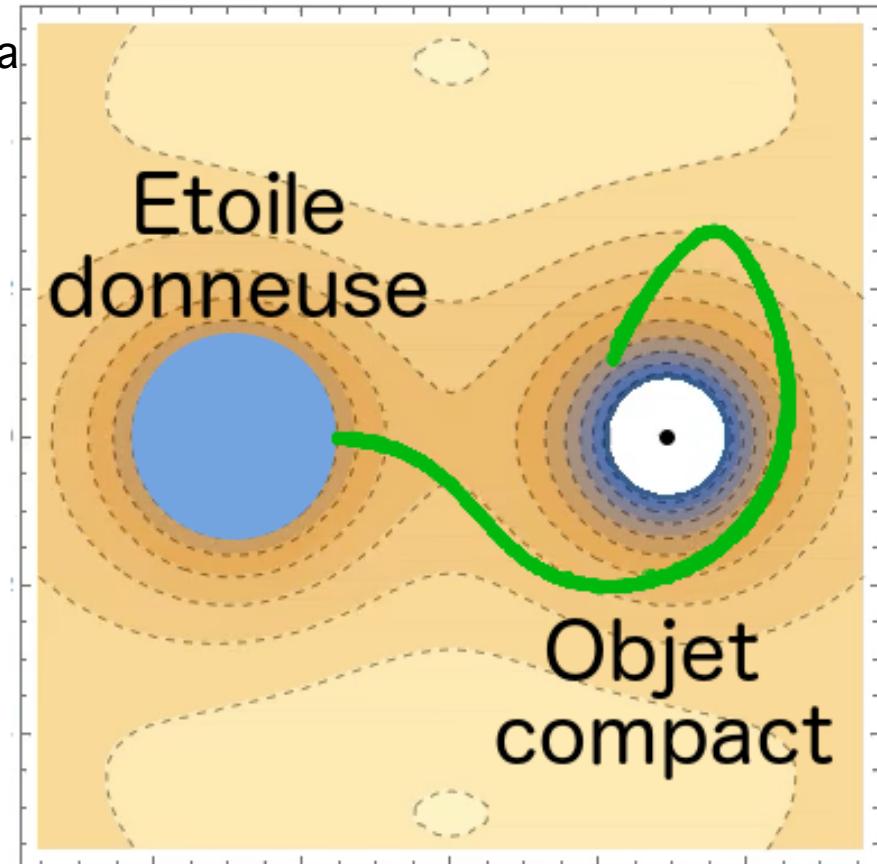
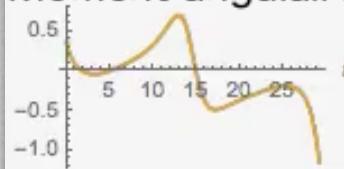
- ↳ Applet Mathematica
- ↳ Maquettes 3D

Rapport de masse

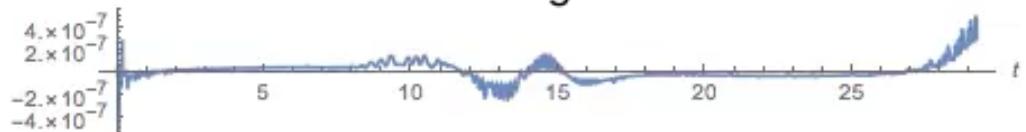
Masse de l'accréteur

Période orbitale

Moment angulaire



Conservation de l'énergie



Insertion dans l'équipe pédagogique

Diversification des profils des étudiants : majeur / mineur

- ↳ Parcours Mathématiques Informatique Physique Ingénierie
- ↳ Parcours Physique Chimie Géosciences Ingénierie

LICENCE

- ↳ Physique : CM, TD, TP
- ↳ PACES

CAPES/AGRÉGATION

Centre de préparation à l'Agrégation de Montrouge – Agnès Maître

- ↳ Montages expérimentaux
- ↳ Leçons

Master des métiers de l'enseignement : CAPES

NUMÉRIQUE

Initiation à l'outil informatique

- ↳ L1 Python
- ↳ L1-L2 Ateliers de recherche encadrée – Emmanuel Rollinde
- ↳ M1 Méthodes numériques et informatiques – Jacques Lefrère

Algorithmique et résolution numérique

- ↳ Différences / volumes finis
- ↳ Monte-Carlo



Université Sorbonne
Paris Cité

Conclusion

- ↳ 11 papiers dont 5 1^{er} auteur

Travaux de recherche

- ↳ méthodologie : modélisation & simulations numériques
- ↳ sujets : systèmes binaires, objets compacts, vents stellaires, accrétion

Projet de recherche :

Contreparties électromagnétiques de la coalescence d'objets compacts

- ↳ à court terme : paramétrisation du lancement du vent / du jet
- ↳ à moyen terme : couplage magnétosphère / disque
- ↳ à longe terme : accrétion / éjection & réseau de réactions nucléaires

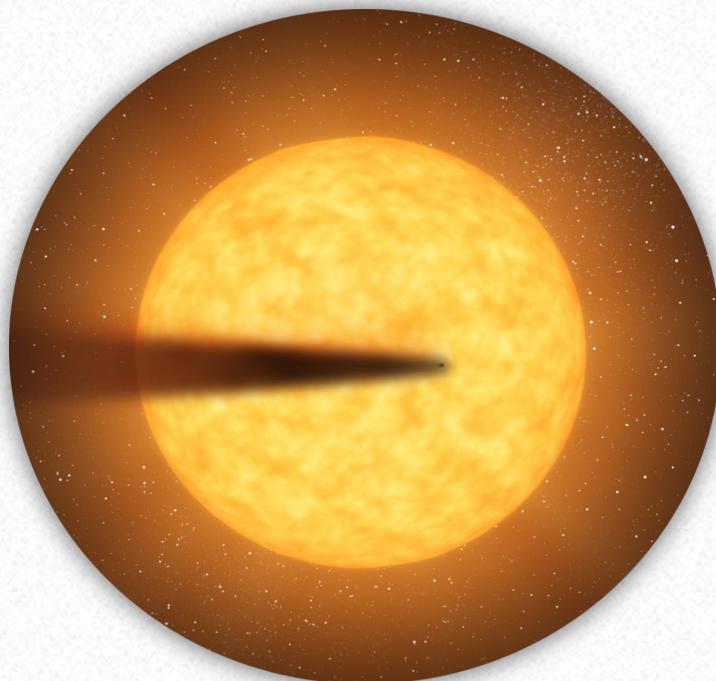
Enseignement

- ↳ Licence : CM, TD, TP, numérique
- ↳ Agrégation / CAPES : leçons & montages

Thème de recherche & travaux préliminaires



*Les étoiles et leurs reliquats,
en interaction avec leur environnement*



Rappaport, Levine, Chiang, El Mellah et al., ApJ 2012

- ↳ Sub-Mercure en désintégration
- ↳ ma contribution : identification & modélisation

Sanchis-Ojeda et al., ApJ 2014

- ↳ Exoplanètes à courte période
- ↳ ma contribution : algorithme de recherche

Rappaport et al., ApJ 2013

- ↳ Systèmes triples
- ↳ ma contribution : réduction de données

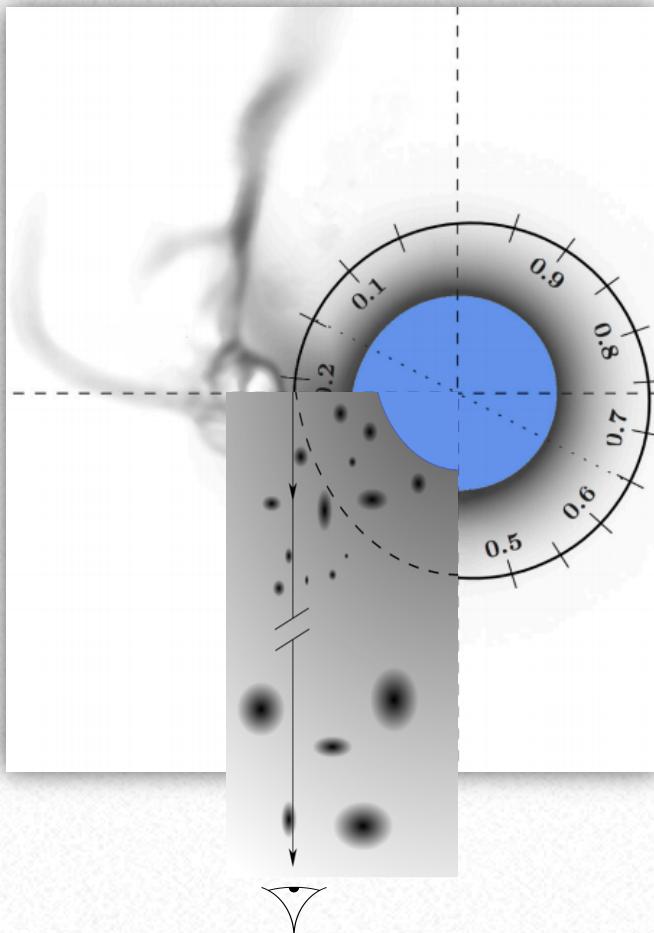
Binaires X de forte masse (et supergéantes rouges) – le vent stellaire

Grinberg, Hell, El Mellah et al., A&A 2017

ATHENA

El Mellah, Decin et al., in prep

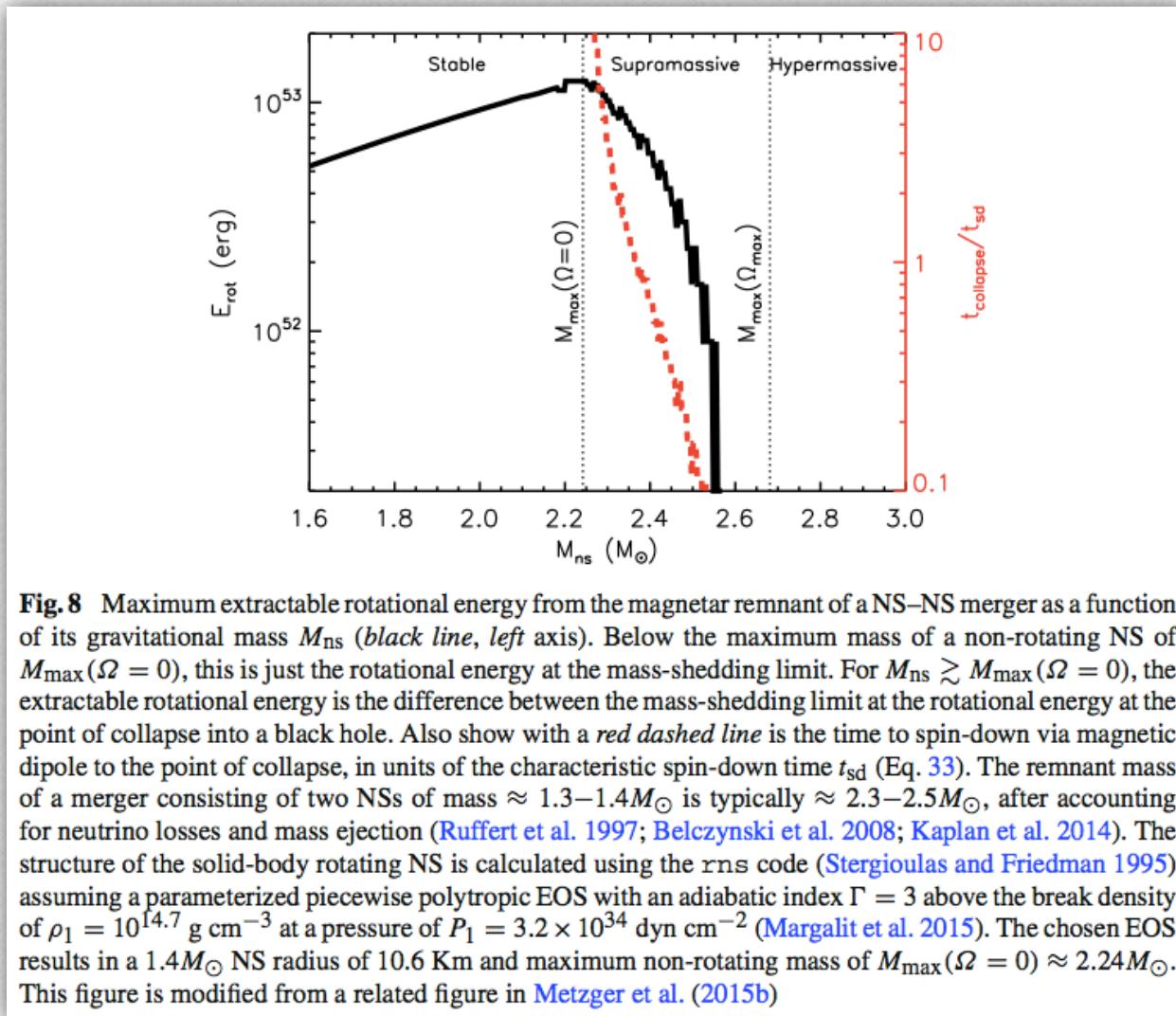
- ↪ Variabilité de l'absorption dans Vela X-1
- ↪ ma contribution : modèle stochastique
- ⇒ vent plus lent que prévu



Decin et al., Nature Astronomy 2019

- ↪ Morphologie de l'enveloppe circumstellaire autour des supergéantes rouges
- ↪ ma contribution : impact d'un companion
⇒ les taux de perte de masse de ces étoiles ont été surestimés d'un facteur ~10

Stabilité de l'étoile à neutron reliquat



Coalescence et émission

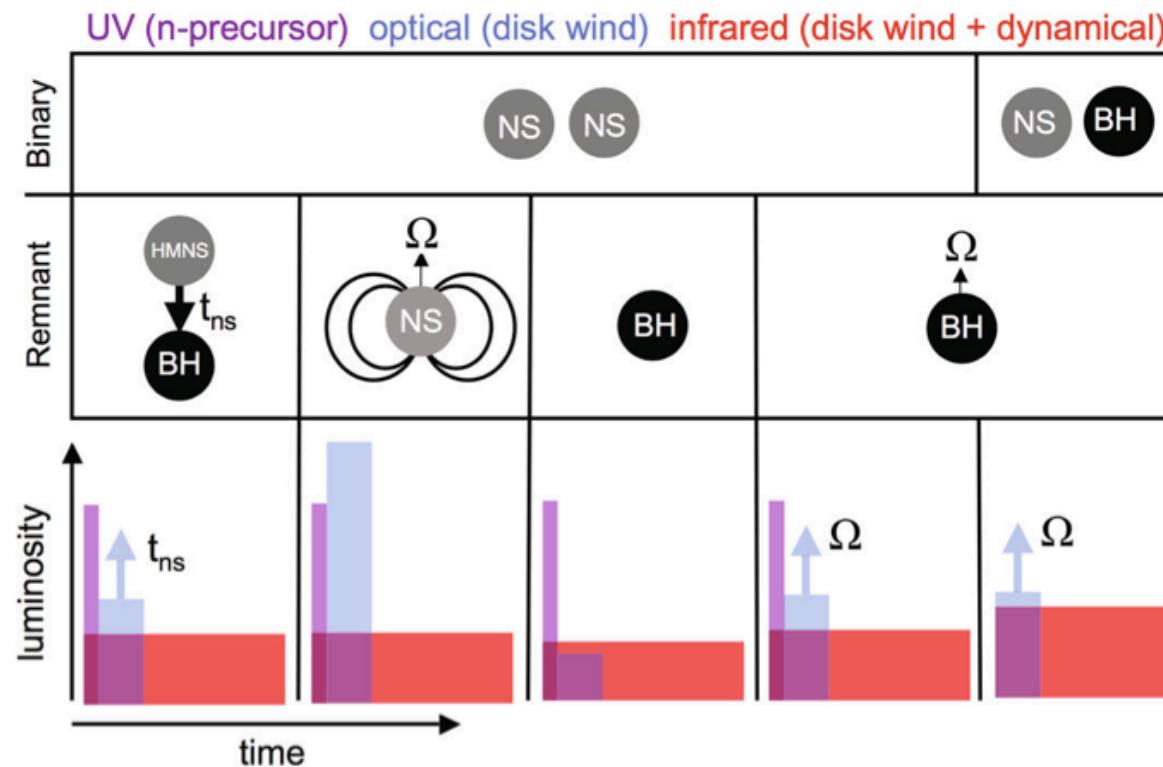


Fig. 13 Schematic illustration of the mapping between mergers and kilonova light curves. The *top panel* shows the progenitor system, either an NS–NS or an NS–BH binary, while the *middle plane* shows the final merger remnant (from left to right: an HMNS that collapses to a BH after time t_{collapse} , a spinning magnetized NS, a non-spinning BH and a rapidly spinning BH). The *bottom panel* illustrates the relative amount of UV/blue emission from an neutron precursor (purple), optical emission from lanthanide-free material (blue) and IR emission from lanthanide containing ejecta (red). We caution that the case of a NS–NS merger leading to a slowly spinning black hole is very unlikely, given that at a minimum the remnant will acquire the angular momentum of the original binary orbit. Image reproduced with permission from [Kasen et al. \(2015\)](#), copyright by the authors

Coalescence et émission

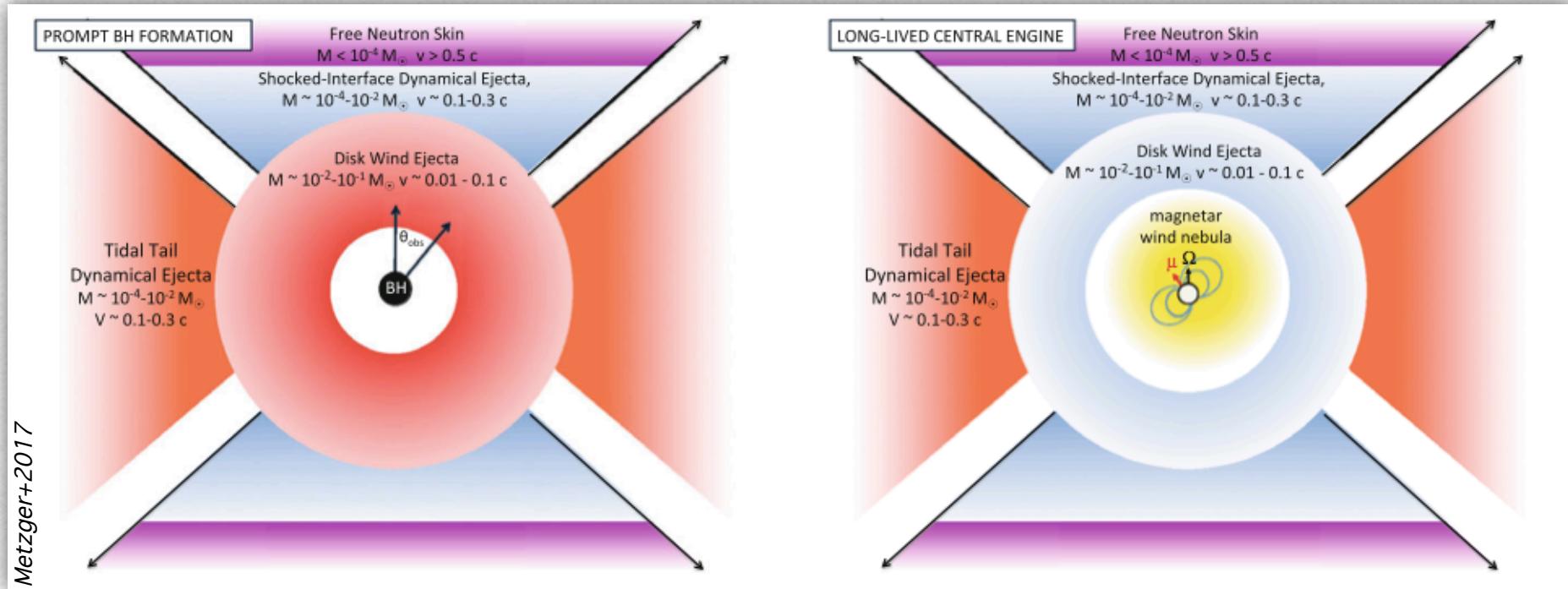


Diagramme de Corbet

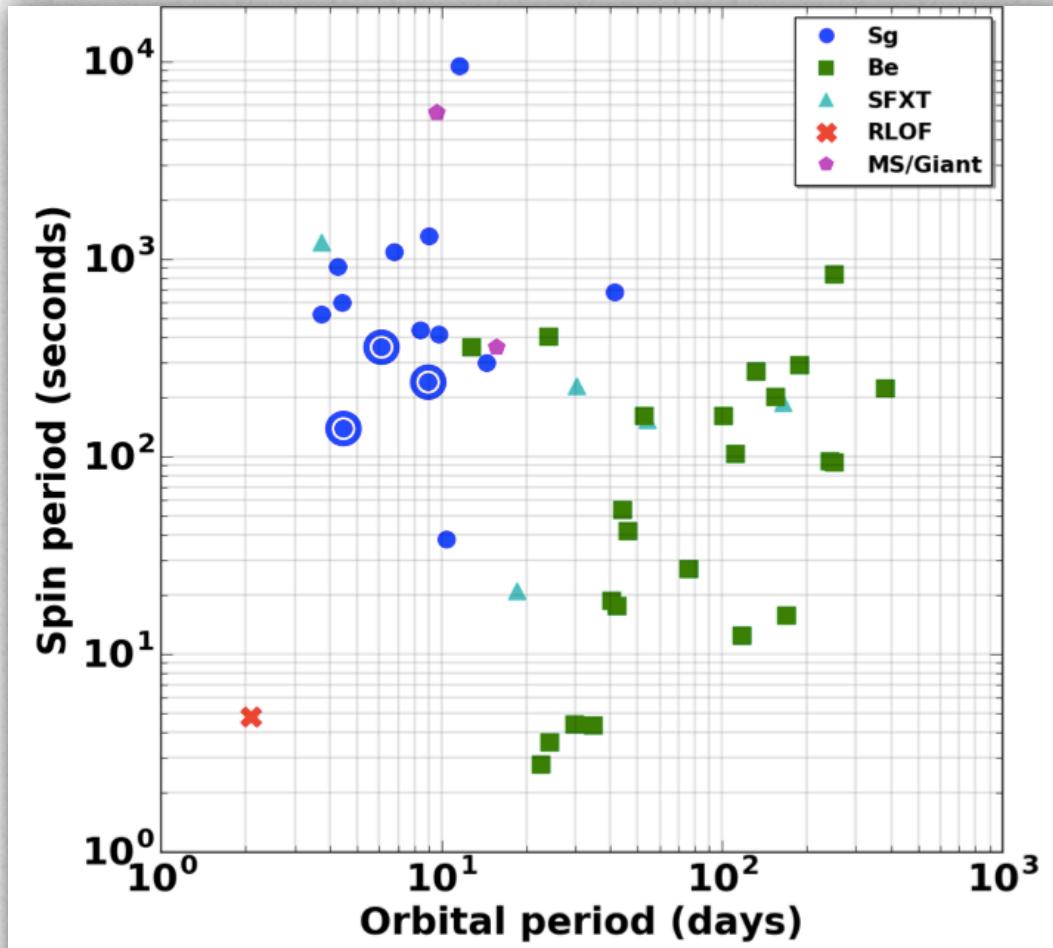
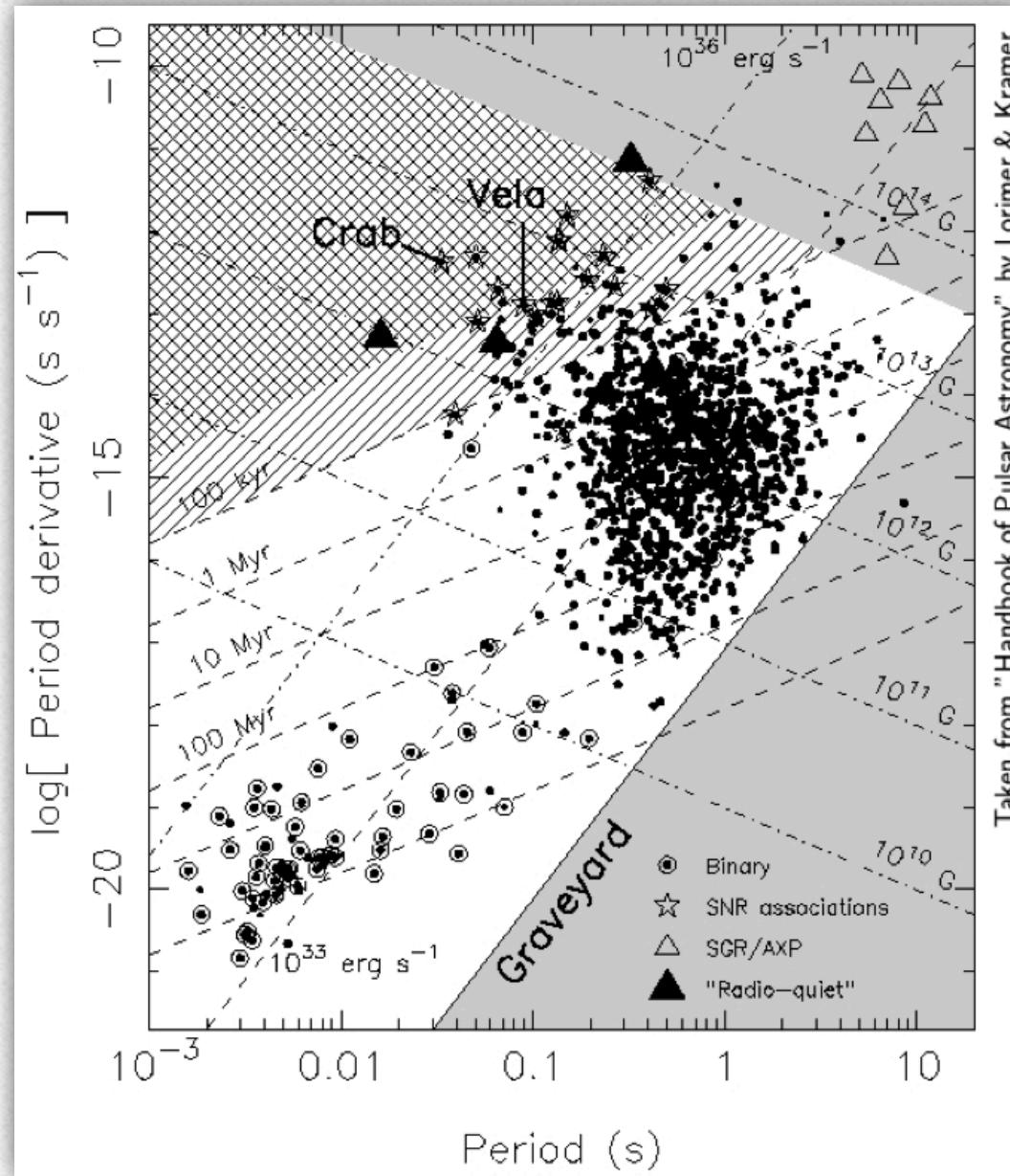
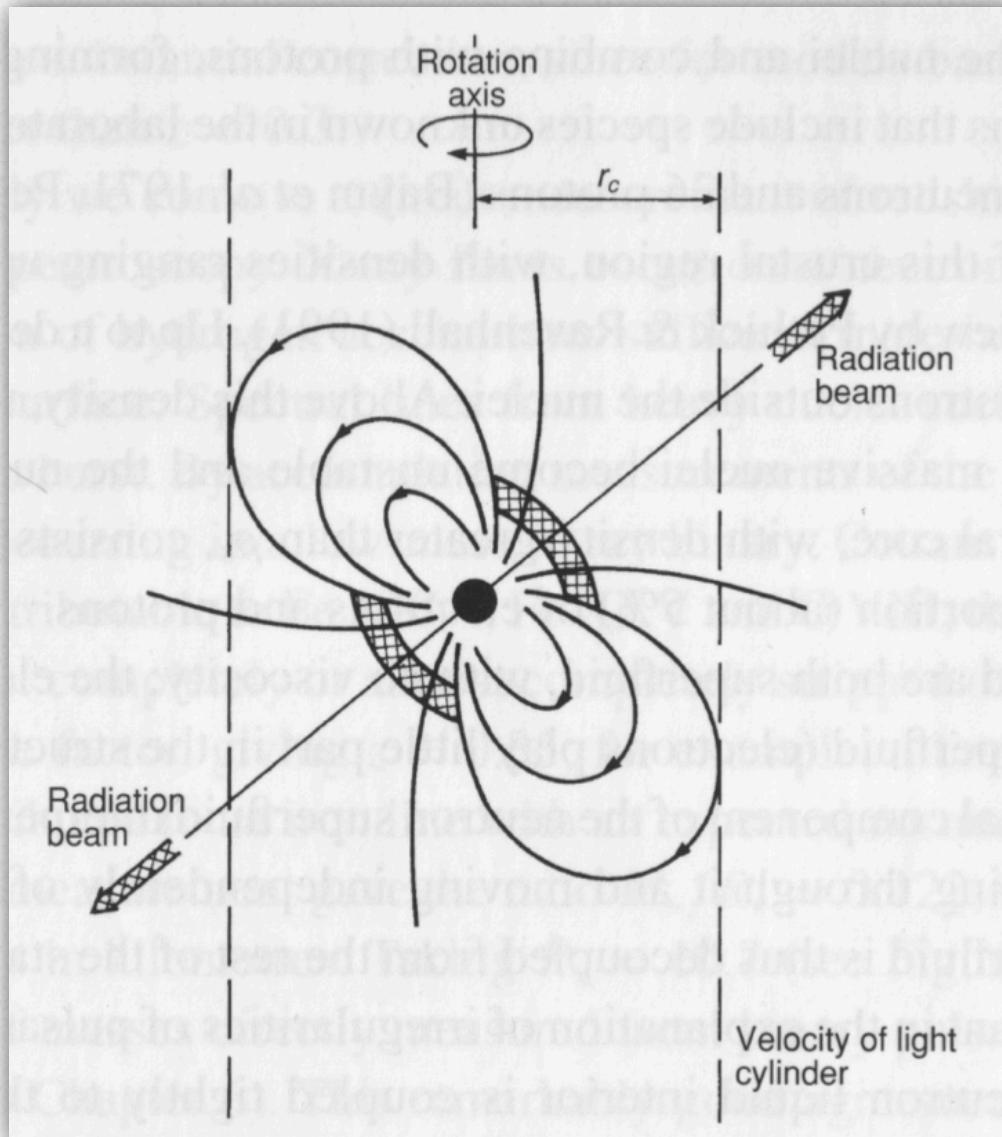


Figure 2.4: Corbet diagram of Galactic HMXB hosting a NS. The NS spin is represented as a function of the orbital period of the binary, for systems where both are measured. For BeXB (green squares), a correlation exists between the two, not in the case of SgXB (blue dots). In the bottom left part of the Figure is the only RLOF system among this sample (red cross), Cen X-3. See (van der Meer et al., 2007) for a joint study of two other RLOF HMXB hosting a neutron star, SMC X-1 and LMC X-4 (both extragalactic). SFXT and systems with an atypical donor star have also been represented. The three circled Sg are the sources investigated in more details in Chapter 8.

Diagramme P-Pdot



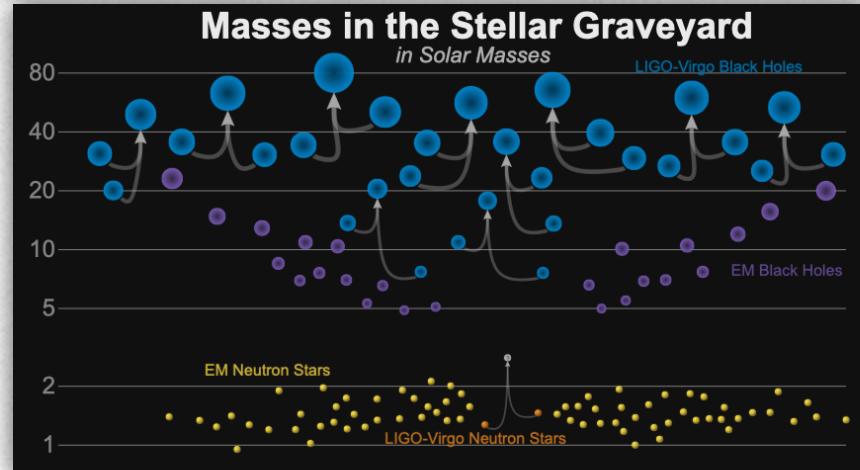
Emission radio des pulsars



Contreparties électromagnétiques de la coalescence d'objets compacts

ONDES GRAVITATIONNELLES

- ↳ coalescence entre étoiles à neutron
- ↳ nature du reliquat?



SURSAUT GAMMA COURT

Emission transitoire (<2s)

Mécanisme

- ↳ **jet relativiste**
- ↳ chocs internes
- => émission γ focalisée

KILONOVA

Pique après ~ 1 semaine
Optique → proche infra-rouge

Sources de chauffage

- ↳ capture de neutrons
- ↳ retombées d'accrétion
- ↳ chauffage magnétique

RÉMANENCE

Emission synchrotron

Choc externe

*"We should not expect the first [...] GW chirps from NS-NS/BH-NS mergers to be accompanied by a GRB [because] the jetted GRB emission will be relativistically beamed out of our **line of sight**"*

Metzger 2017

Kilonova bleue et lumineuse avec sursaut gamma ténu

Troja+2018

Binaires X de forte masse – la magnétosphère de l'étoile à neutron

