

# Audition Maître de conférences - Institut d'Astrophysique de Paris

Sorbonne Université  
Avril 2019



Ileyk El Mellah

## 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 J.-F. Lestrade (M1)
- ↳ 2011-12 Systèmes binaires et exoplanètes avec S. Rappaport
- ↳ 2013 Disques d'accrétion avec F. Casse (M2)
- ↳ 2013-16 Thèse sur l'accrétion par vent sur les objets compacts  
sous la direction de F. Casse & A. Goldwurm à l'APC
- ↳ 2016-17 Contrat postdoctoral avec R. Keppens au  
Center for mathematical Plasma Astrophysics, KU Leuven
- ↳ 2017-20 Bourse [Pegasus]<sup>2</sup> Marie Skłodowska-Curie



KU LEUVEN



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

*Sana+2012*

# Binaires X de forte masse – Contexte astrophysique & cosmologique



## OBJETS COMPACTS

Étoiles à neutrons

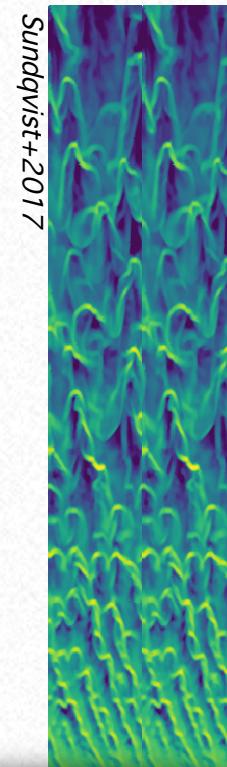
- ↳ équation d'état
- ↳ champ magnétique
- ↳ structure

Trous noirs

- ↳ formation

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

*Sana+2012*



## ÉVOLUTION STELLAIRE

- ↳ vents
- ↳ transferts

Étoile massive

# Binaires X de forte masse – Contexte astrophysique & cosmologique



## OBJETS COMPACTS

Étoiles à neutrons

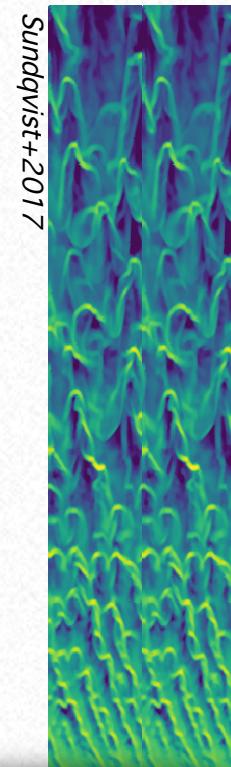
- ↳ équation d'état
- ↳ champ magnétique
- ↳ structure

Trous noirs

- ↳ formation

*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 – Contexte astrophysique & cosmologique



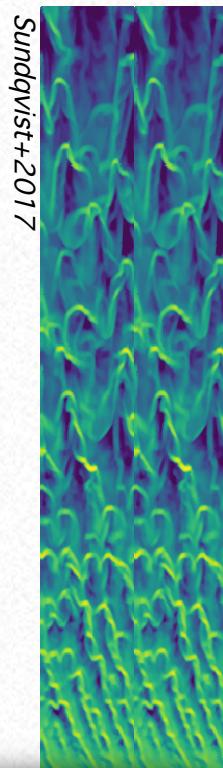
## OBJETS COMPACTS

- Étoiles à neutrons
  - ↳ 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

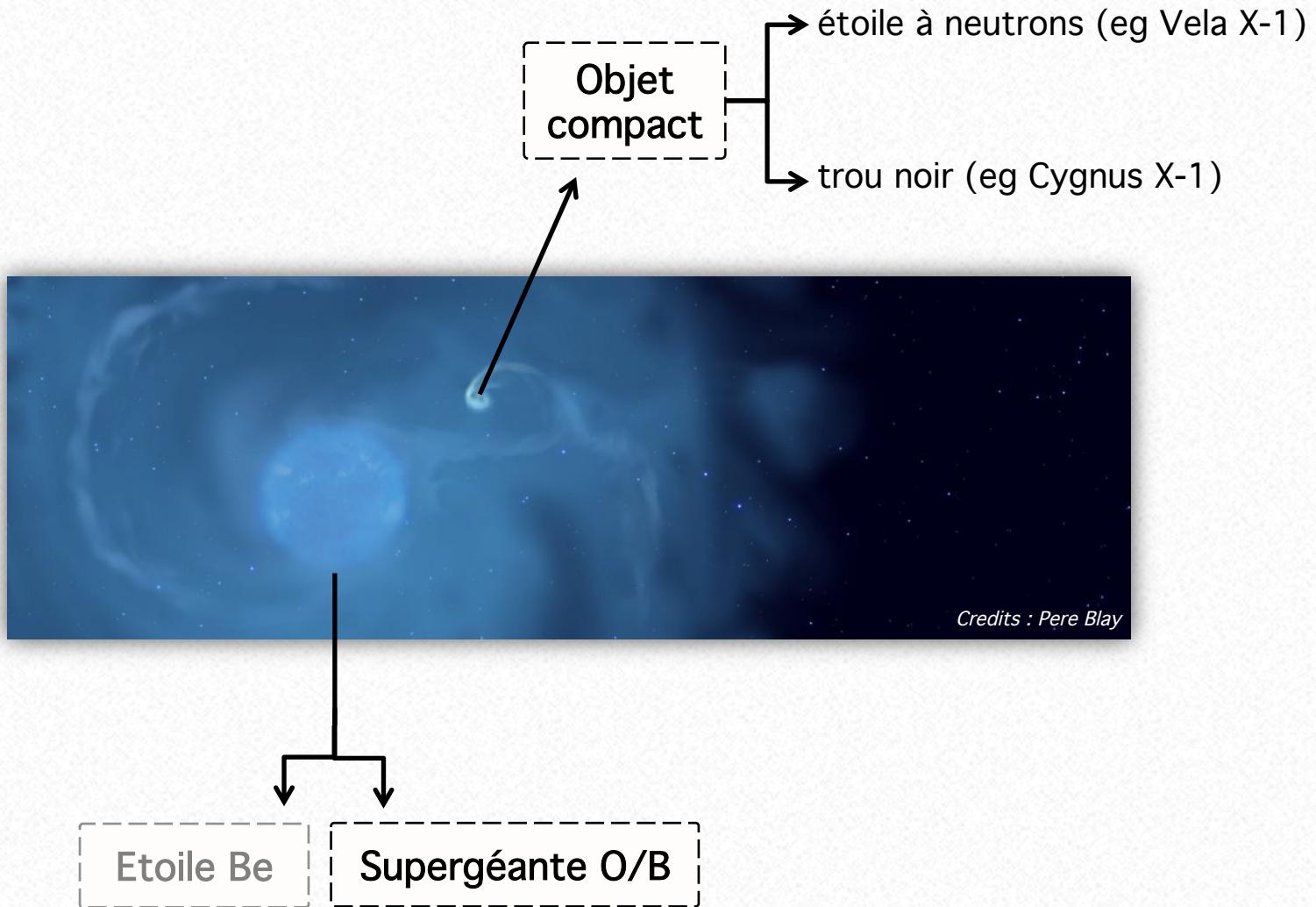
- ↳ vents
- ↳ transferts

Étoile massive

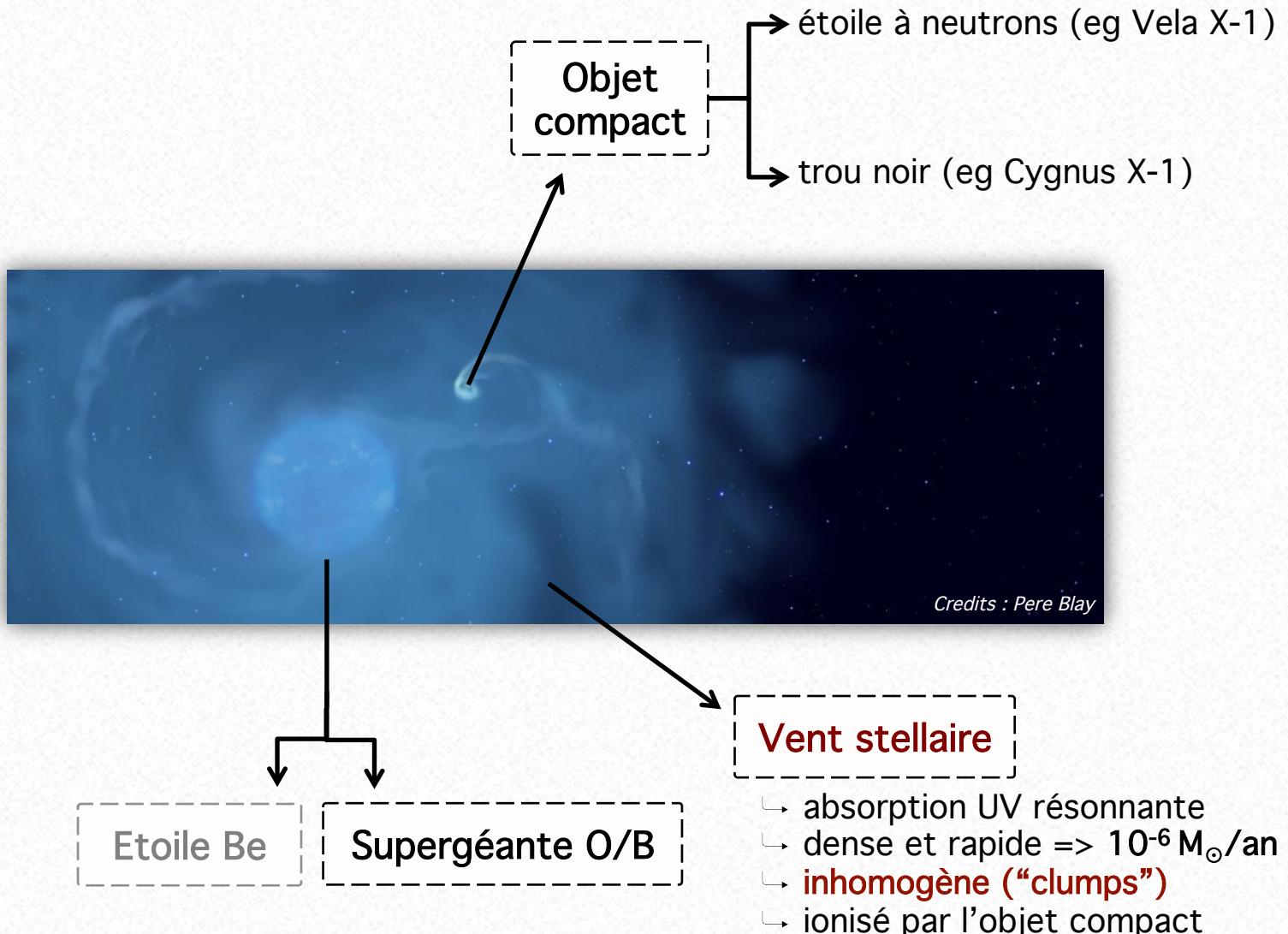
# Binaires X de forte masse – Portrait



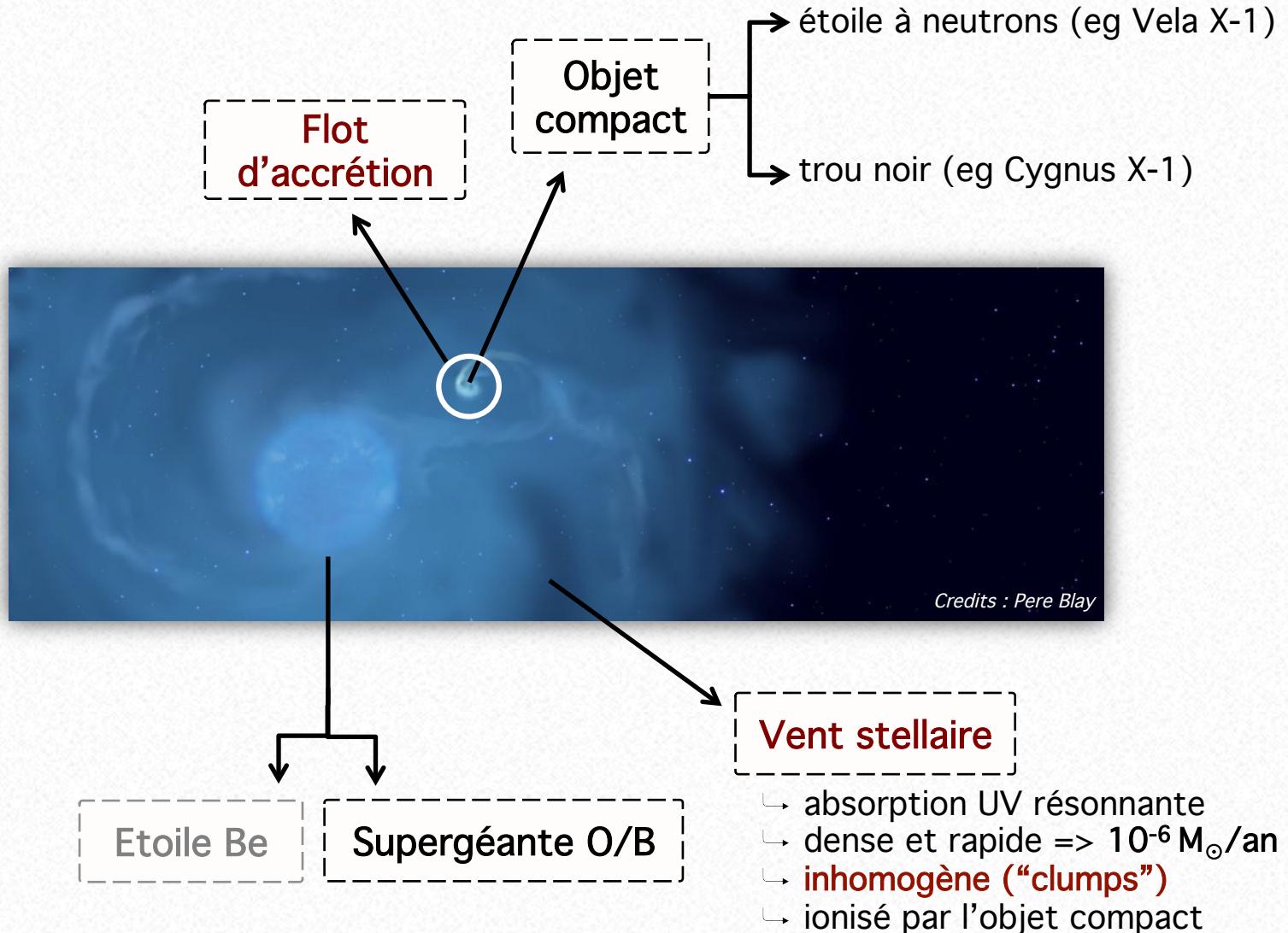
# Binaires X de forte masse – Portrait



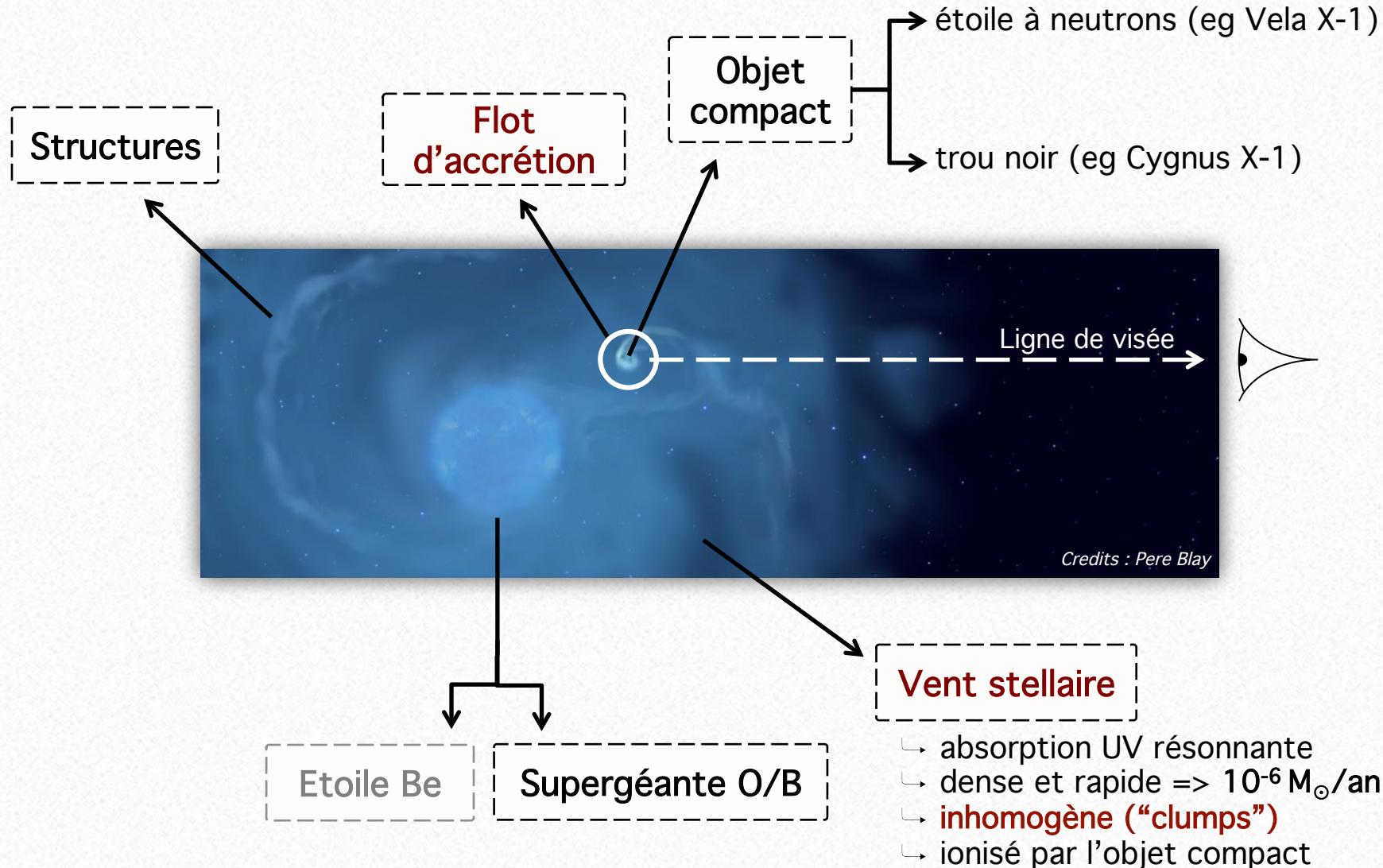
# Binaires X de forte masse – Portrait



# Binaires X de forte masse – Portrait



# Binaires X de forte masse – Portrait



# Méthodologie : modélisation & simulations numériques

**MPI-AMRVAC 2.0**

Tóth & Keppens 1997

## LA PHYSIQUE

- ↳ lois de conservation
- (magnéto-)hydrodynamiques
- ↳ newtonien ou relativiste
- ↳ compressible & résistif
- ↳ transfert radiatif

## LE NUMÉRIQUE

- ↳ volumes finis
- ↳ maille adaptative
- ↳ géométries multiples

## CONTRIBUTIONS SIGNIFICATIVES

- ↳ grille auto-similaire
- ↳ conservation du moment cinétique
- ↳ flux visqueux

## CALCUL HAUTE PERFORMANCE

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

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



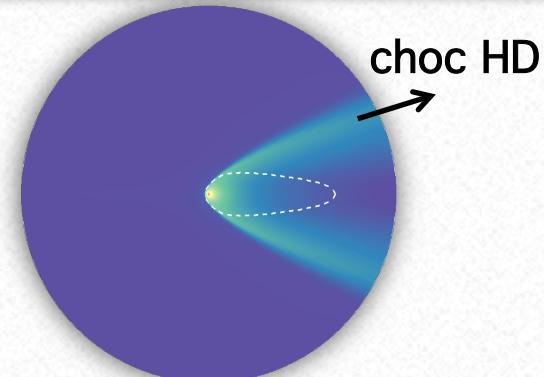
# Binaires X de forte masse – Le vent stellaire

**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

vent  
→



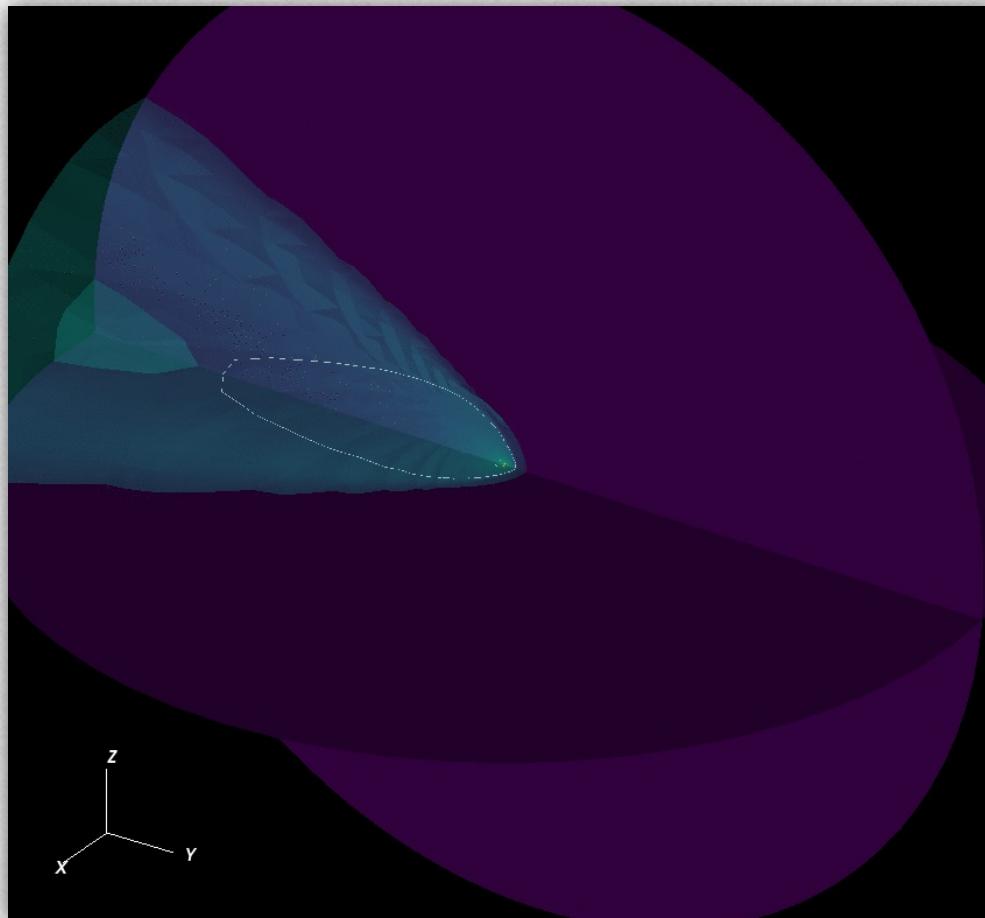
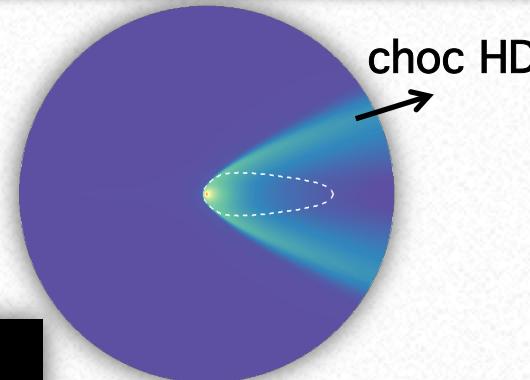
# Binaires X de forte masse – Le vent stellaire

**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

vent  
→

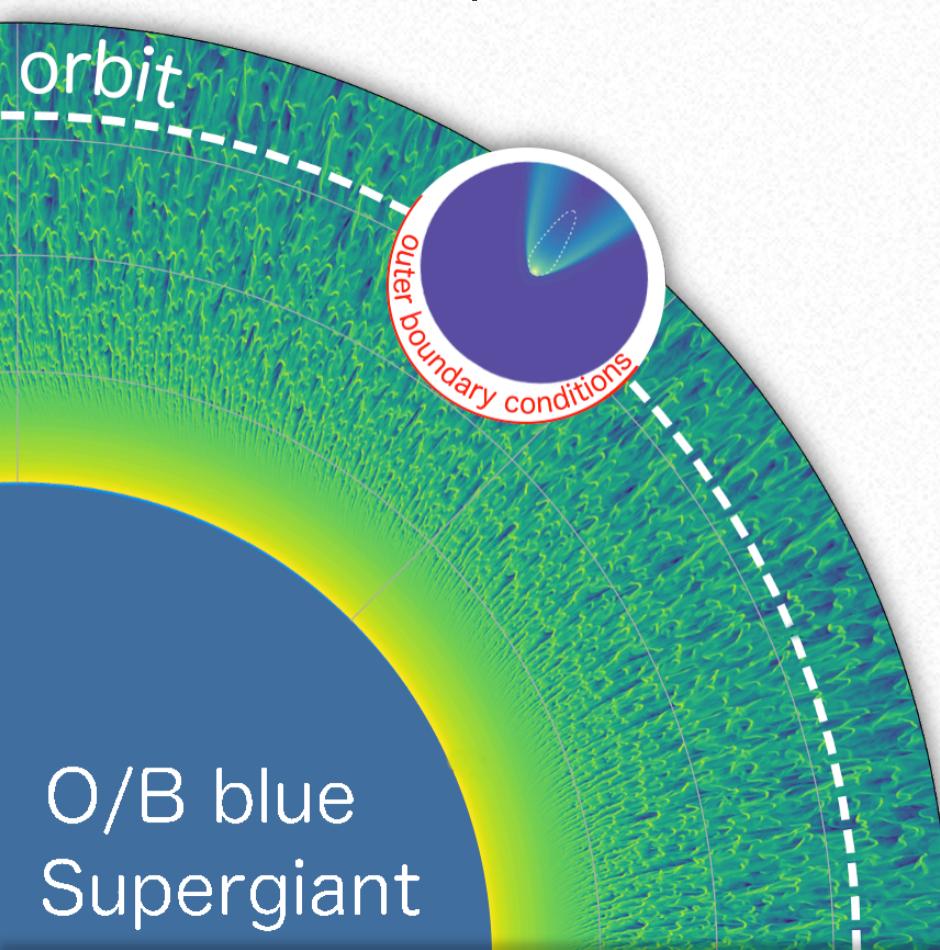


# Binaires X de forte masse – Le vent stellaire

**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

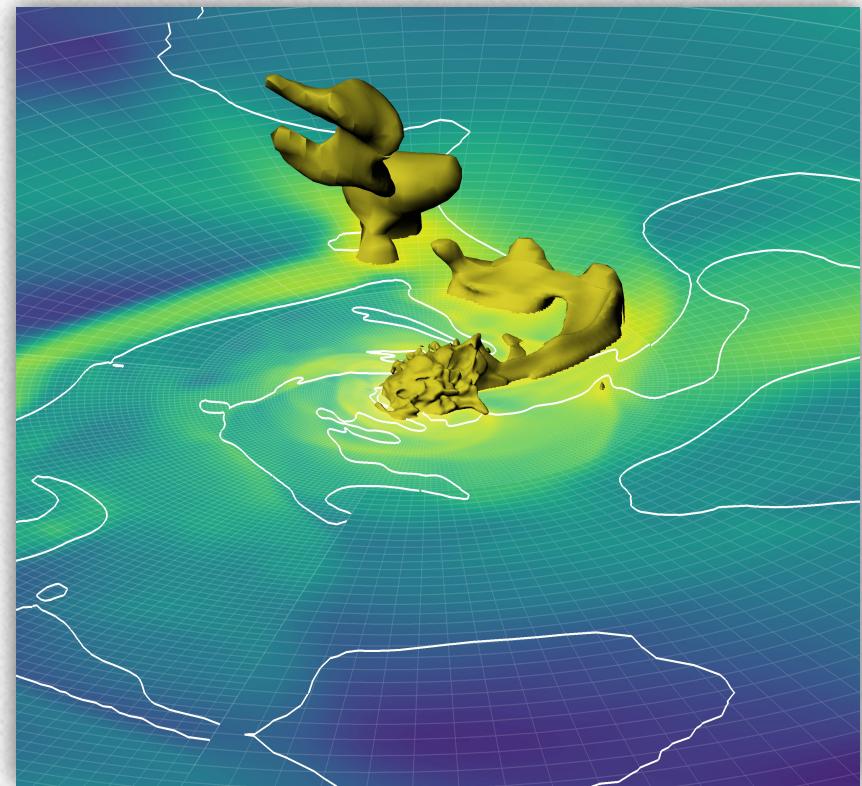
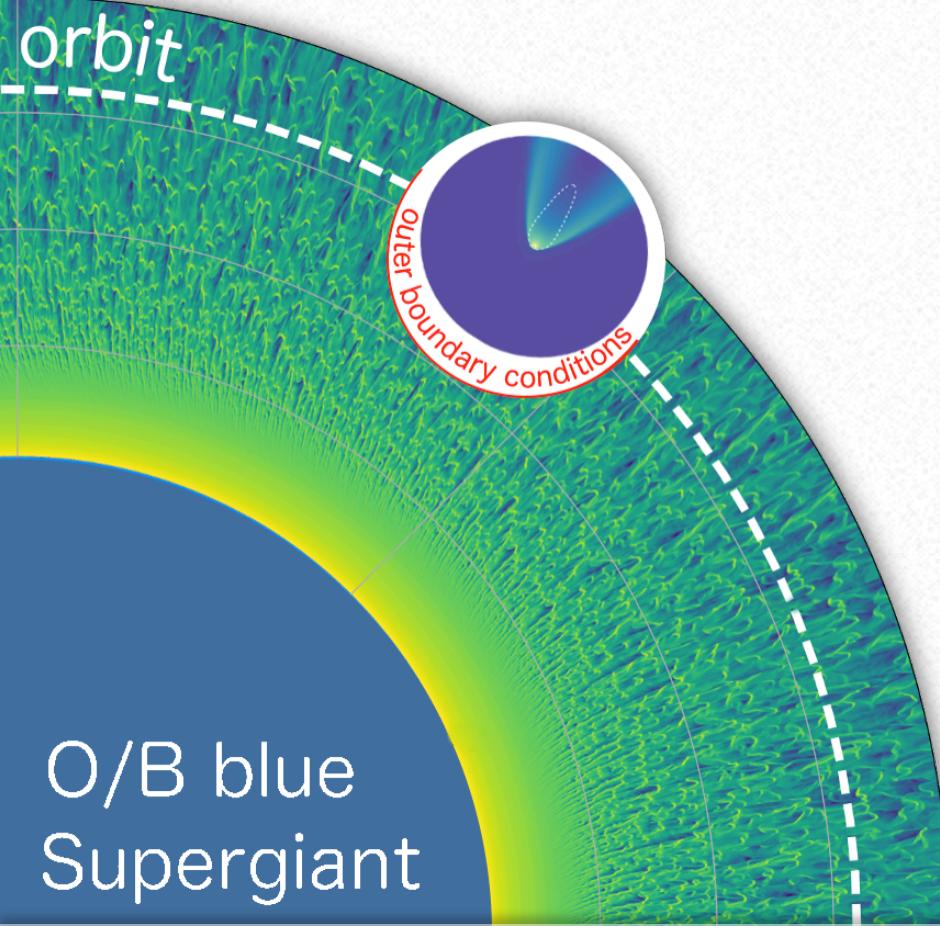


# Binaires X de forte masse – Le vent stellaire

**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



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

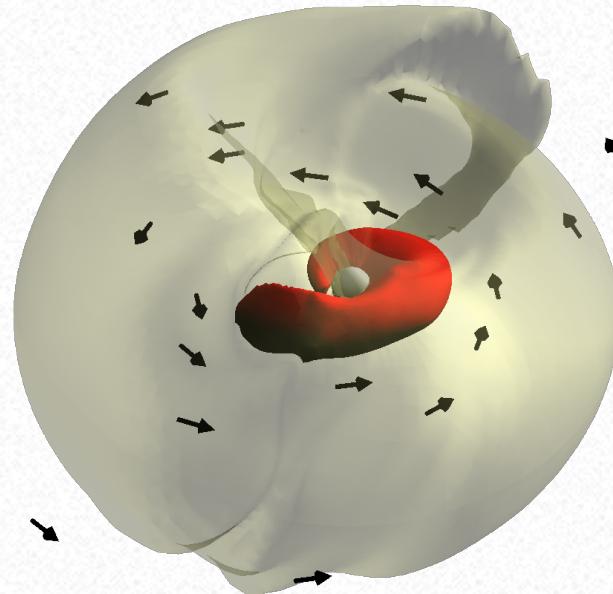
# Binaires X de forte masse – Le flot d'accrétion

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

WASO code + AMRVAC

Des disques peuvent être formés par capture du vent

- ↳ origine du disque observé dans Cygnus X-1
- ↳ prédition d'un disque dans Vela X-1



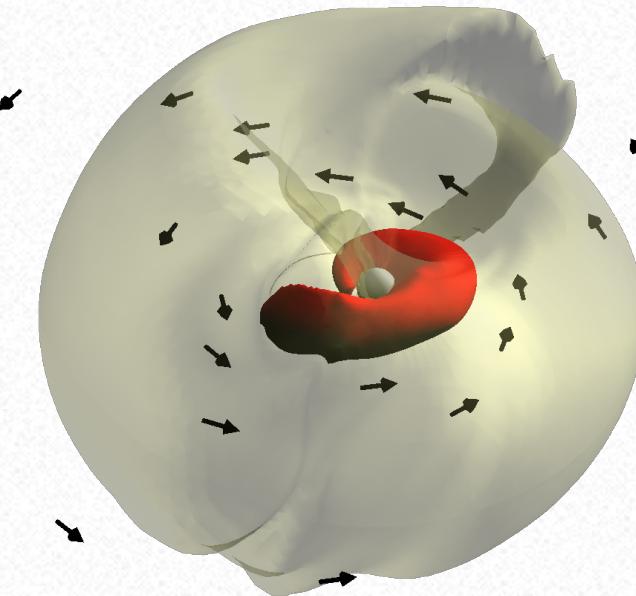
# Binaires X de forte masse – Le flot d'accrétion

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

WASO code + AMRVAC

Des disques peuvent être formés par capture du vent

- ↳ origine du disque observé dans Cygnus X-1
- ↳ prédition d'un disque dans Vela X-1

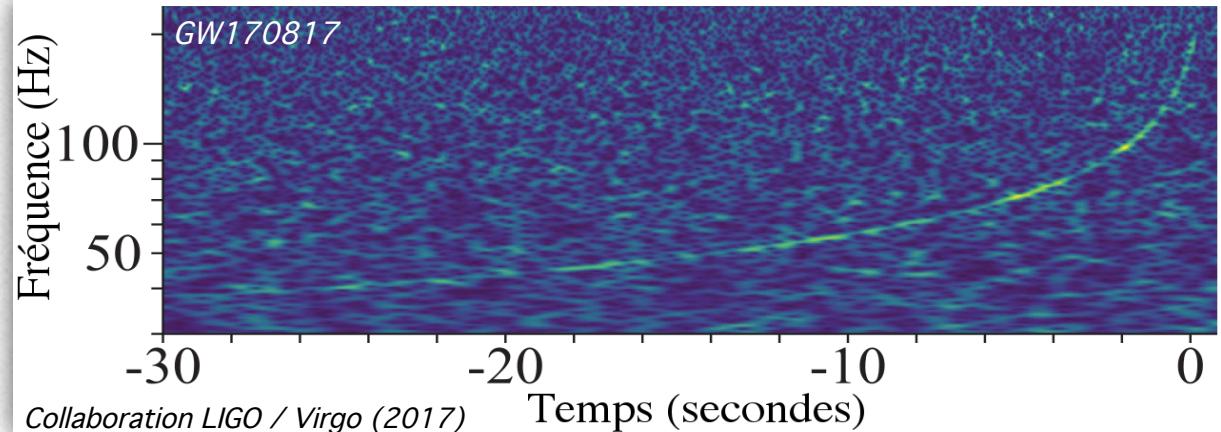


# Contreparties électromagnétiques de la coalescence d'objets compacts

## ONDES GRAVITATIONNELLES

↳ coalescence  
d'étoiles à neutrons

Nature du reliquat?

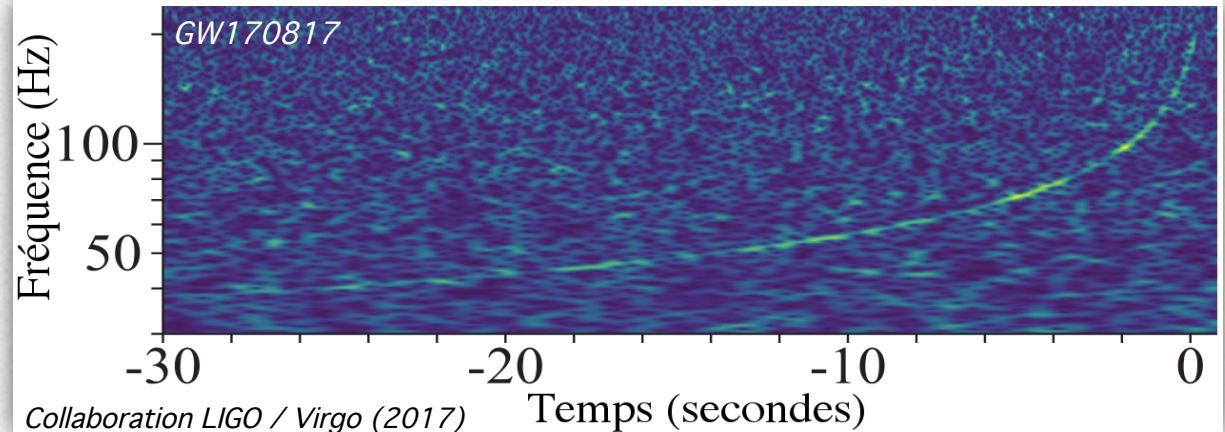


# Contreparties électromagnétiques de la coalescence d'objets compacts

## ONDES GRAVITATIONNELLES

- ↳ coalescence d'étoiles à neutrons

## Nature du reliquat?



## SURSAUT GAMMA COURT

Emission transitoire (<2s)

Mécanisme

- ↳ **jet relativiste**
- ↳ chocs internes
- => émission  $\gamma$  focalisée

↳ *R. Mochkovitch*  
↳ *F. Daigne*



## KILONOVA

Pic après  $\sim 1$  semaine  
Optique  $\rightarrow$  proche infra-rouge

Sources de chauffage

- ↳ **capture de neutrons**  
*E. Vangioni*
- ↳ retombées d'accrétion
- ↳ **chauffage magnétique**

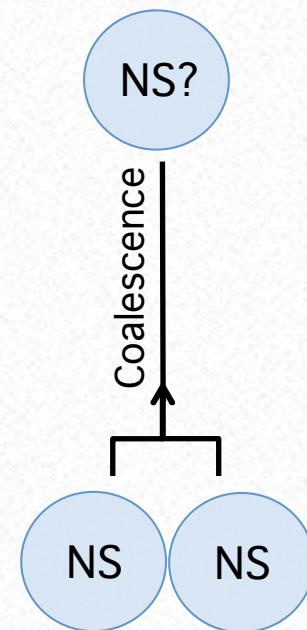
## RÉMANENCE

Emission synchrotron  
Rayons X  $\rightarrow$  radio

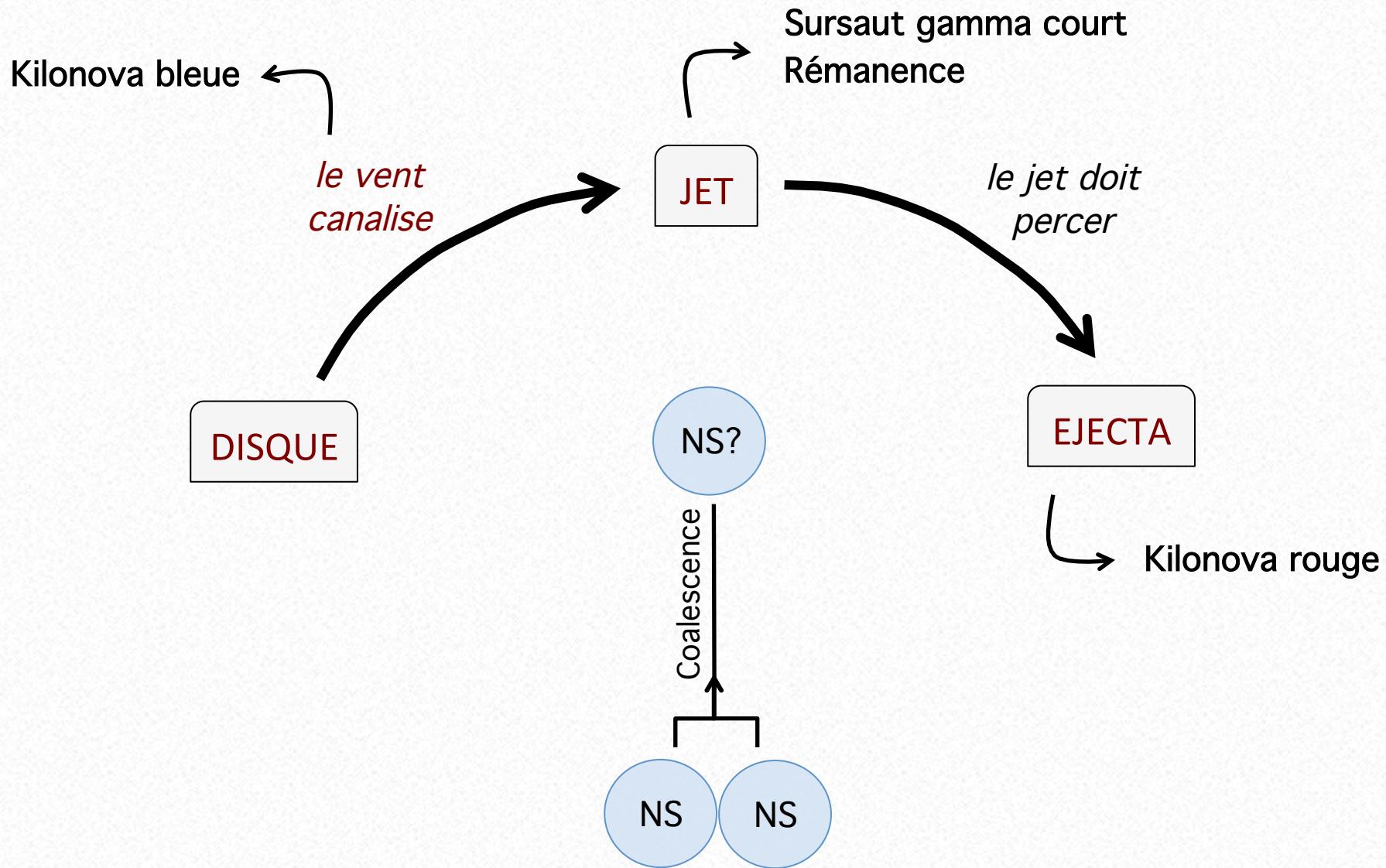
Choc externe



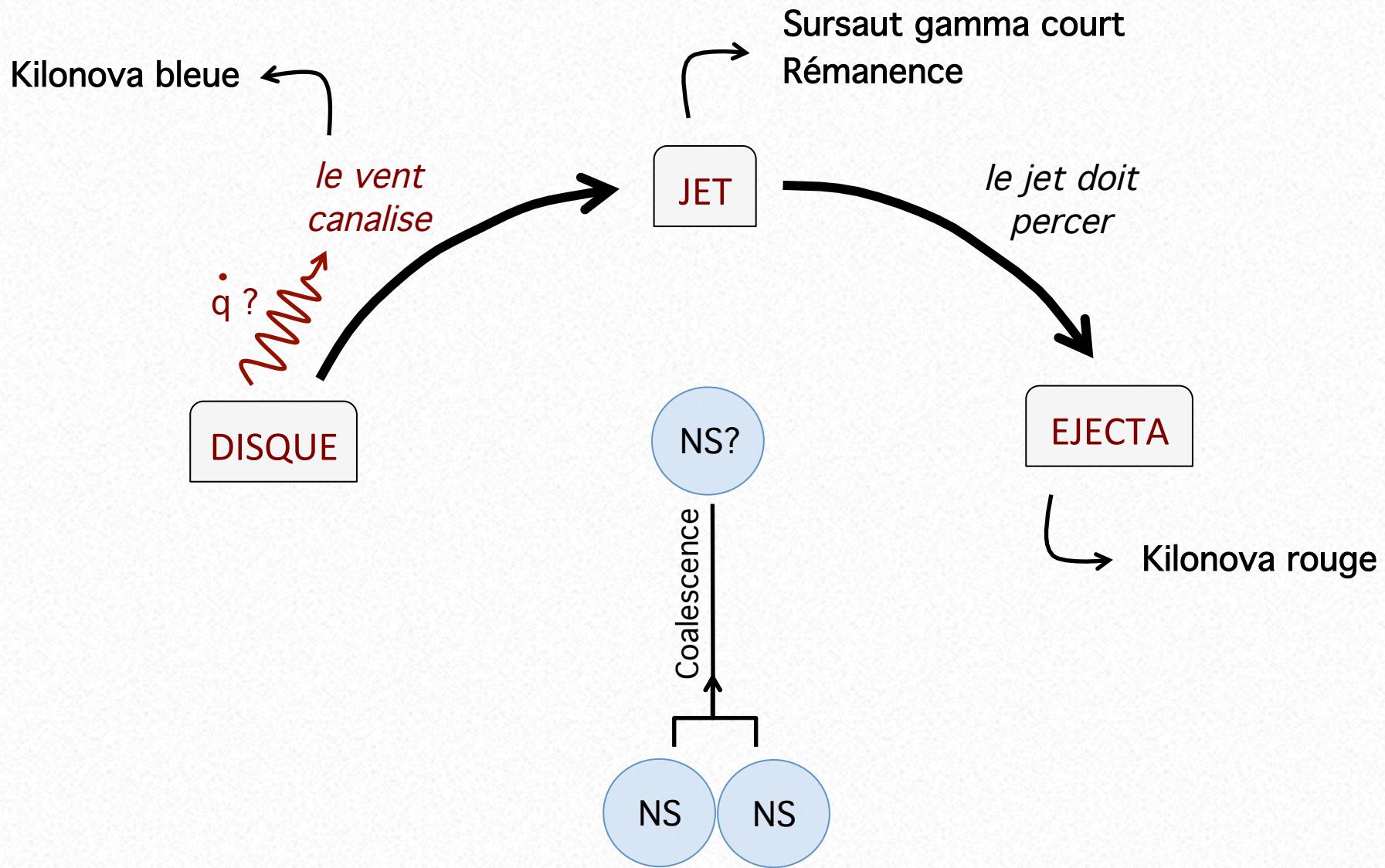
# Synthèse du projet de recherche



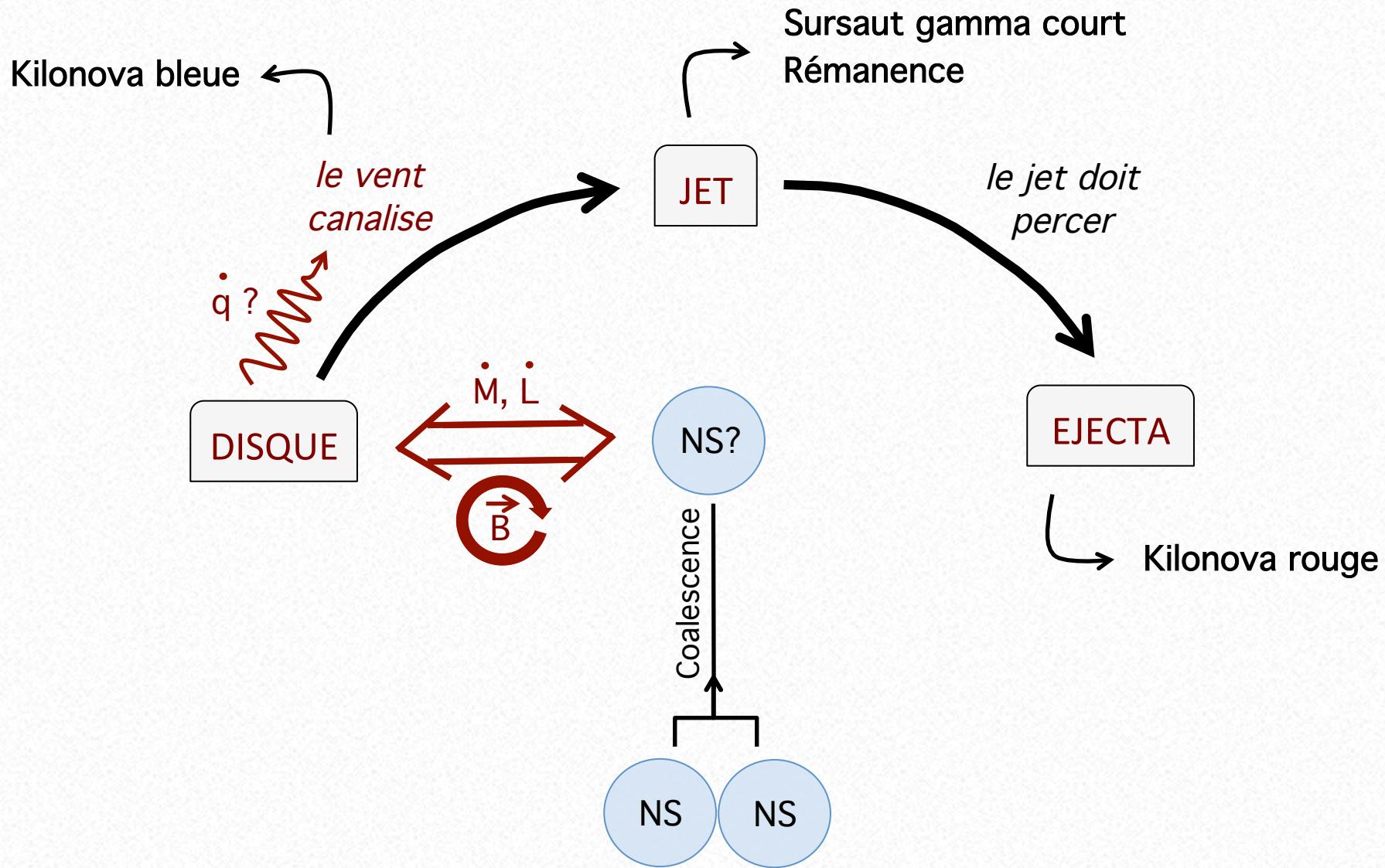
# Synthèse du projet de recherche



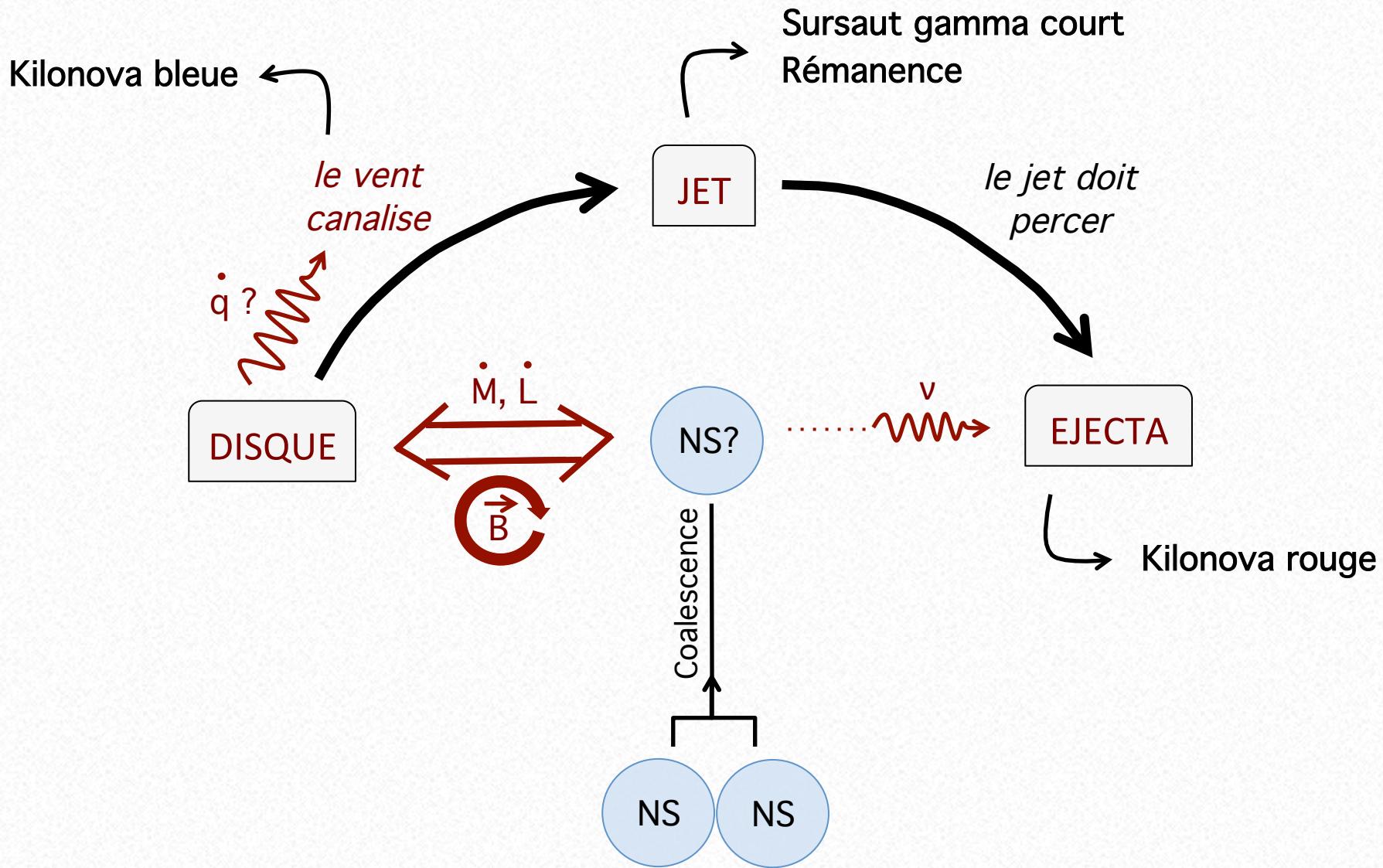
# Synthèse du projet de recherche



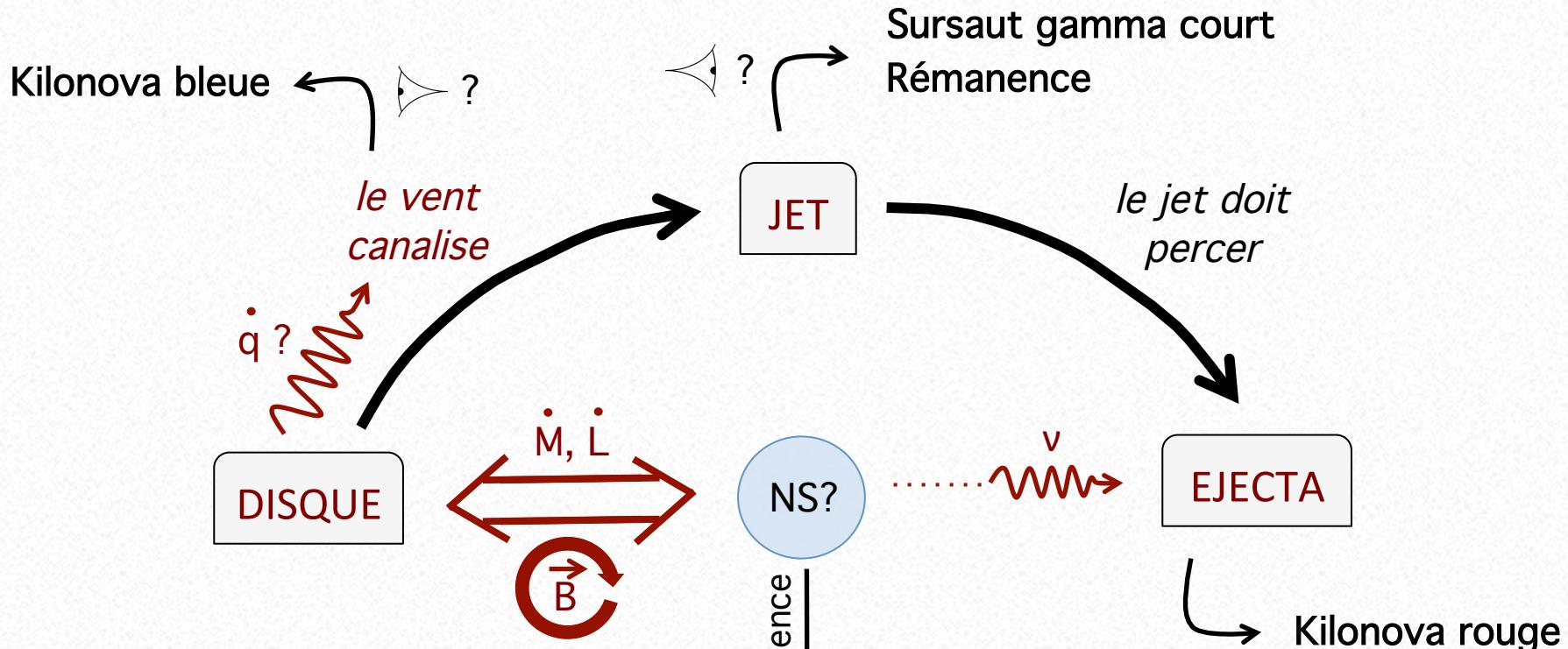
# Synthèse du projet de recherche



# Synthèse du projet de recherche

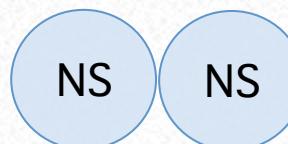


# Synthèse du projet de recherche

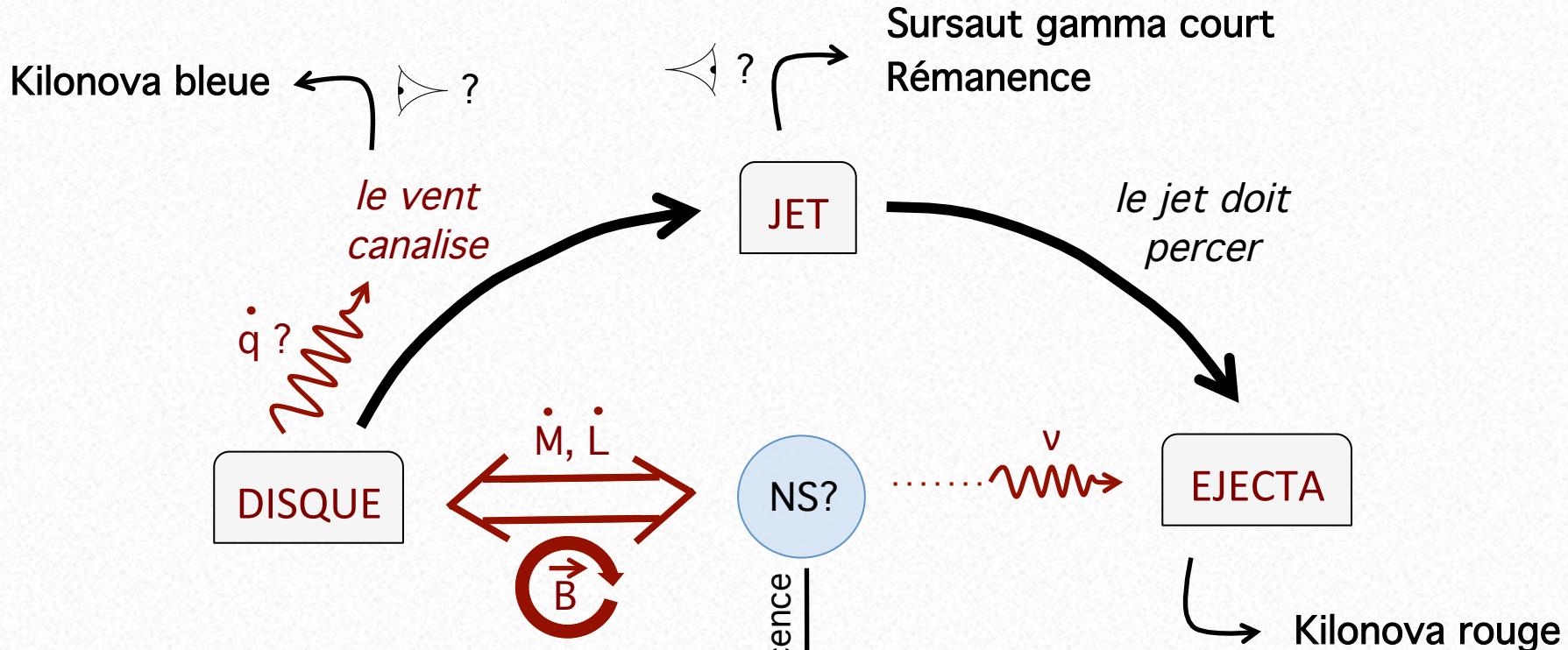


Nécessité de l'outil numérique

- ↳ interconnexions
- ↳ simulations 3D
- ↳ multi-échelles
- ↳ **M. Volontieri**
- ↳ **Y. Dubois**



# Synthèse du projet de recherche



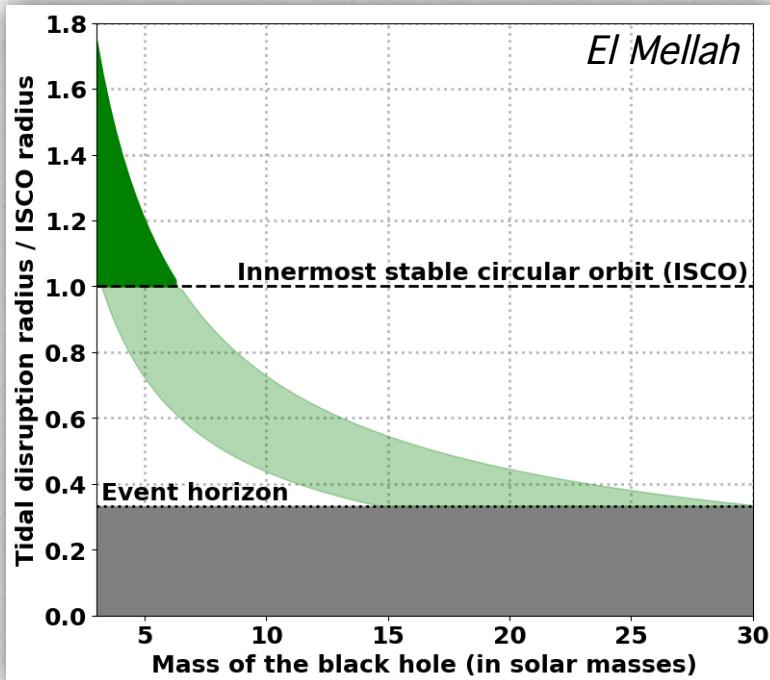
Nécessité de l'outil numérique

- ↳ interconnexions
- ↳ simulations 3D
- ↳ multi-échelles
- ↳ **M. Volontieri**
- ↳ **Y. Dubois**



Complémentarité avec le GReCO

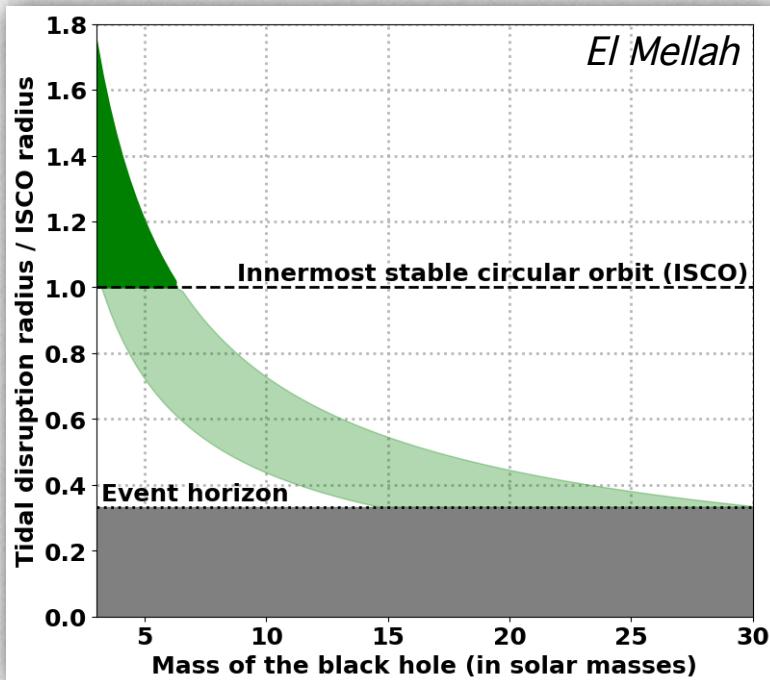
- ↳ nature du reliquat



DISQUE D'ACCRÉTION

Masse & propriétés?

Conditions de formation du disque?



## DISQUE D'ACCRÉTION

Masse & propriétés?

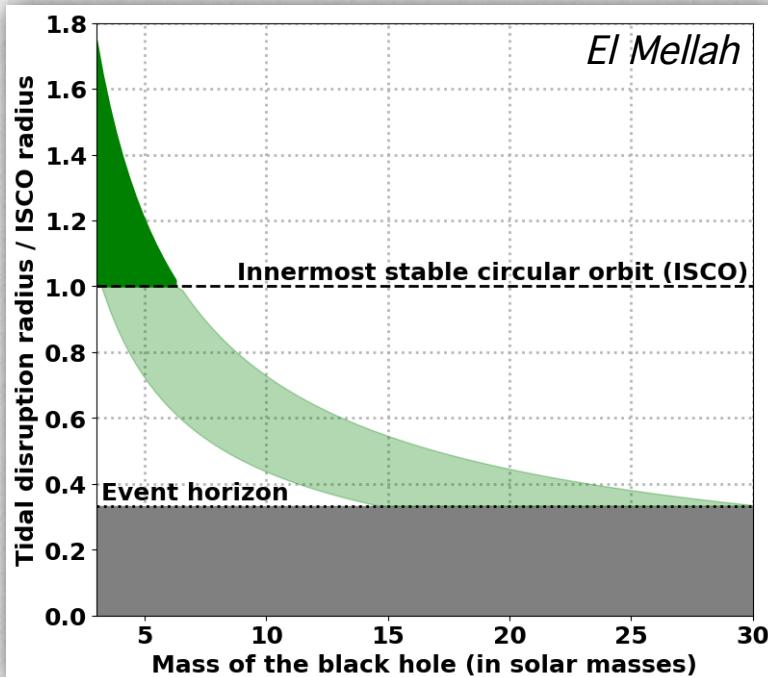
Vent de disque

- ↳ champ magnétique
- ↳ transport des neutrinos

Conditions de formation du disque?

Mécanisme de lancement du vent?

Impact de la ligne de visée?



## DISQUE D'ACCRÉTION

Masse & propriétés?

Vent de disque

- ↳ champ magnétique
- ↳ transport des neutrinos

Conditions de formation du disque?

Mécanisme de lancement du vent / du jet?

Impact de la ligne de visée?

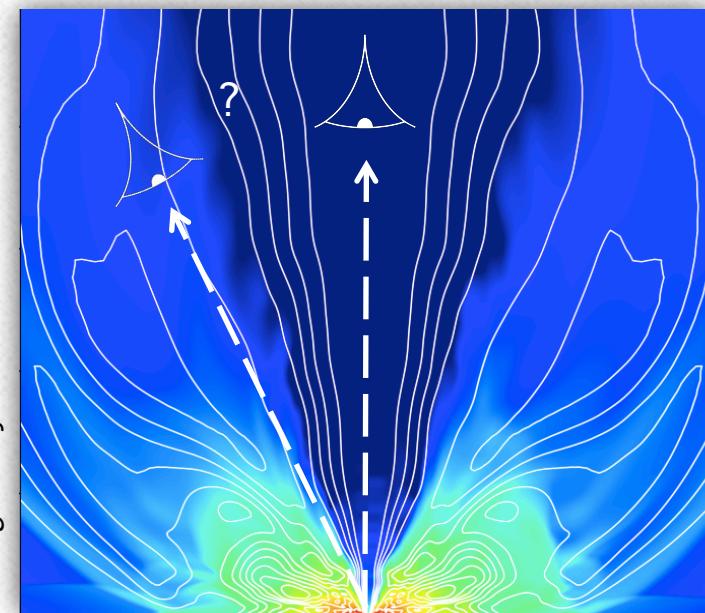
## JET RELATIVISTE

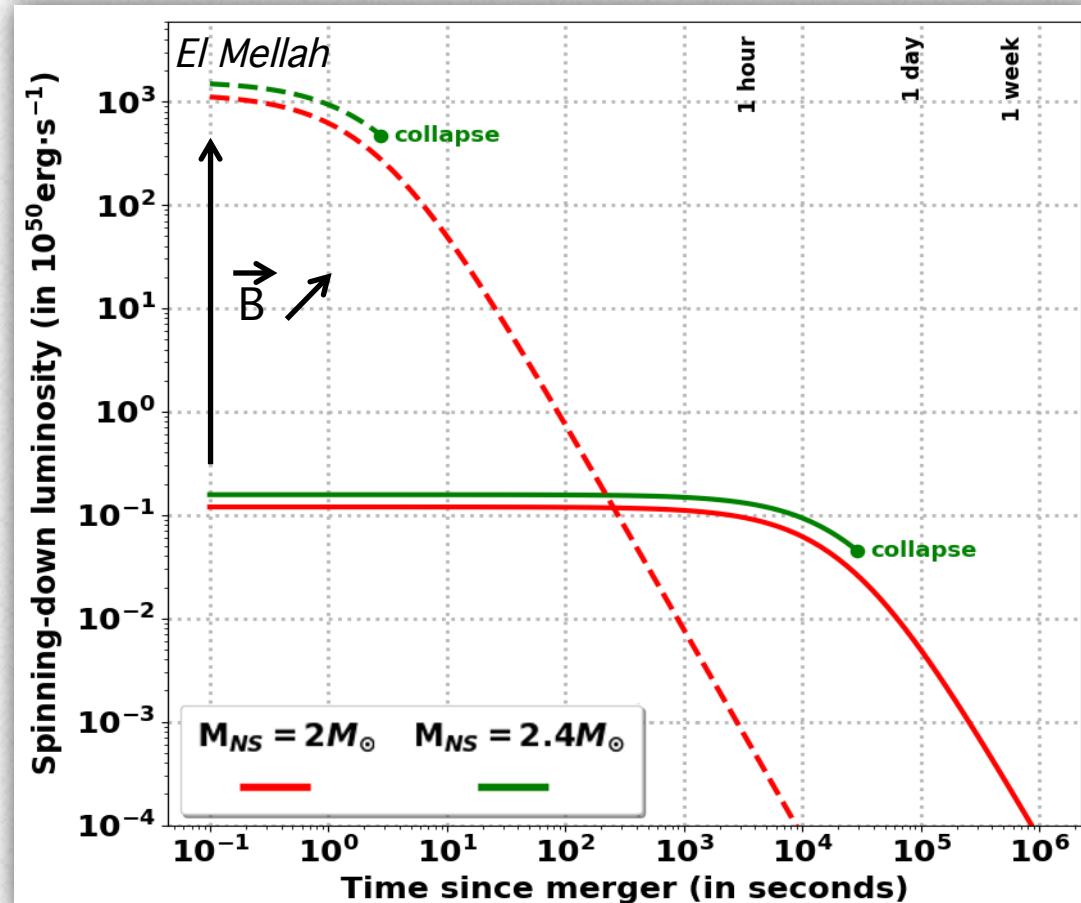
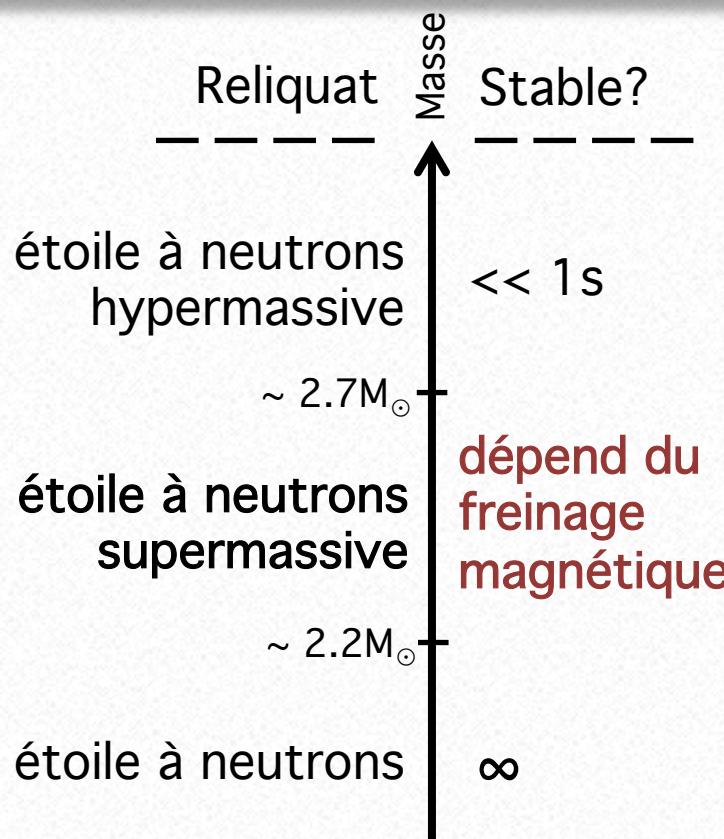
Chocs internes

- ↳ *F. Daigne & R. Mochkovitch*

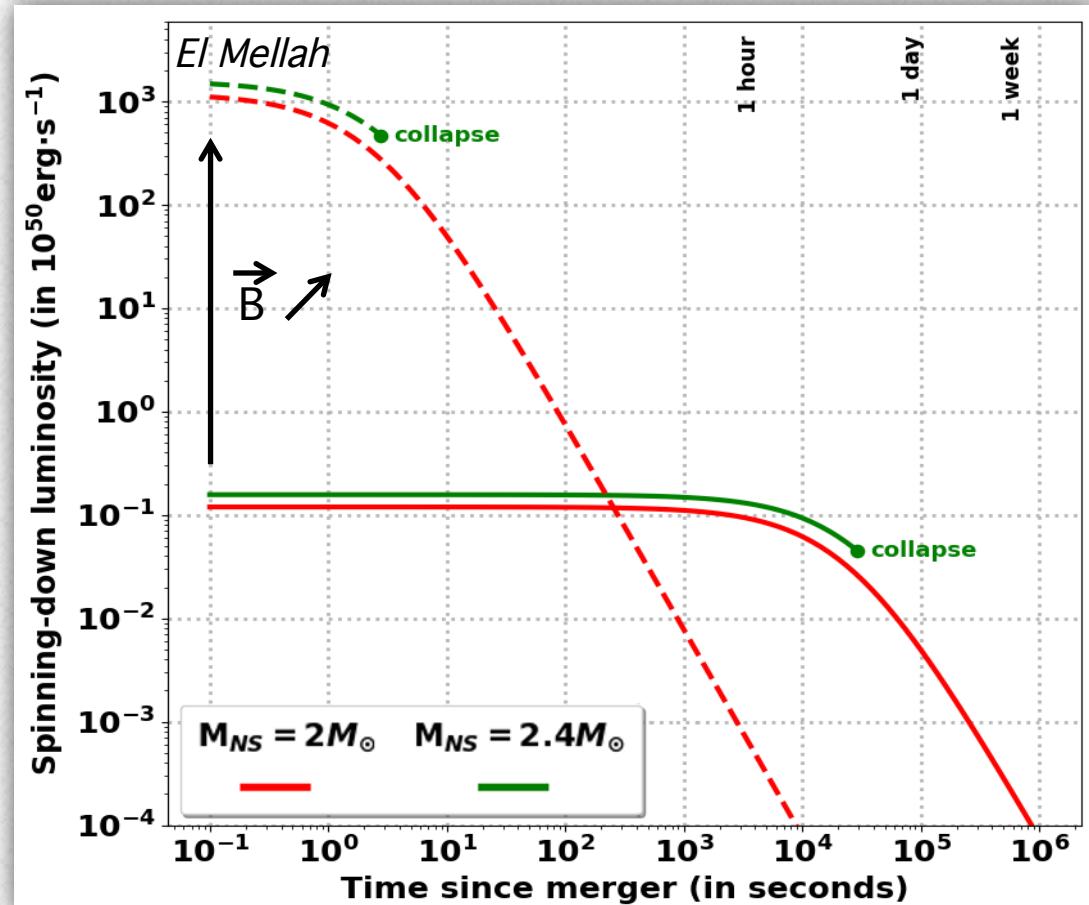
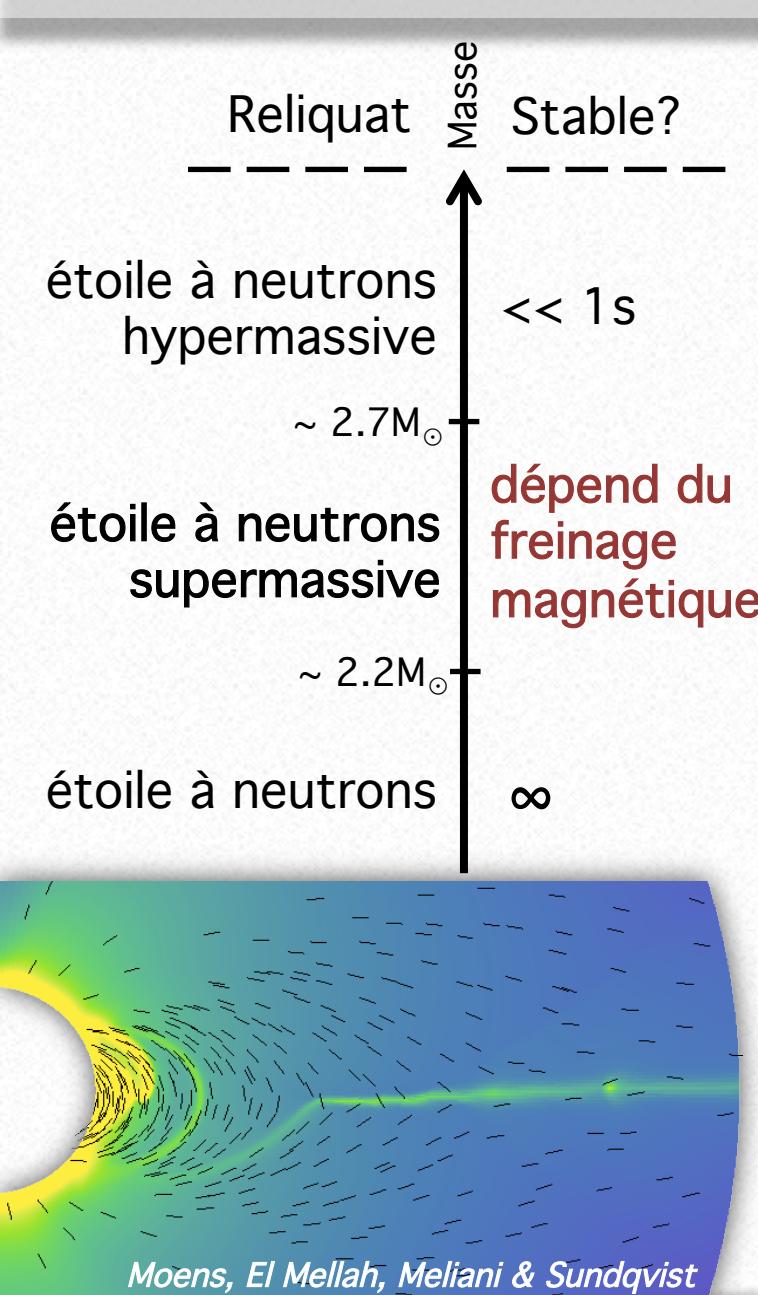


Kathirgamaraju+18





Temps de vie du reliquat supermassif?



Couplage magnétosphère / ejecta

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

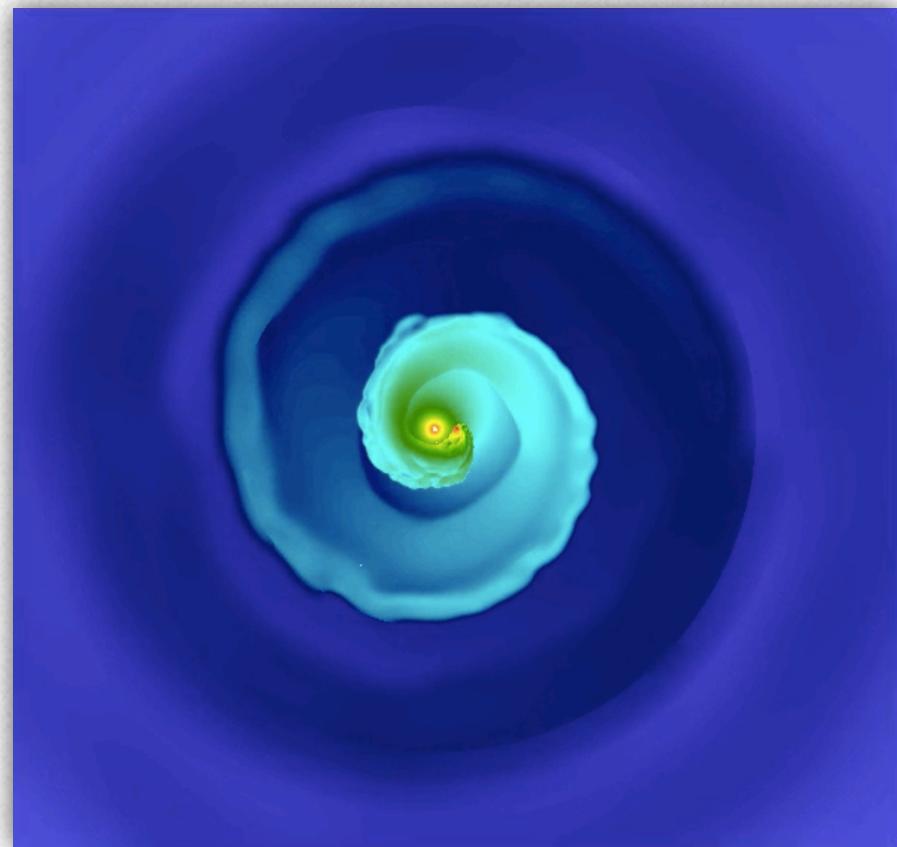
ISSI Bern?

Temps de vie du reliquat supermassif?

**Decin et al., Nature Astronomy 2019**

Morphologie 3D de l'enveloppe circumstellaire autour des supergéantes rouges

- ↳ ma contribution : impact d'un compagnon
- ↳ paramétrisation de l'ejecta



**El Mellah, Decin et al., in prep**

### Decin et al., Nature Astronomy 2019

Morphologie 3D de l'enveloppe circumstellaire autour des supergéantes rouges

- ↳ ma contribution : impact d'un compagnon
- ↳ paramétrisation de l'ejecta

### CHAUFFAGE NUCLÉAIRE DE LA KILONOVA

Fraction électronique?

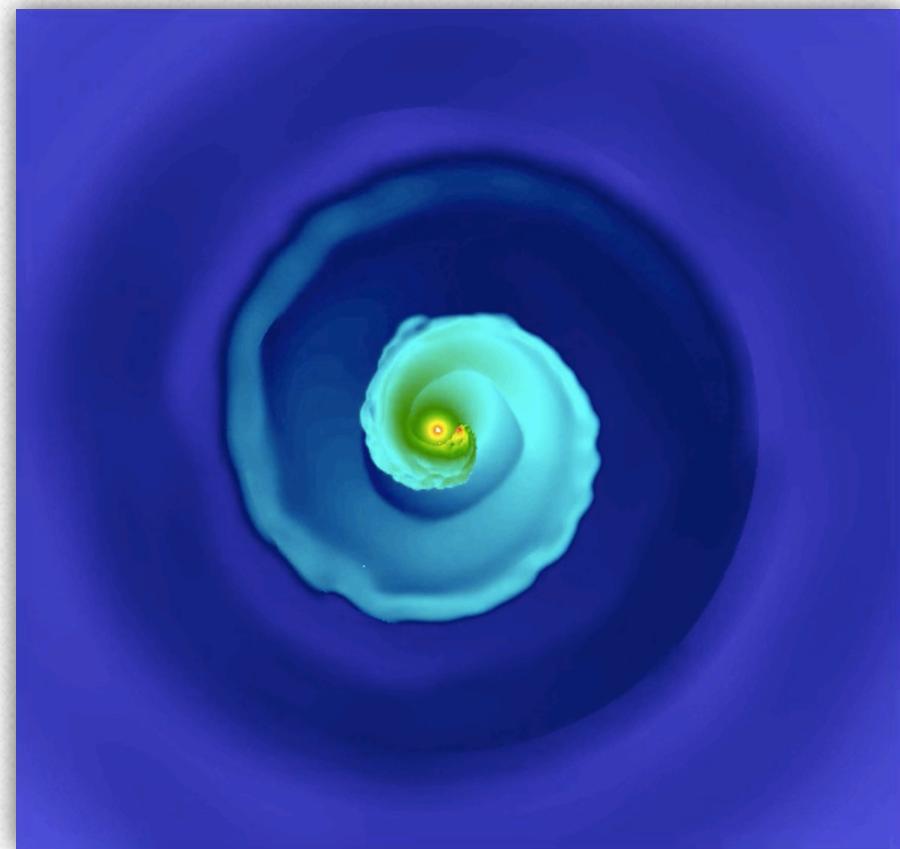
Paramétrisation *Elisabeth Vangioni*

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



Flux de neutrinos et rendement?

Opacité et spectre de la kilonova?



El Mellah, Decin et al., in prep

# Expérience d'enseignement

## QUALIFICATIONS

- ↳ 2011 Agrégation de Sciences physiques, option Physique – reçu 2<sup>ème</sup>
- ↳ 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

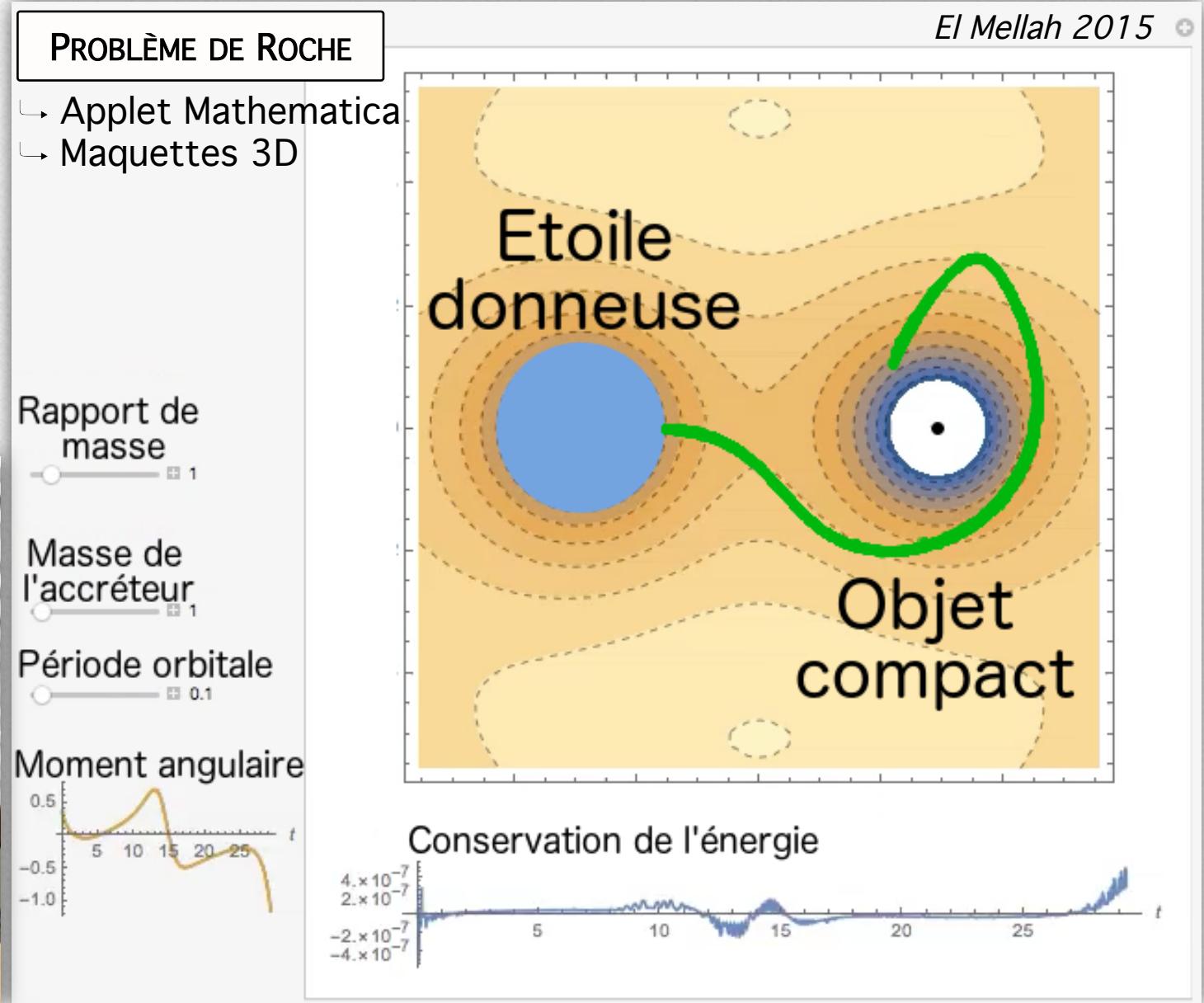
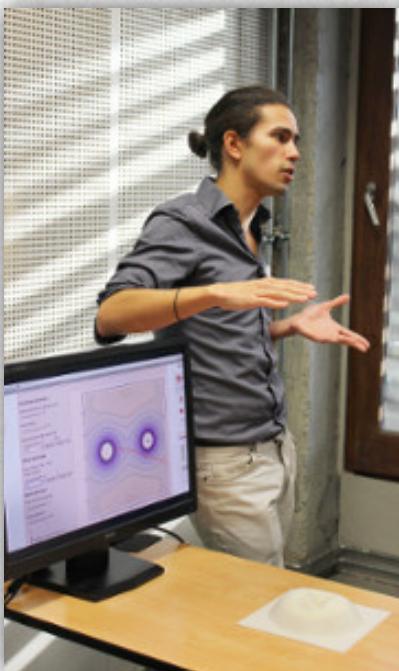
**KU LEUVEN**

# Méthodologie pédagogique

## Assimilation

- ↳ inductive
- ↳ immersive
- ↳ interactive

Fête de la Science 2015



# Insertion dans l'équipe pédagogique



Nouvelles maquettes L1 & Master (2019) puis L2/L3 (2020)

Diversification des profils des étudiants : majeur / mineur

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

## LICENCE

### UFR de Physique

- ↳ TD
- ↳ TP
- ↳ CM par la suite
- ↳ UE Physique Méca
- ↳ L1-L2 ARE
- ↳ L1 Python

### Faculté de Médecine

- ↳ PACES

## CAPES/AGRÉGATION

### Agrégation

- ↳ Centre de Montrouge
- ↳ Leçons
- ↳ Montages expérimentaux

### M2 métiers de l'enseignement

- ↳ CAPES

## MASTER

### M1 Astro. & Comologie

- ↳ TP numériques

### M1 Méthodes numériques et informatiques

### Résolution numérique

- ↳ Systèmes d'EDP
- ↳ Différences finies
- ↳ Volumes finis
- ↳ Monte-Carlo

# Conclusion

## T R A V A U X

Thèse soutenue en Septembre 2016

Compétence numérique transverse, simulations haute performance

Modélisation d'objets compacts en interaction avec leur environnement

Mots-clés : objets compacts, accrétion, systèmes binaires, vents

11 papiers

5 1er auteur

323 citations

h-index : 7

i10-index : 5

## P R O J E T

Contreparties électromagnétiques de la coalescence d'objets compacts

- ↳ à court terme : paramétrisation du lancement du vent / du jet / de l'éjecta
- ↳ à moyen terme : couplage magnétosphère / disque
- ↳ à long terme : accrétion / éjection, nucléosynthèse et émission

## ENSEIGNEMENT

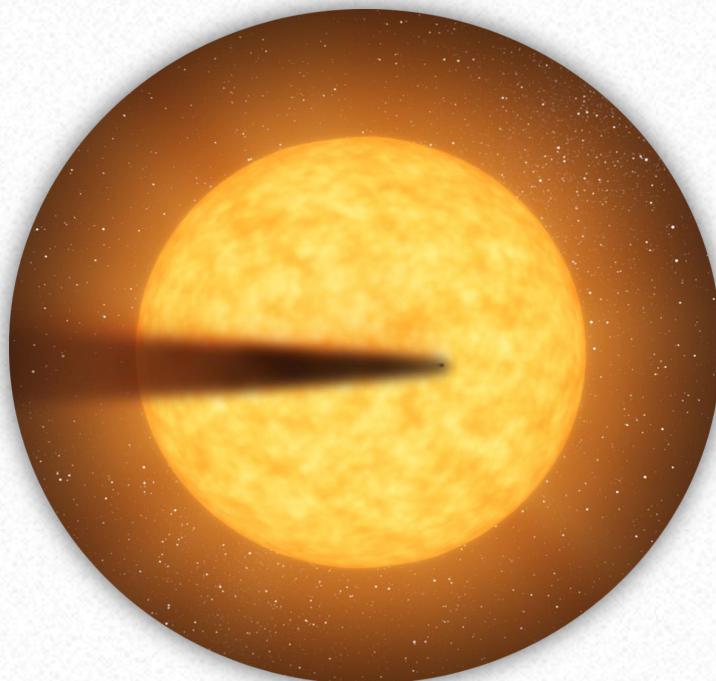
Agrégation & qualification, ~300h de cours depuis 6 ans

- ↳ Licence
- ↳ Agrégation / CAPES
- ↳ Master

# 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

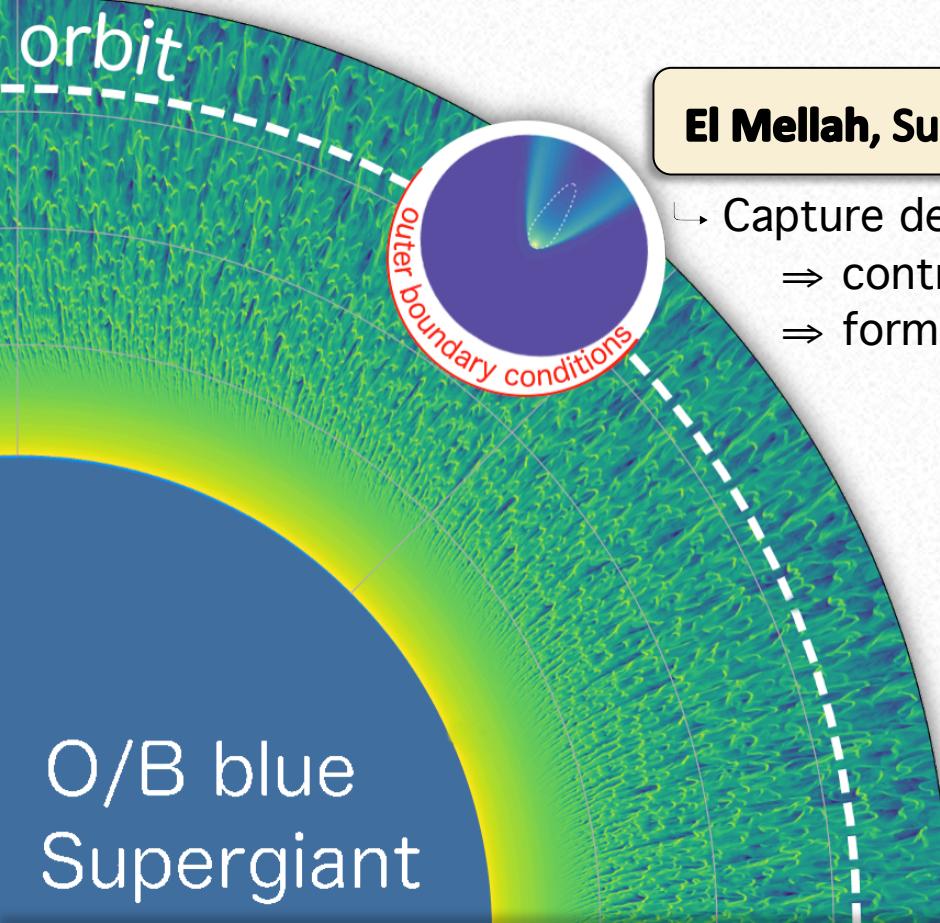
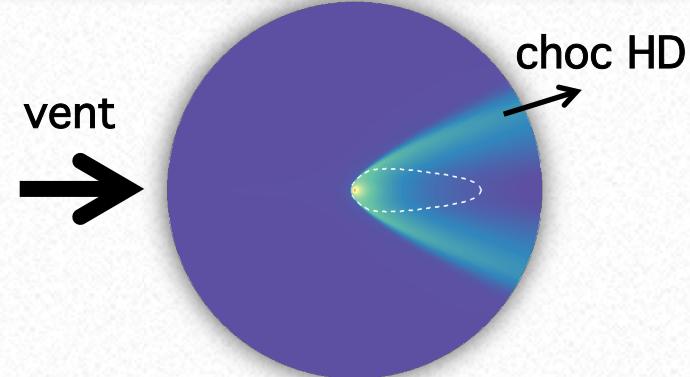
**Rappaport et al., ApJ 2013**

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

# Binaires X de forte masse – Le vent stellaire

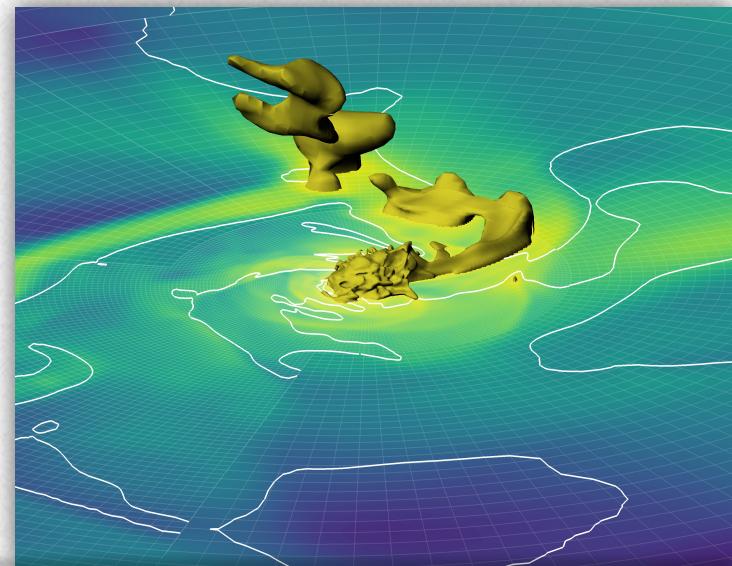
**El Mellah & Casse, MNRAS 2015**

- 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

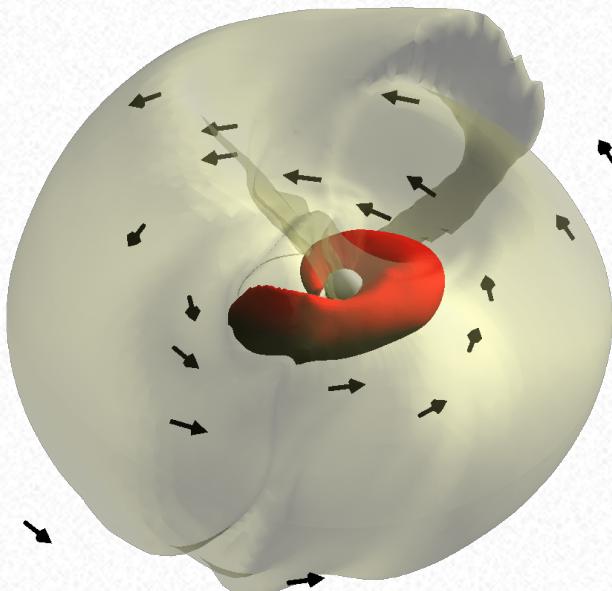


# Binaires X de forte masse – Le flot d'accrétion

El Mellah & Casse, MNRAS 2017

WASO code

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



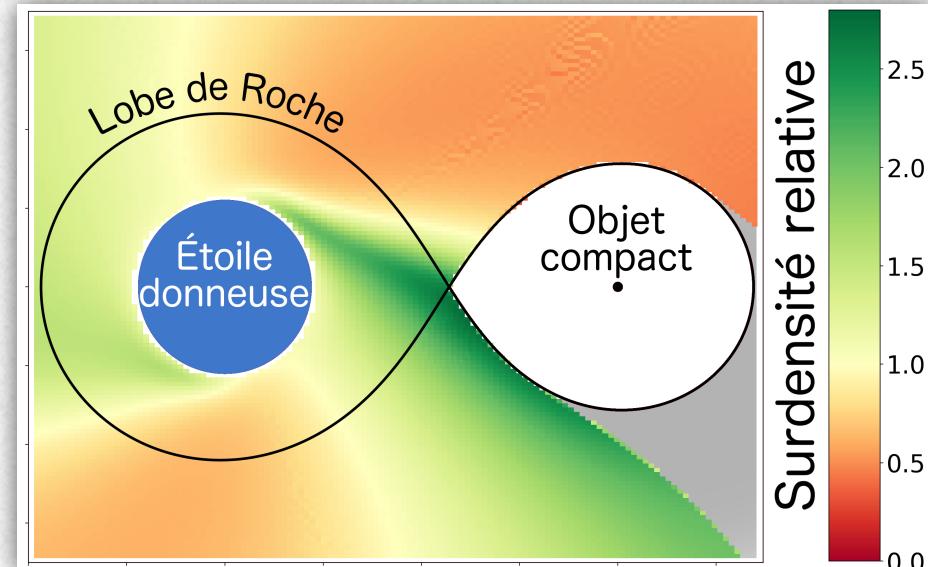
El Mellah, Sundqvist & Keppens, A&A 2019

- 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)

WASO + AMRVAC

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

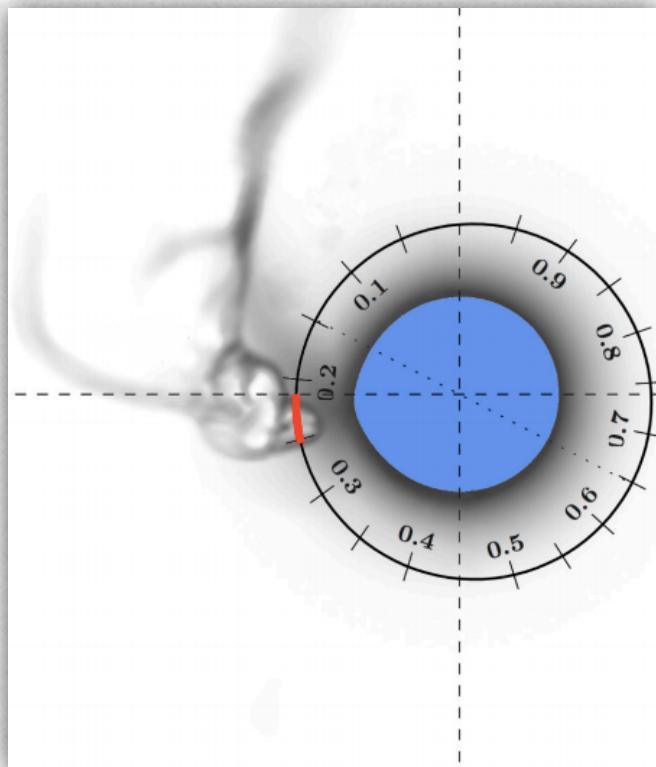
- Caractérisation des disques formés par capture du vent
  - ⇒ origine du disque observé dans Cygnus X-1
  - ⇒ prédiction d'un disque dans Vela X-1



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

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

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

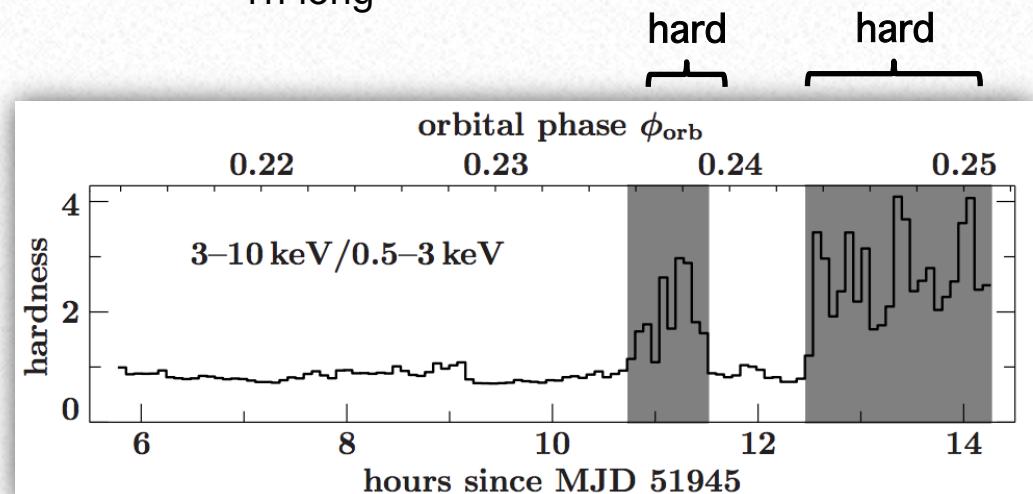


Phase  $\sim 0.25$

- ↪ no tail in the L.O.S

Hardness enhanced

- ↪ not from source
- ↪ increase in  $N_H$  (x7)
- ↪ 1 h long



Due to clump event?

- ↪ too small (1% of  $R_{\text{star}}$ )
- ↪ too packed
- ↪ too fast ( $\sim 1,000 \text{ km/s}$ )

ATHENA

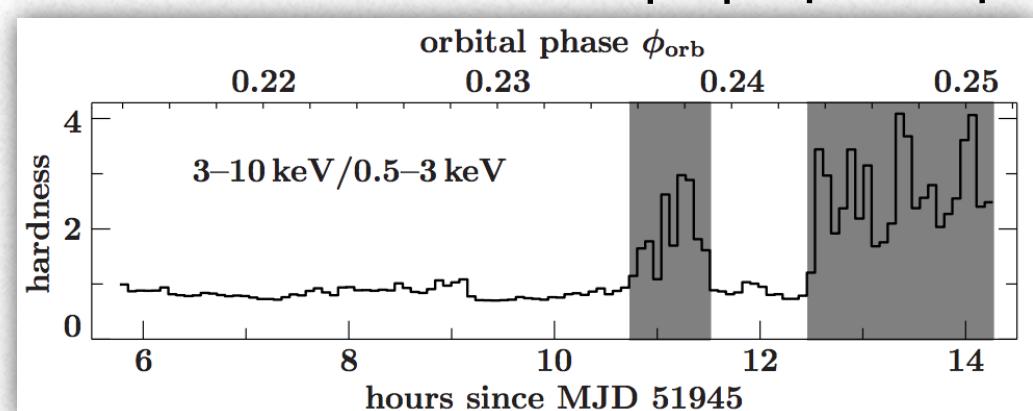
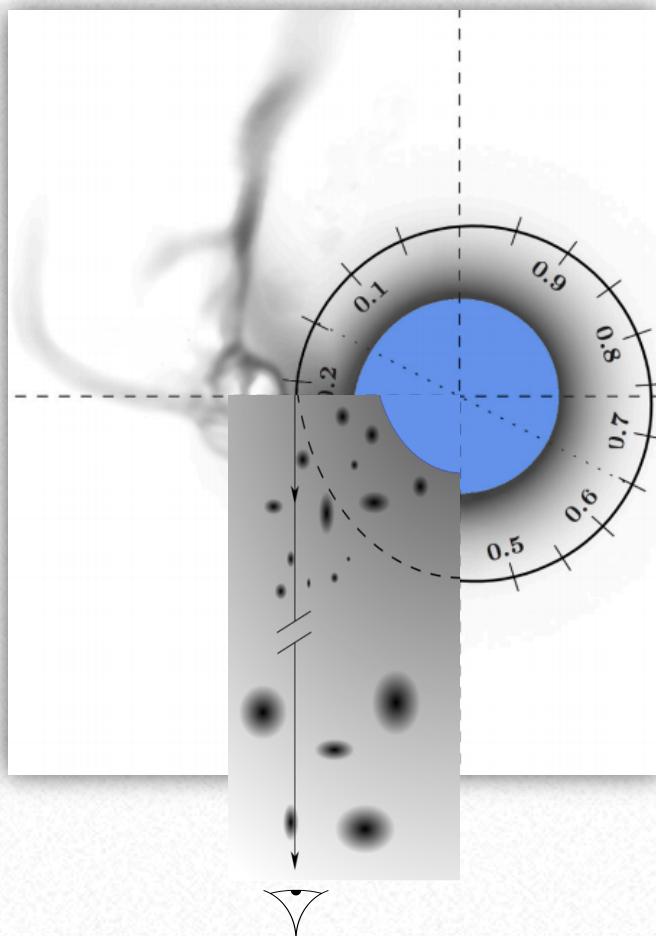


# Binaires X de forte masse (et supergéantes rouges) – le vent stellaire

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

ATHENA

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



Due to clump event?

- ↪ too small (1% of  $R_{\text{star}}$ )
- ↪ too packed
- ↪ **too fast ( $\sim 1,000 \text{ km/s}$ )**

Phase  $\sim 0.25$   
↪ no tail in the L.O.S

Hardness enhanced  
↪ not from source  
↪ increase in  $N_{\text{H}}$  (x7)  
↪ 1h long

# 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

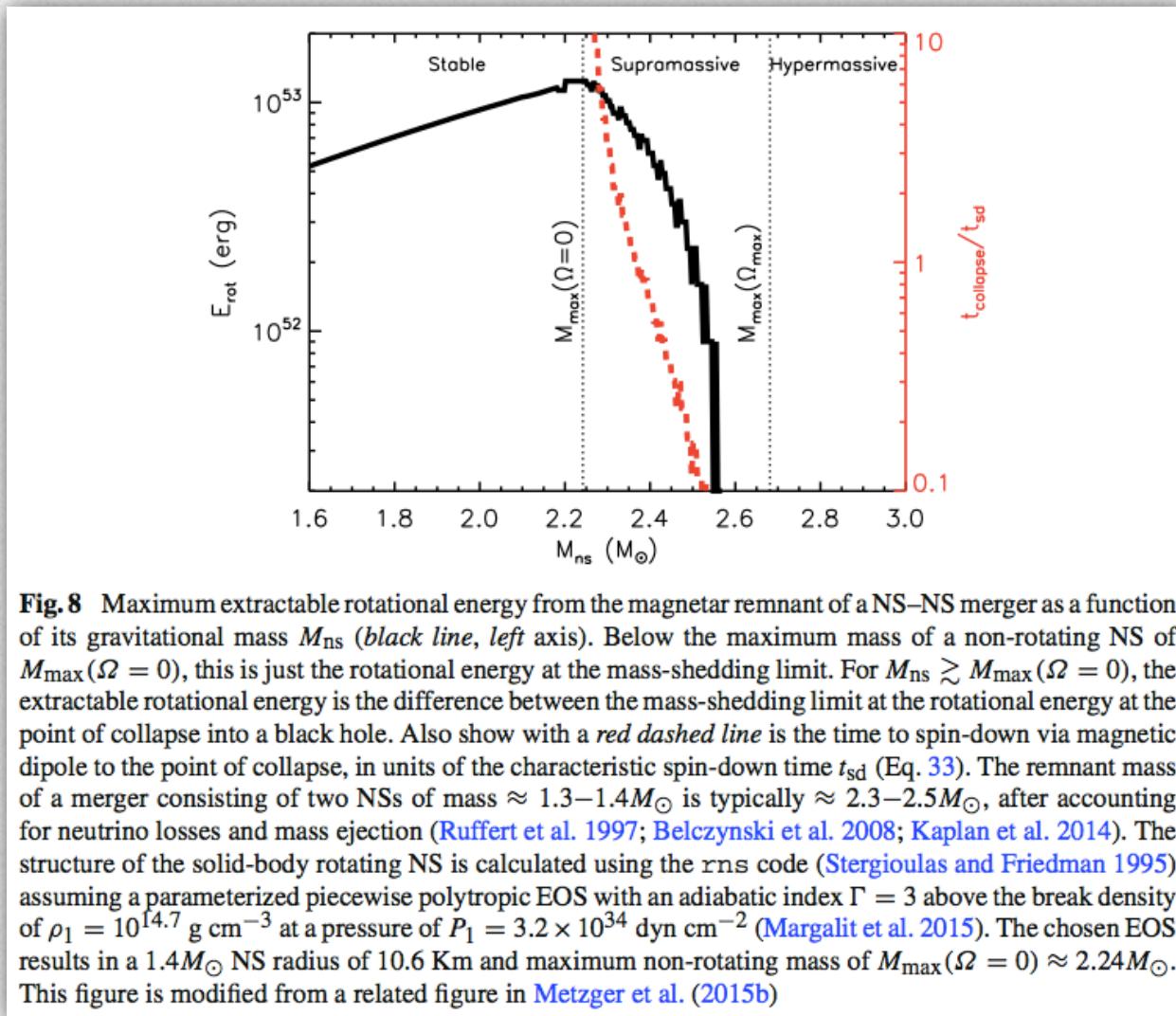
## LE NUMÉRIQUE

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

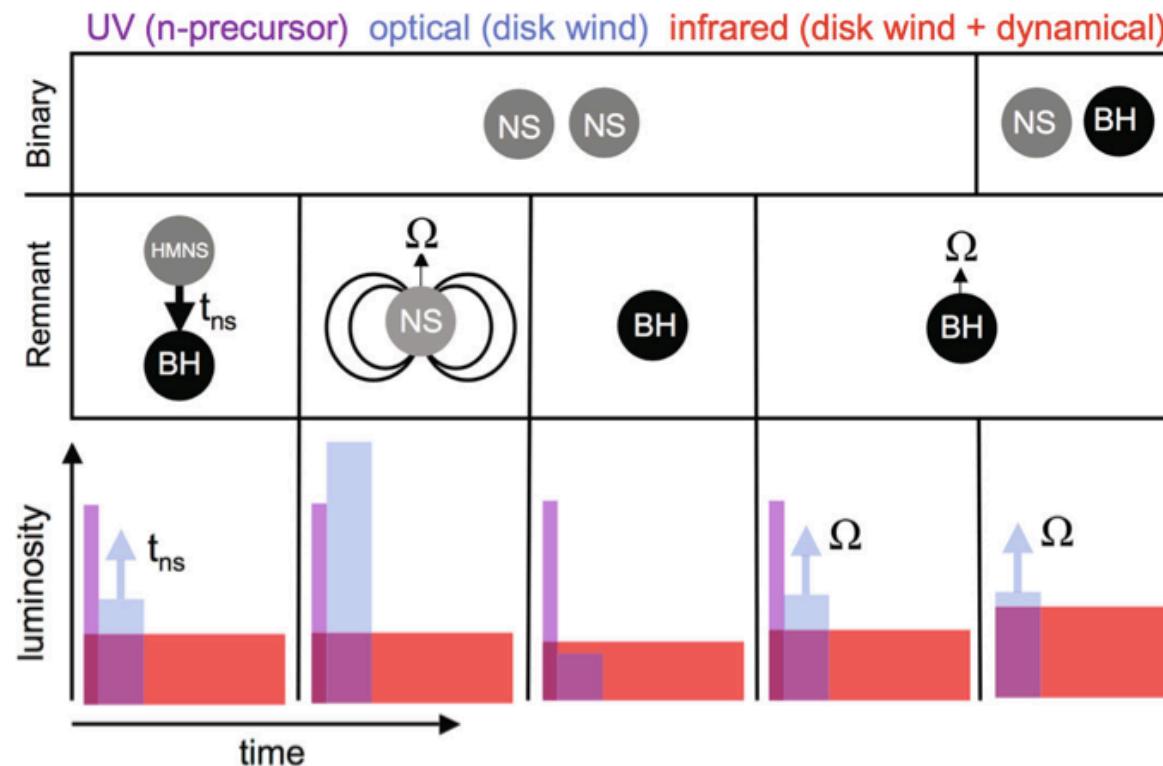


Xia, Teunissen, El Mellah et al., ApJS 2018

# Stabilité de l'étoile à neutrons reliquat

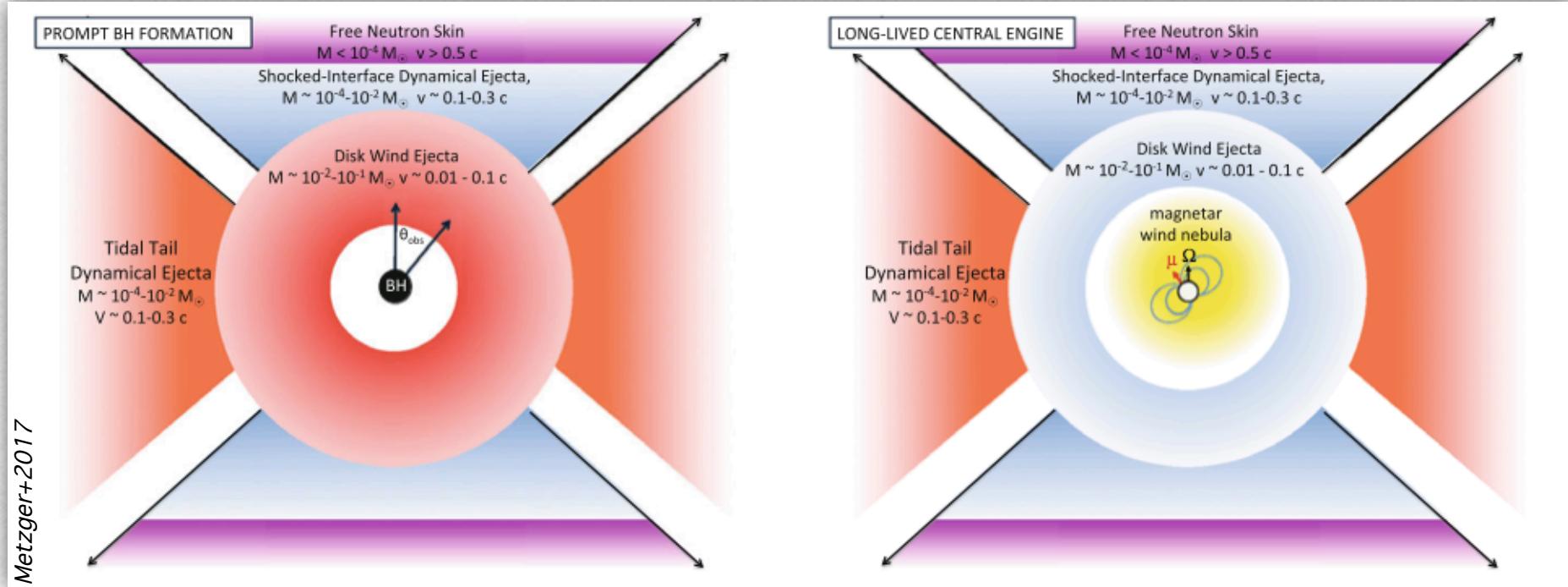


# Coalescence et émission



**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  $t_{\text{collapse}}$ , 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

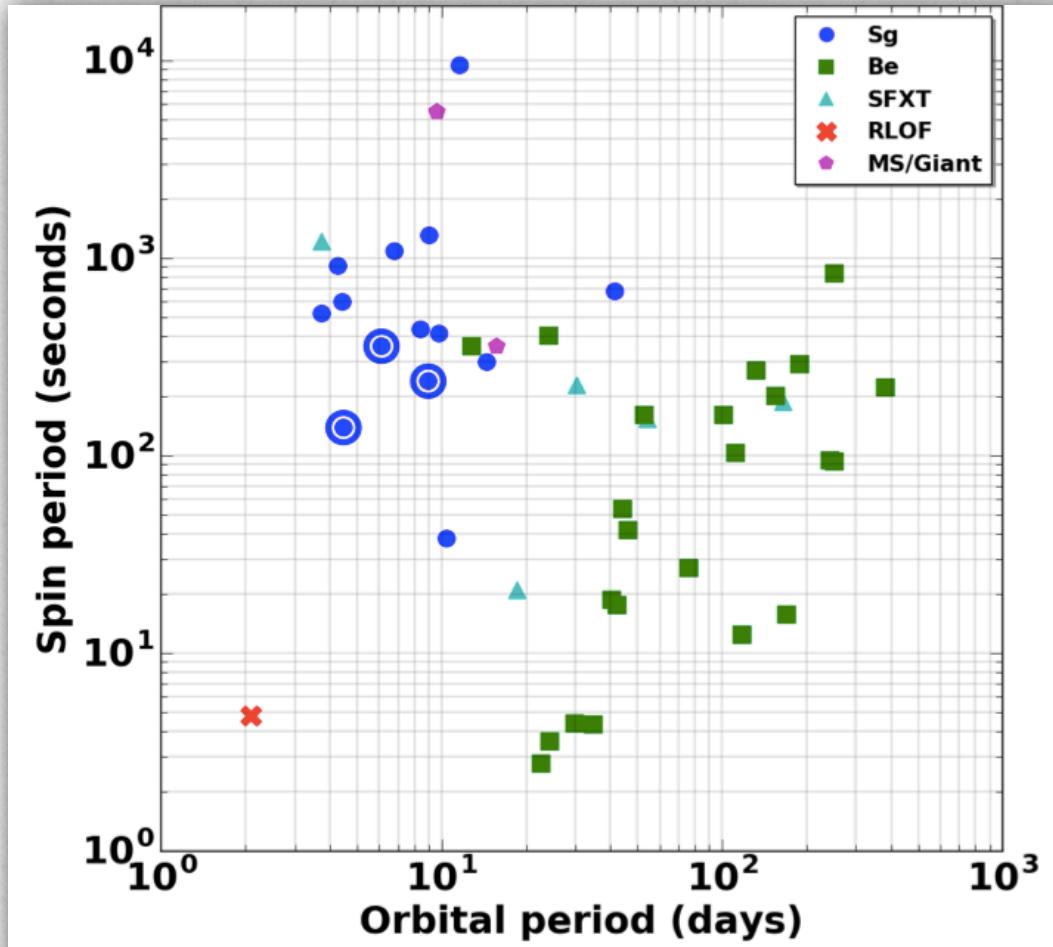
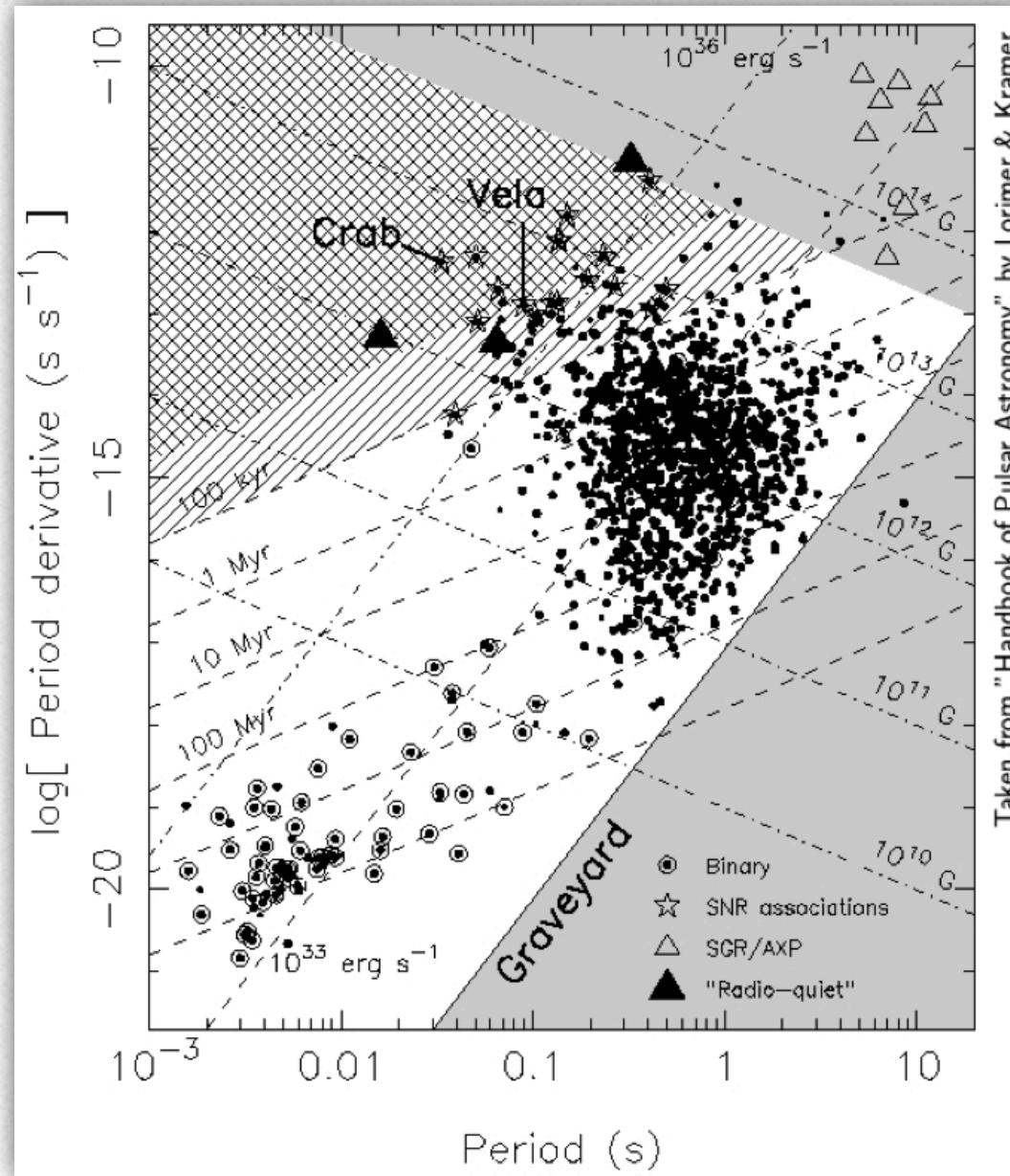


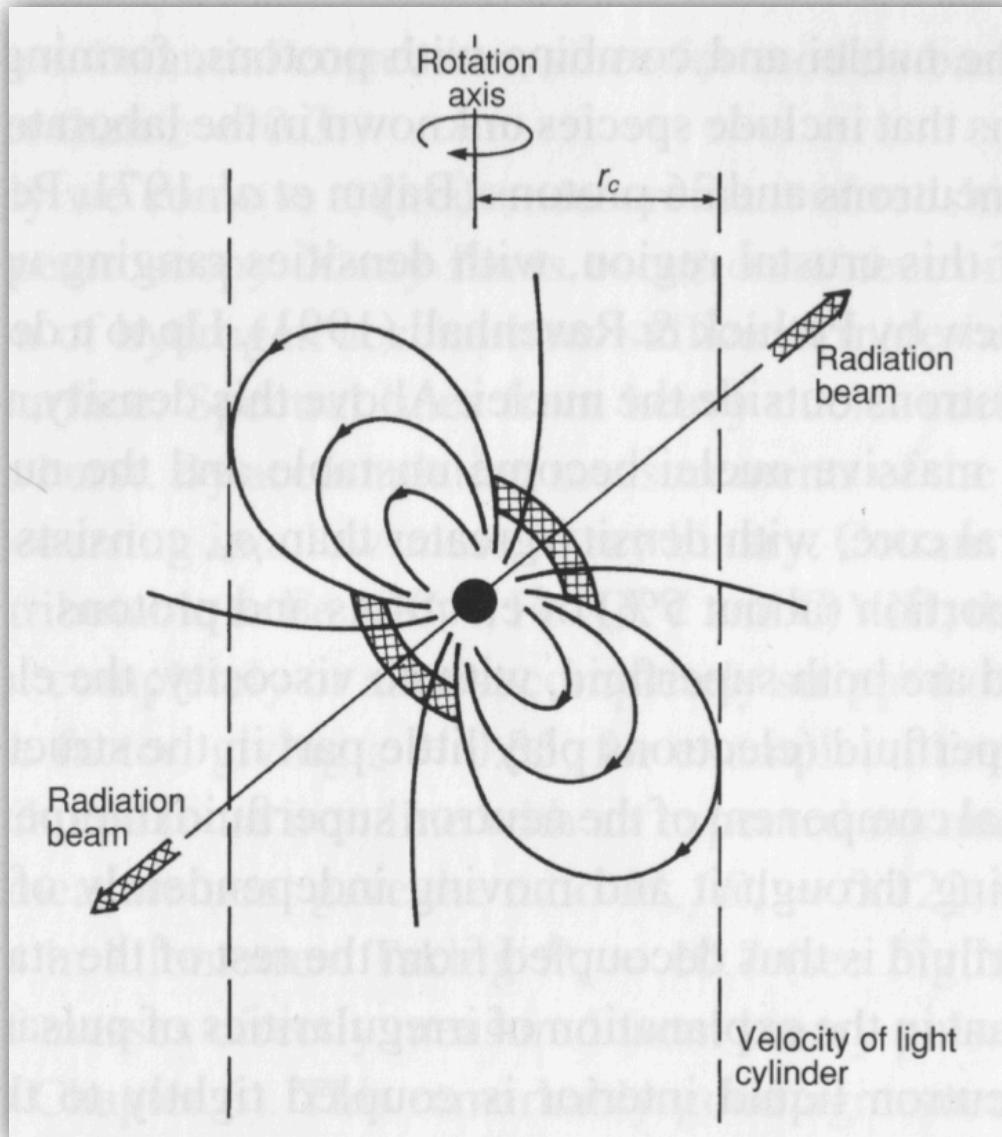
Figure 2.4: Corbet diagram of Galactic HMXB hosting a NS. The NS spin is represented as a function of the orbital period of the binary, for systems where both are measured. For BeXB (green squares), a correlation exists between the two, not in the case of SgXB (blue dots). In the bottom left part of 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 SgXB are the sources investigated in more details in Chapter 8.

# Diagramme P-Pdot

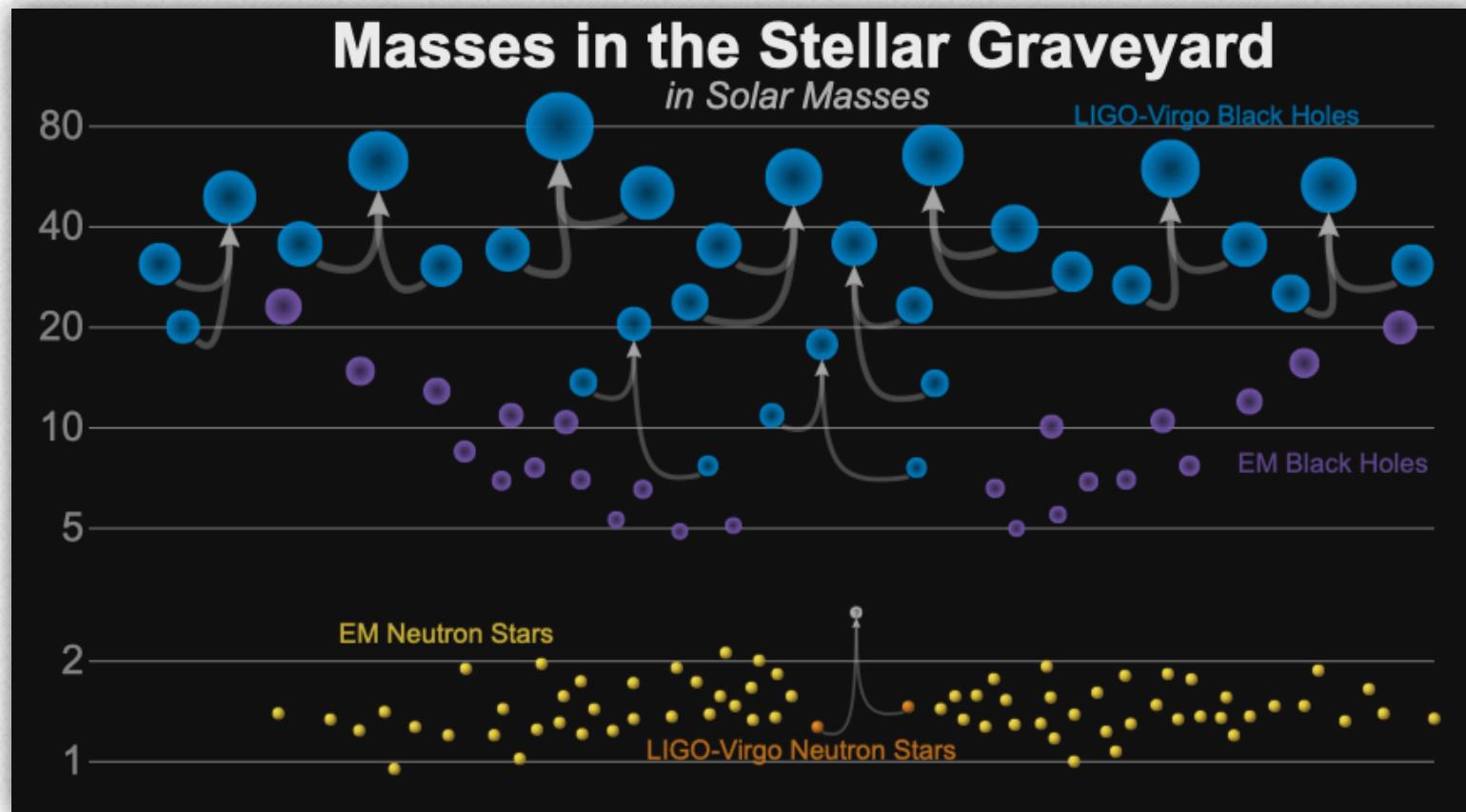


Taken from "Handbook of Pulsar Astronomy" by Lorimer & Kramer

# Emission radio des pulsars



# Contreparties électromagnétiques de la coalescence d'objets compacts



*"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

