

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]² 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

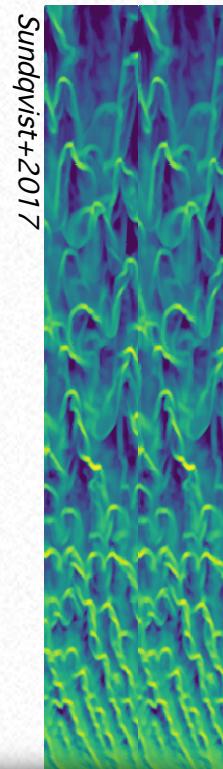
- ↳ équation d'état
- ↳ champ magnétique
- ↳ structure

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

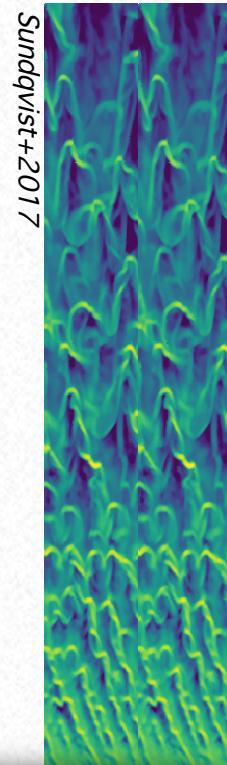
- ↳ équation d'état
- ↳ champ magnétique
- ↳ structure

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



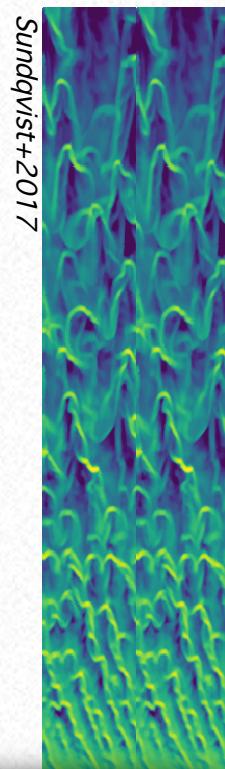
OBJETS COMPACTS

- 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

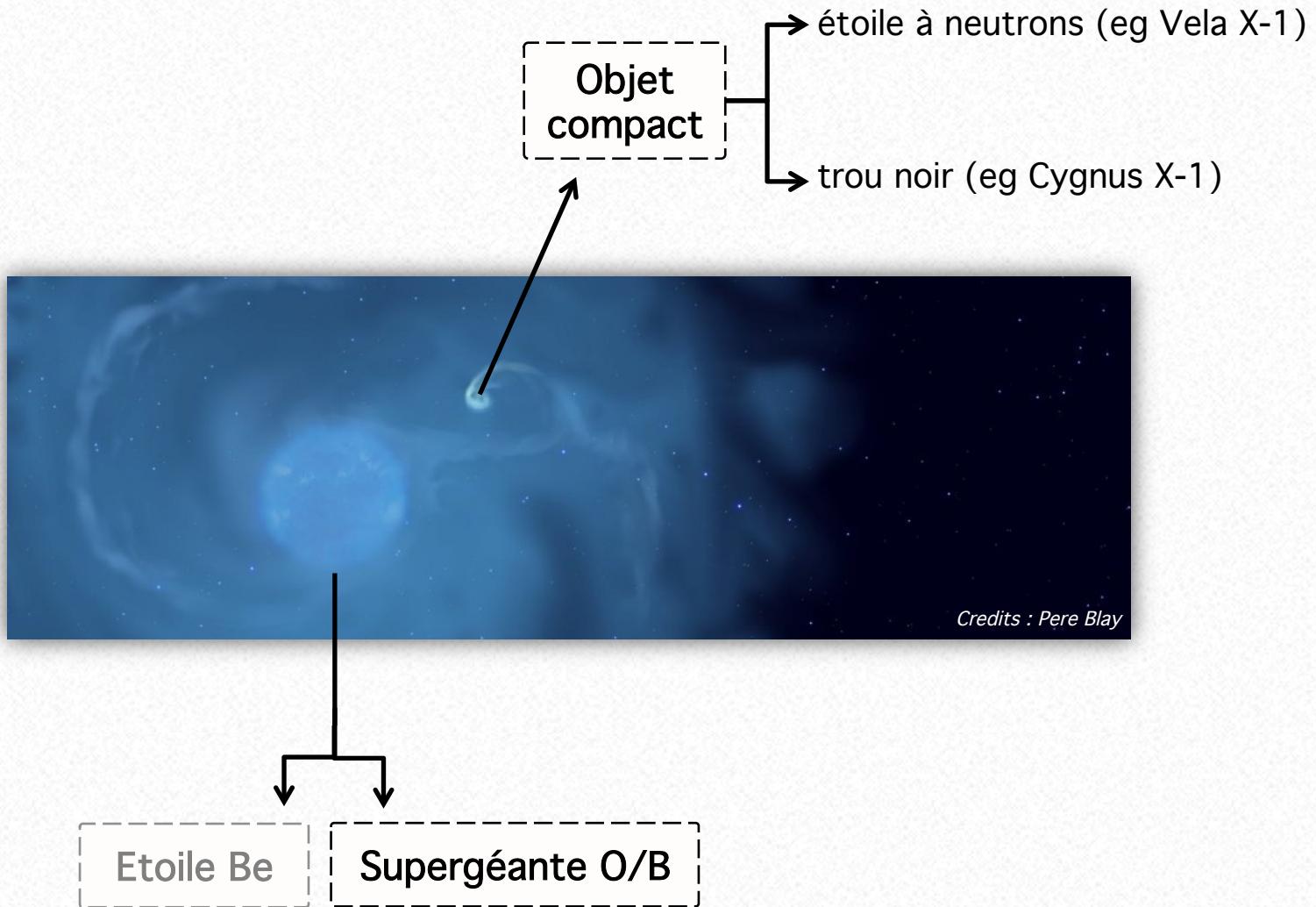
Étoile massive

Binaires X de forte masse – Portrait

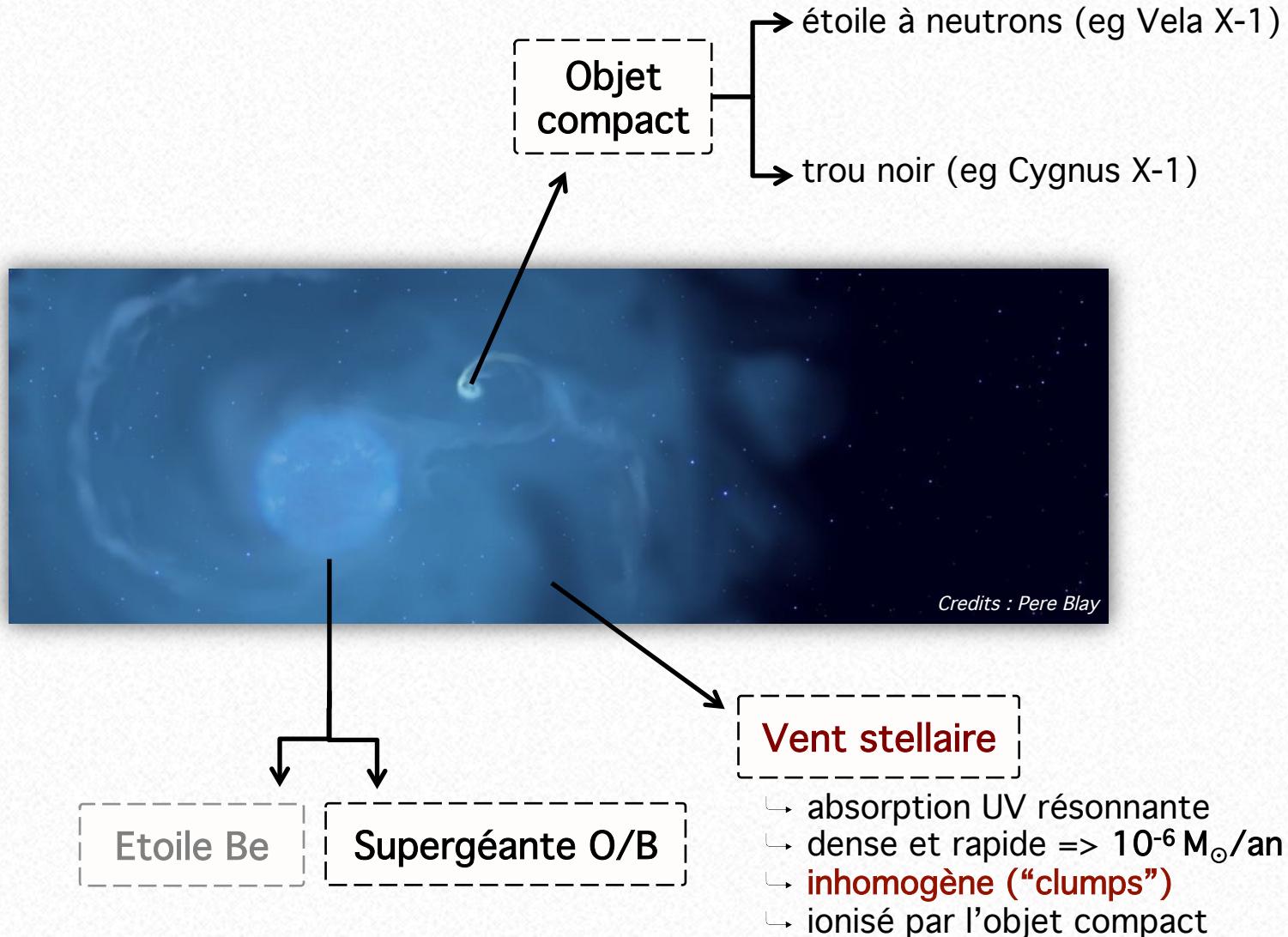


Credits : Pere Blay

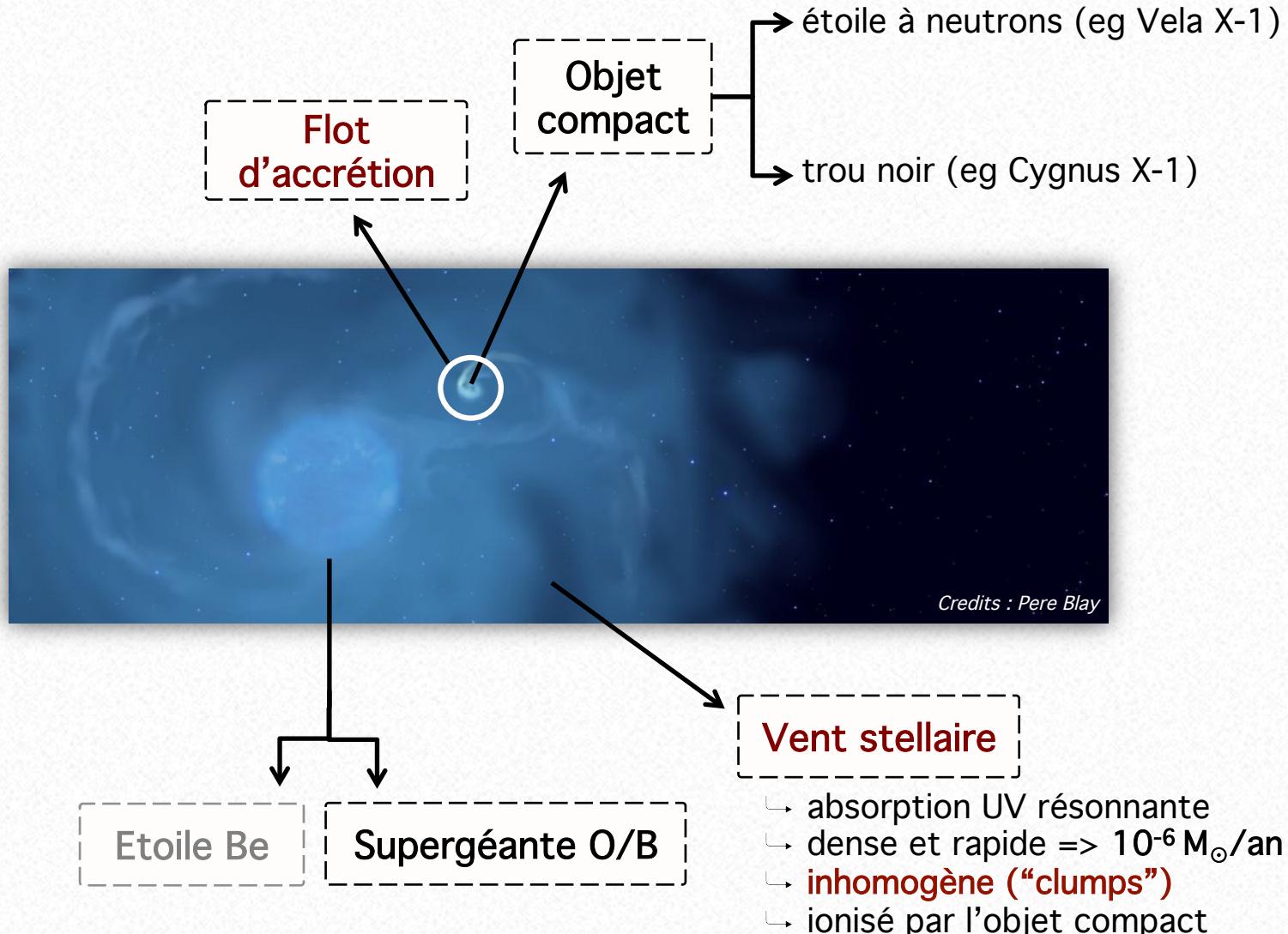
Binaires X de forte masse – Portrait



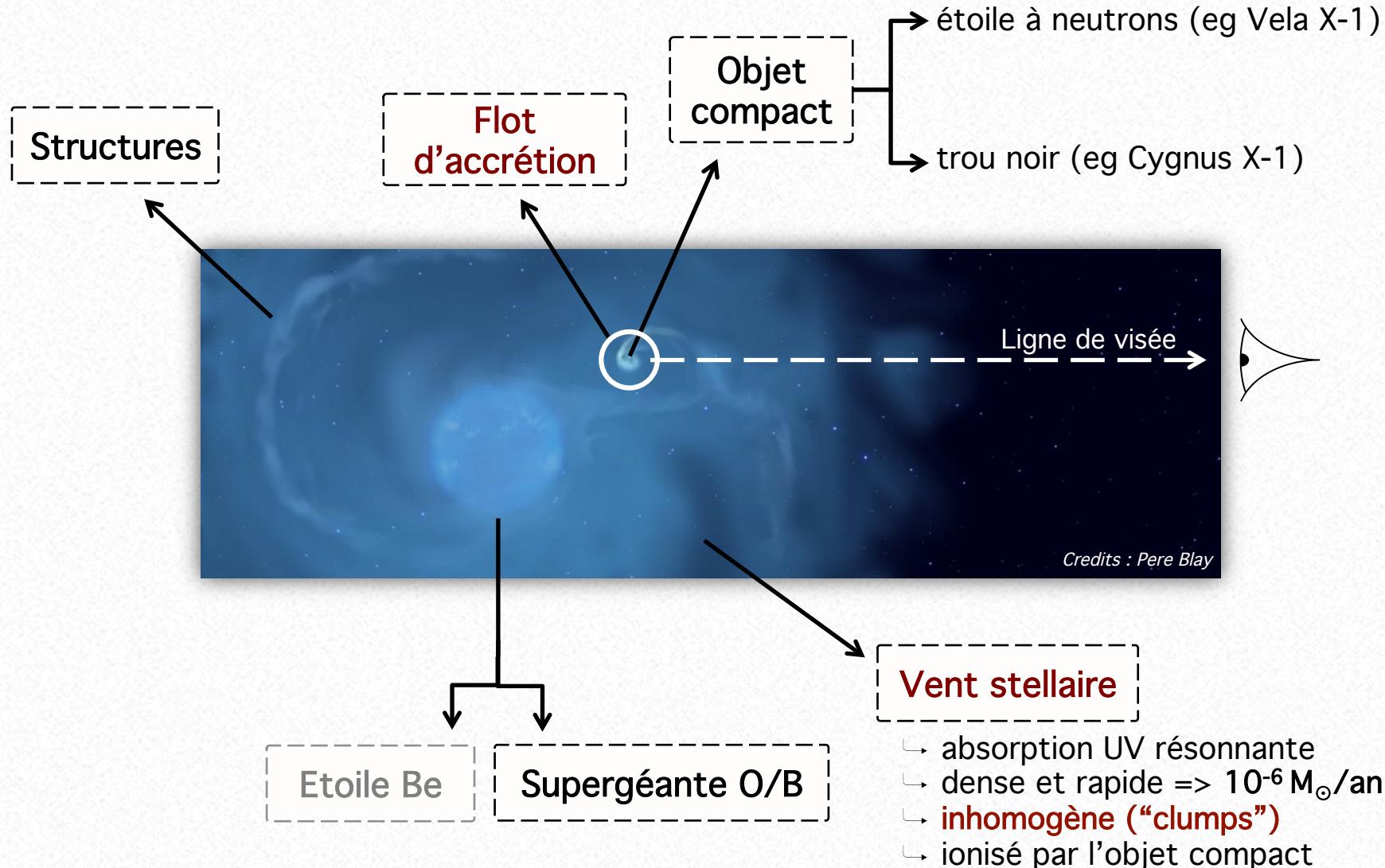
Binaires X de forte masse – Portrait



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

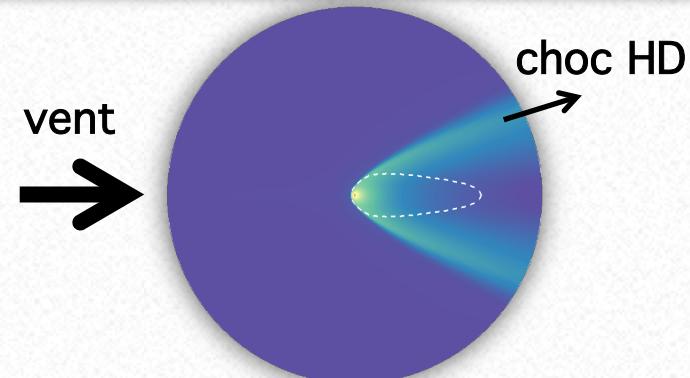


Binaires X de forte masse – Le vent stellaire

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

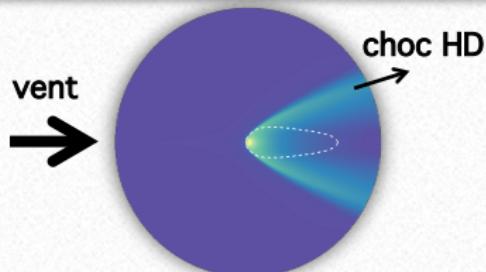


Binaires X de forte masse – Le vent stellaire

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

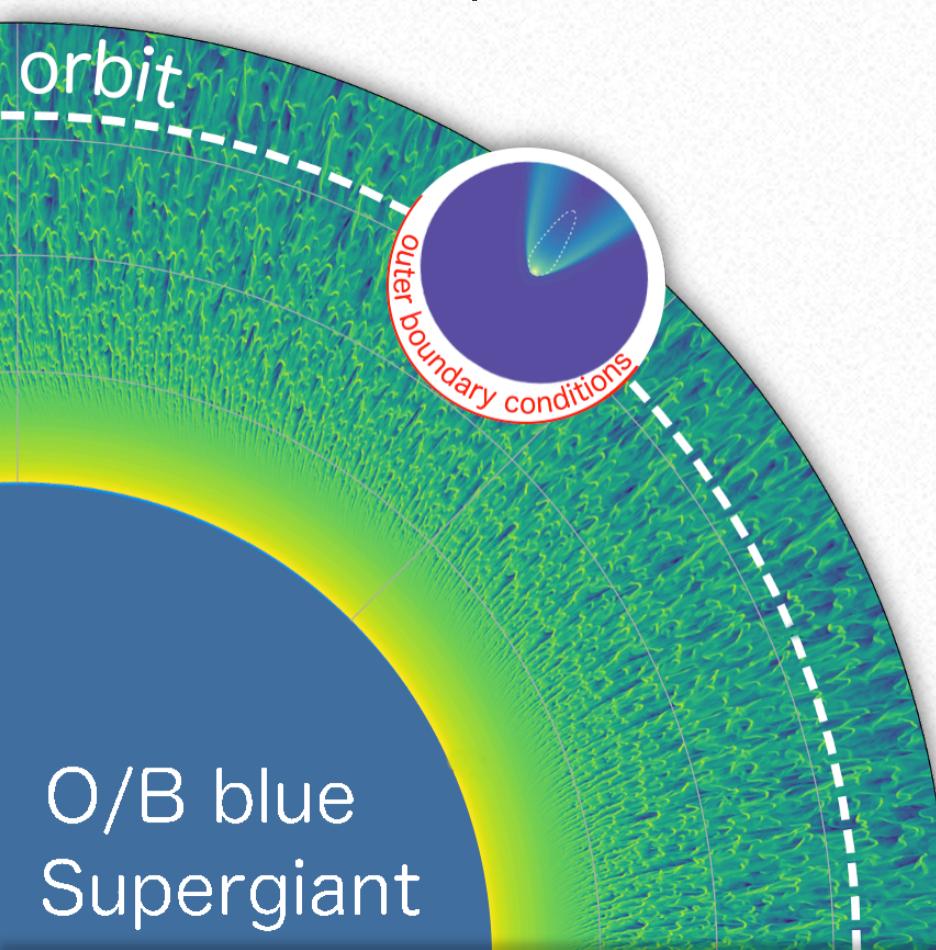


Binaires X de forte masse – Le vent stellaire

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

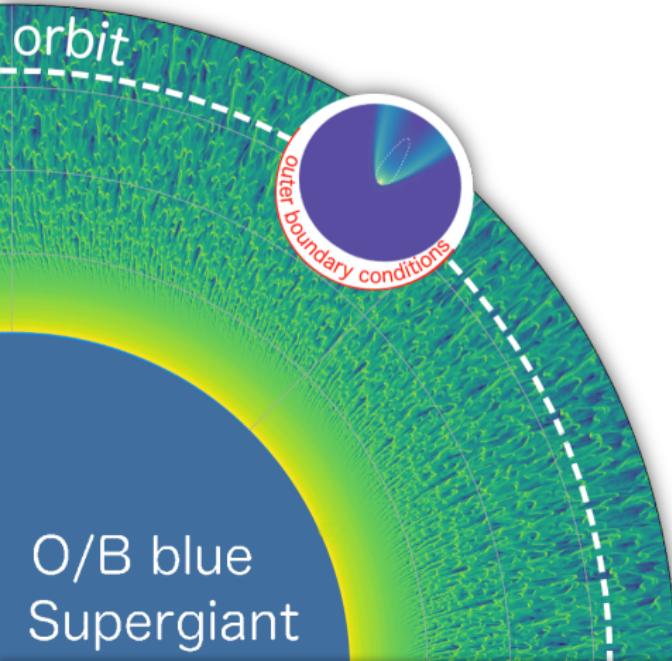


Binaires X de forte masse – Le vent stellaire

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

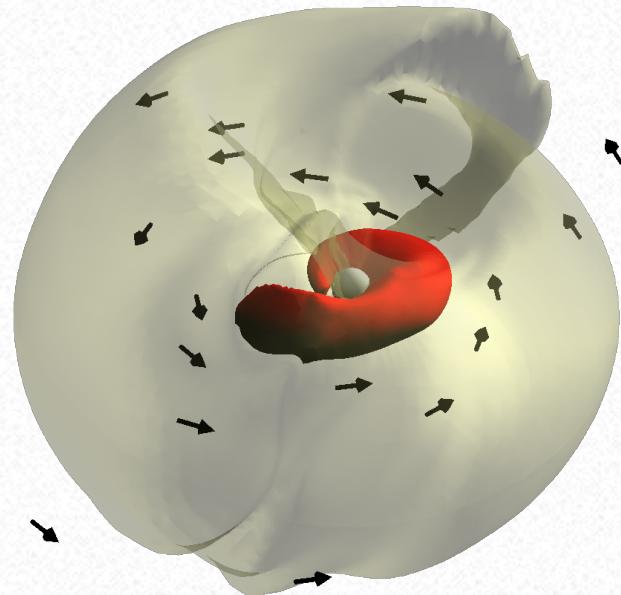
Binaires X de forte masse – Le flot d'accrétion

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



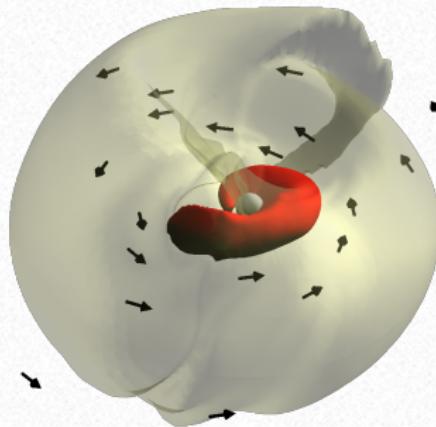
Binaires X de forte masse – Le flot d'accrétion

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

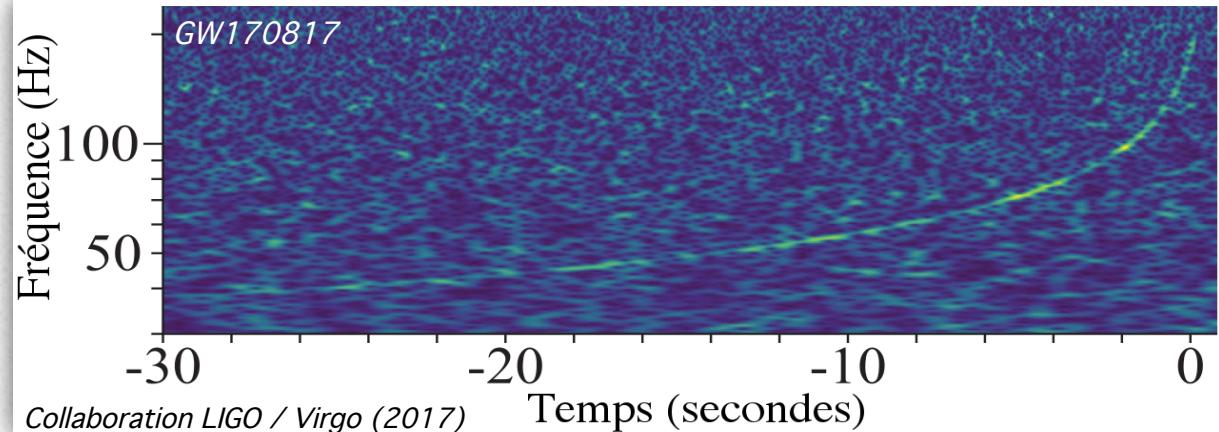


Contreparties électromagnétiques de la coalescence d'objets compacts

ONDES GRAVITATIONNELLES

↳ coalescence
d'étoiles à neutrons

Nature du reliquat?

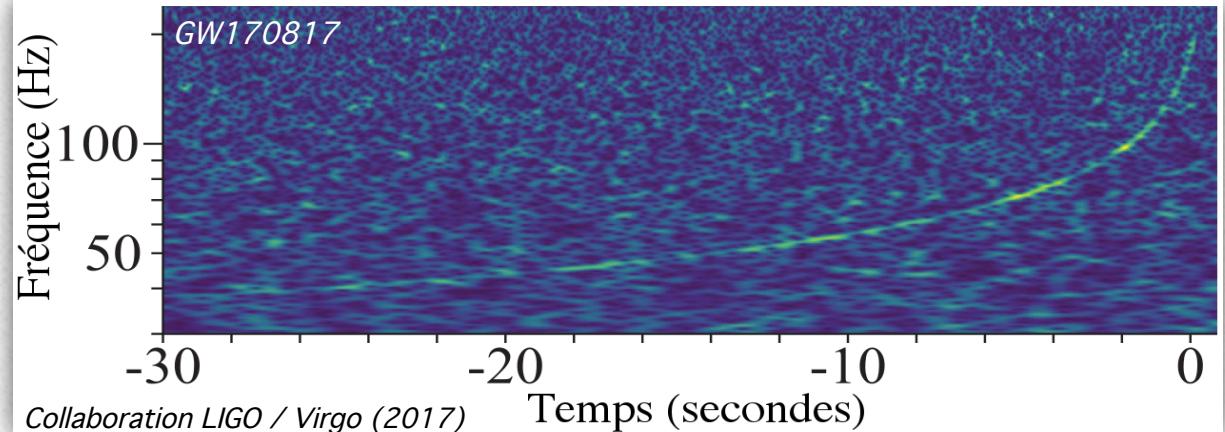


Contreparties électromagnétiques de la coalescence d'objets compacts

ONDES GRAVITATIONNELLES

- ↳ coalescence d'étoiles à neutrons

Nature du reliquat?



SURSAUT GAMMA COURT

Emission transitoire (<2s)

Mécanisme

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

↳ *R. Mochkovitch*
↳ *F. Daigne*



KILONOVA

Pic après ~ 1 semaine
Optique \rightarrow proche infra-rouge

Sources de chauffage

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

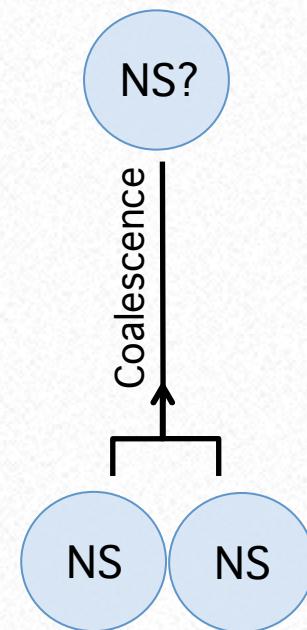
RÉMANENCE

Emission synchrotron
Rayons X \rightarrow radio

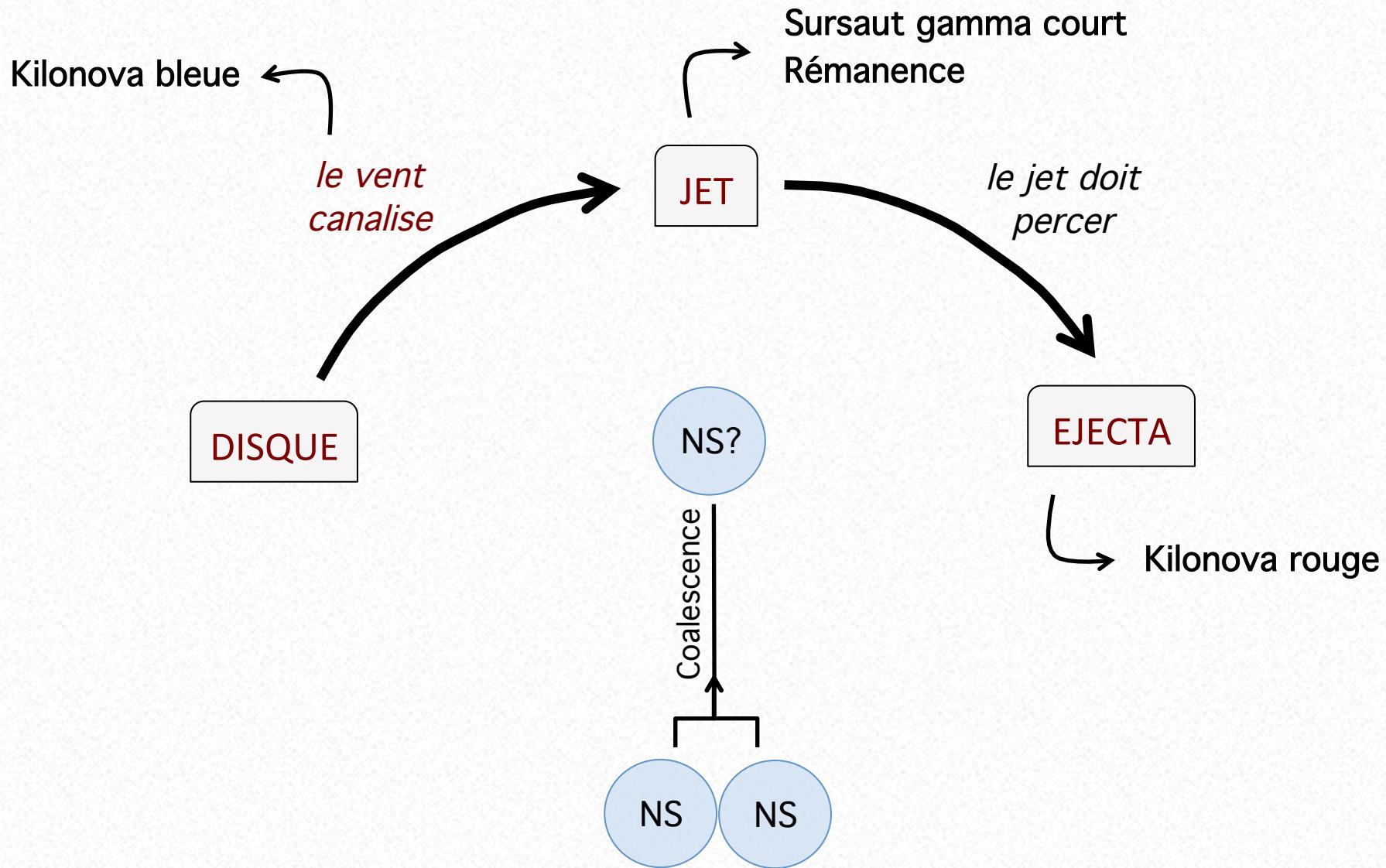
Choc externe



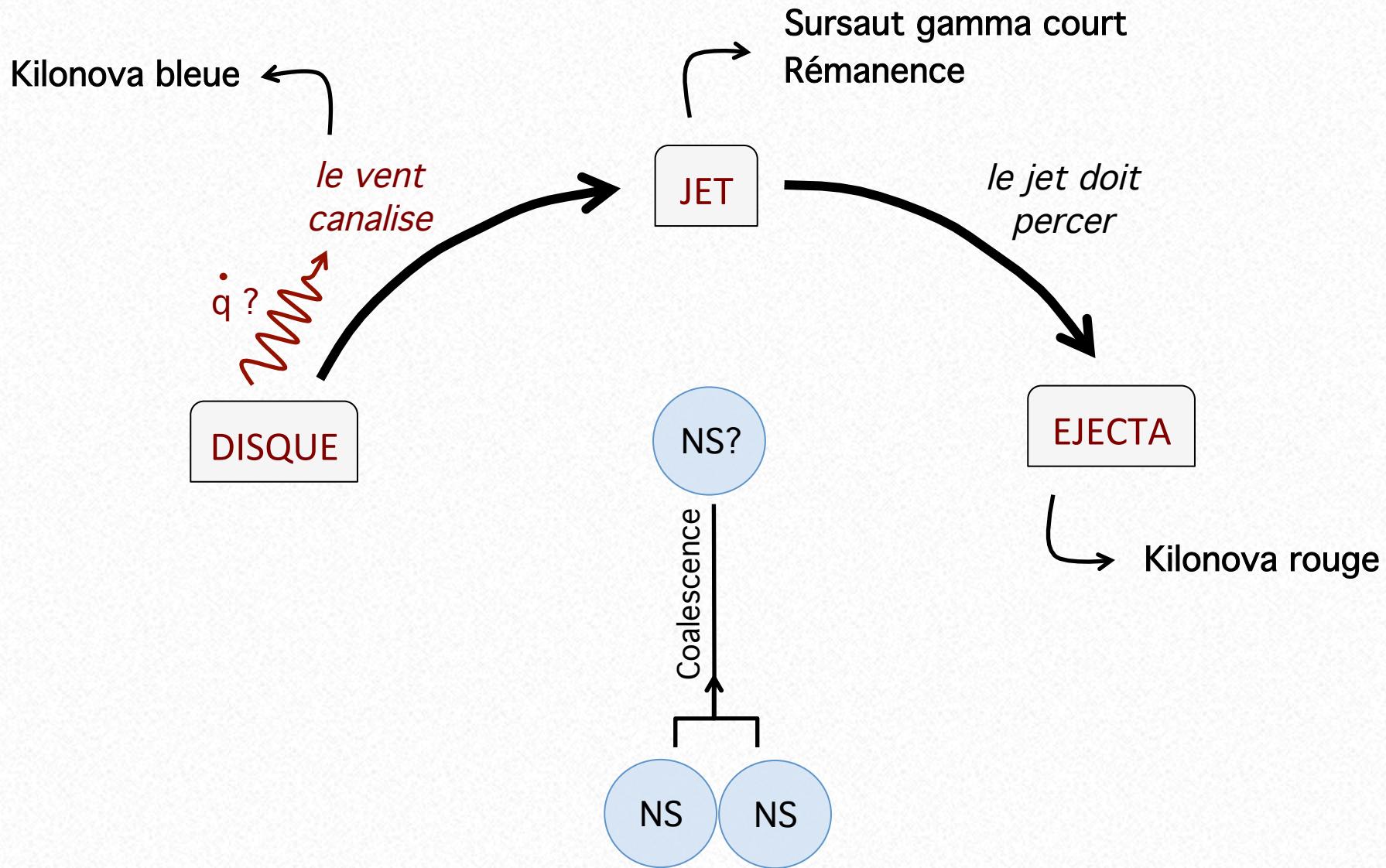
Synthèse du projet de recherche



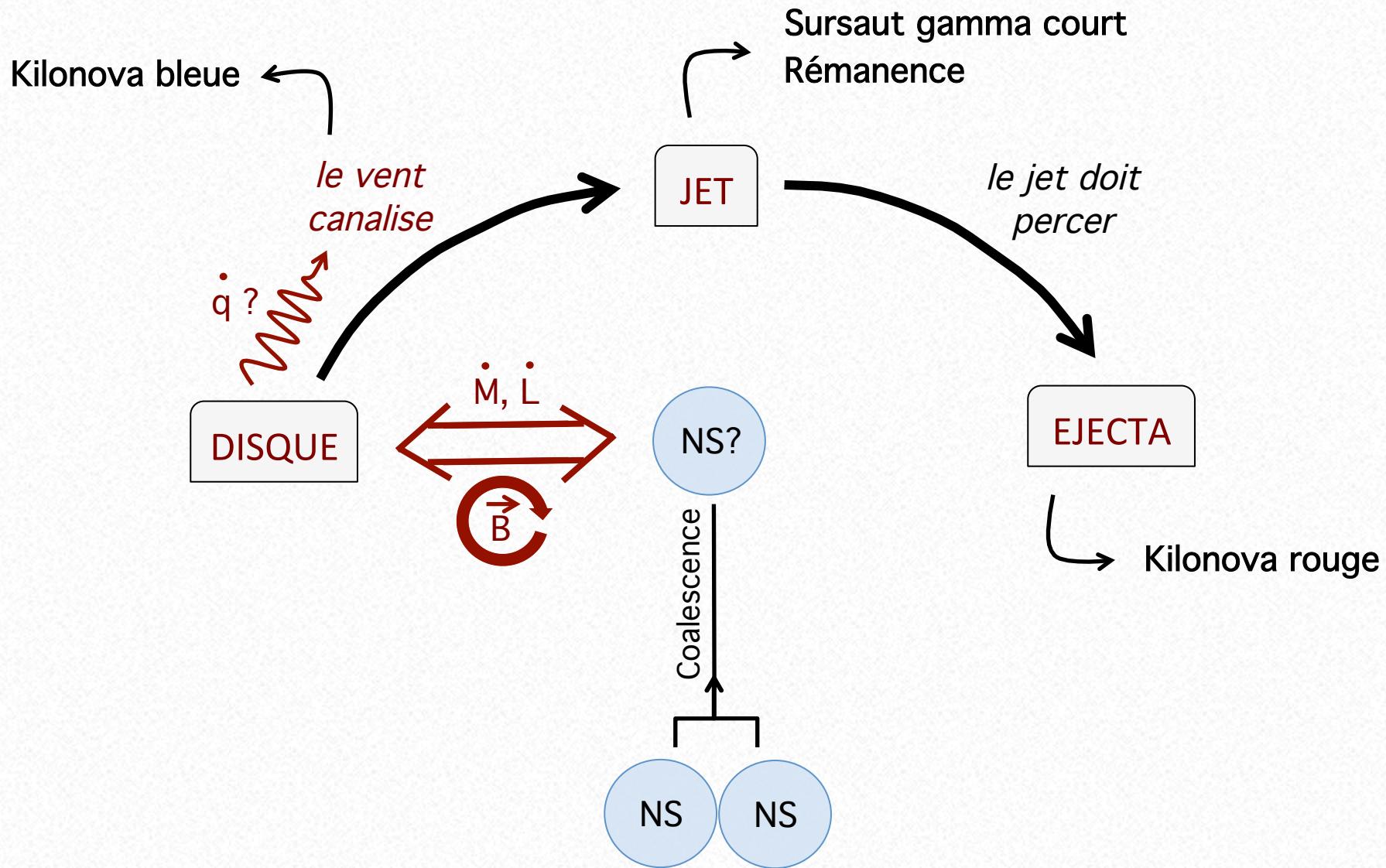
Synthèse du projet de recherche



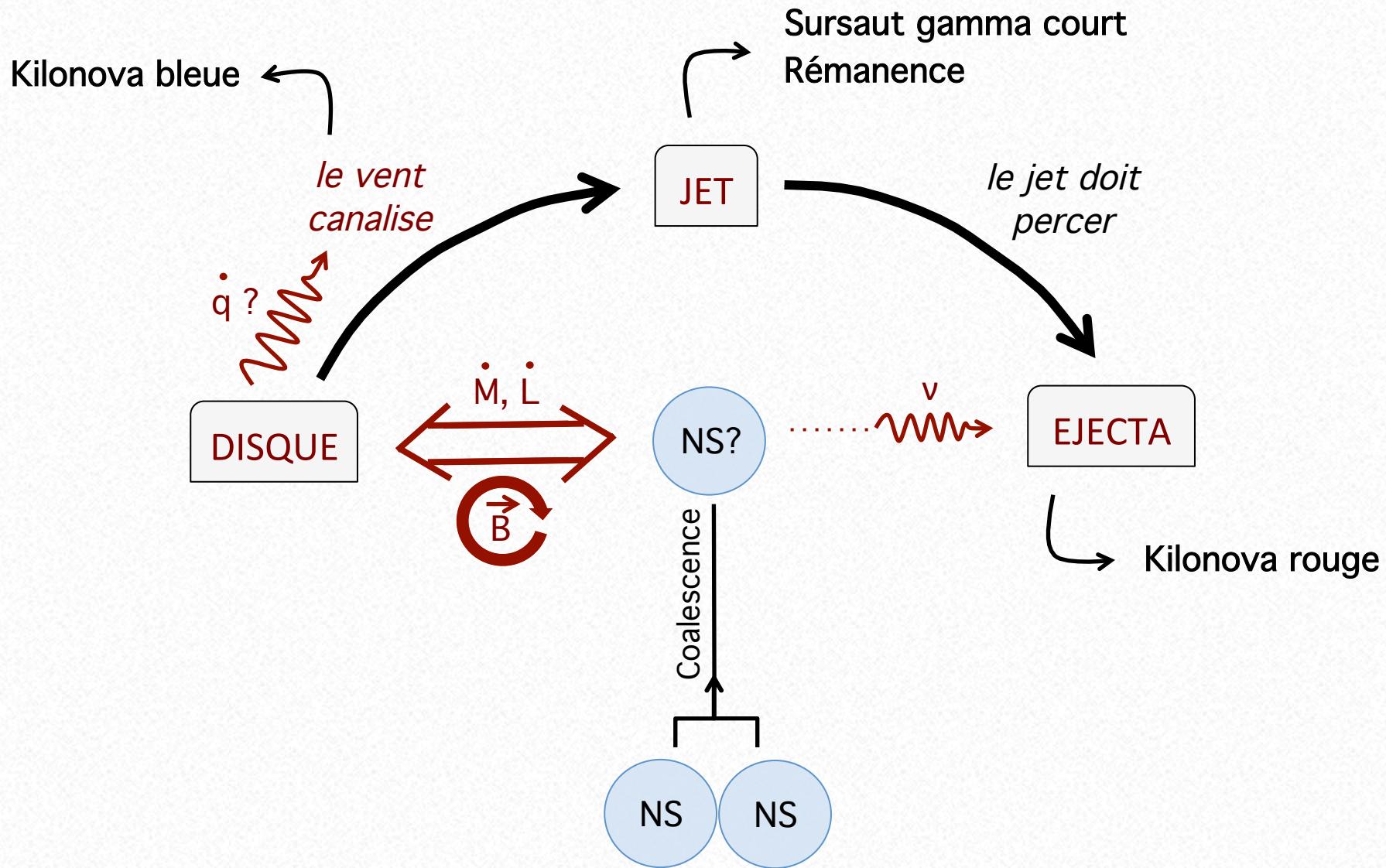
Synthèse du projet de recherche



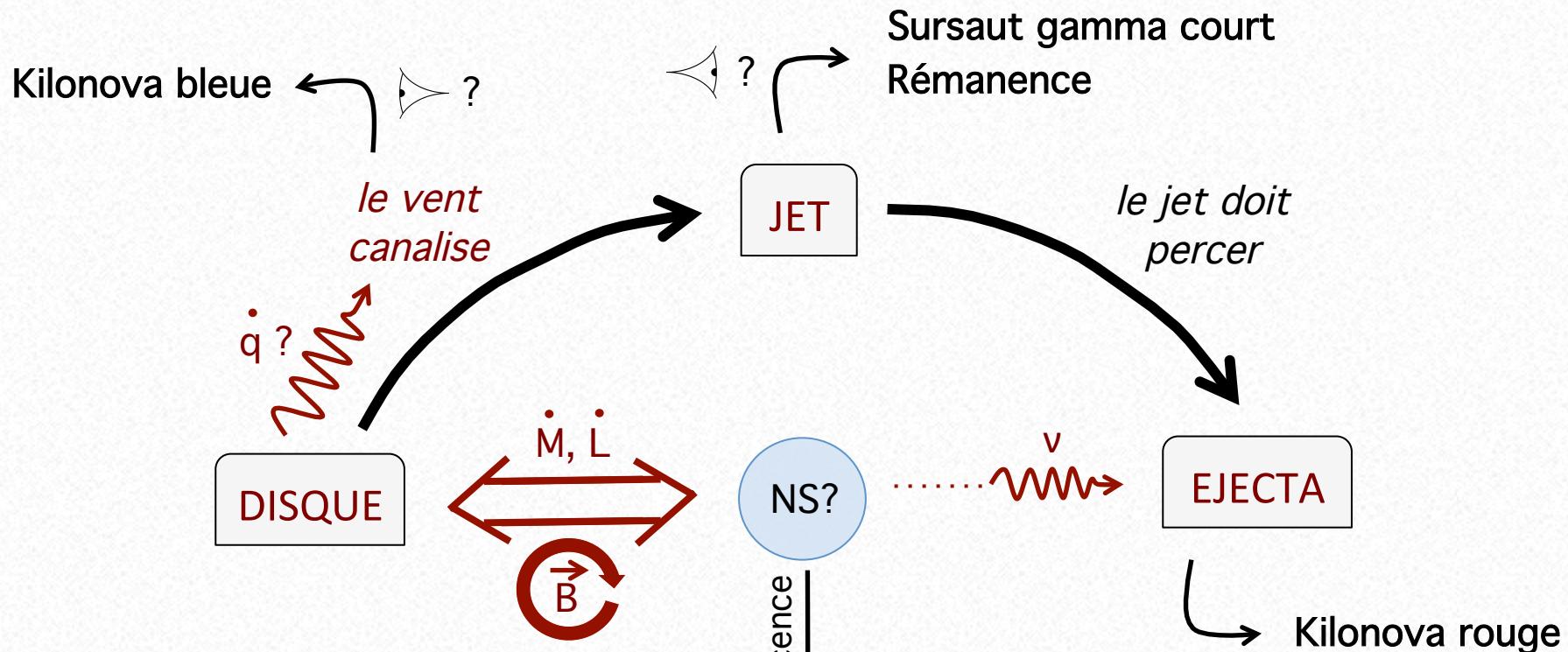
Synthèse du projet de recherche



Synthèse du projet de recherche

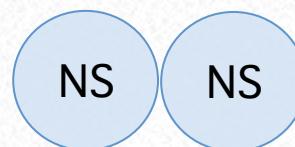


Synthèse du projet de recherche

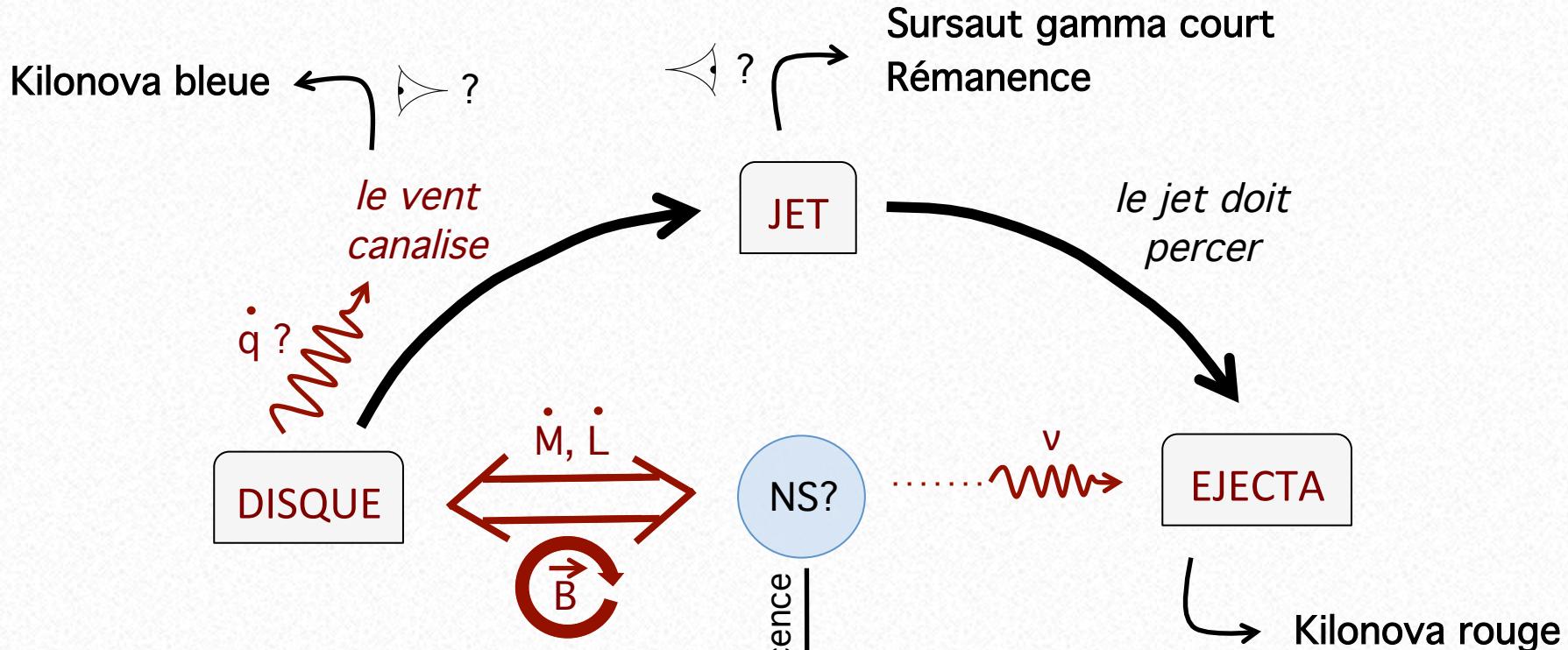


Nécessité de l'outil numérique

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

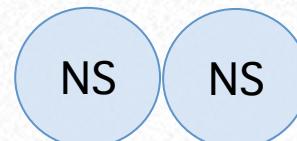


Synthèse du projet de recherche



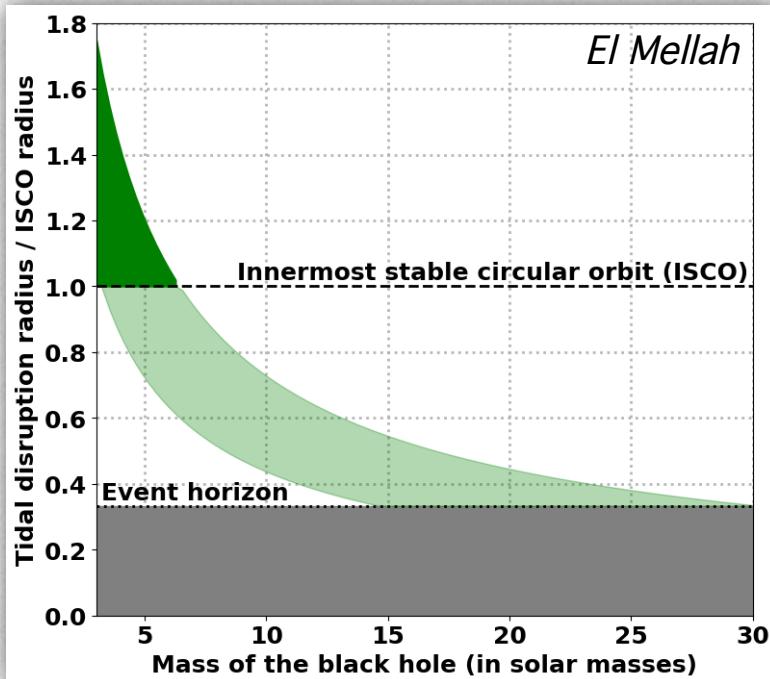
Nécessité de l'outil numérique

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



Complémentarité avec le GReCO

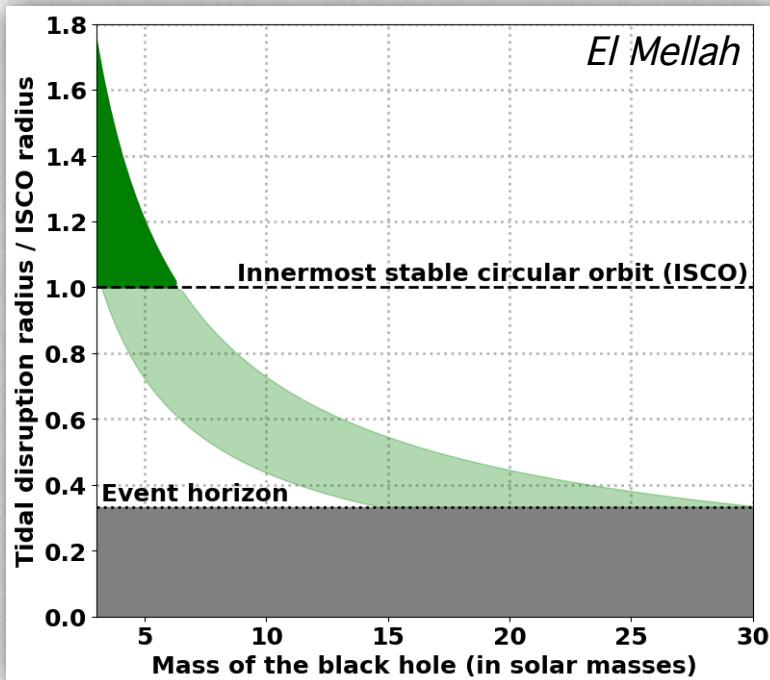
- ↳ nature du reliquat



DISQUE D'ACCRÉTION

Masse & propriétés?

Conditions de formation du disque?



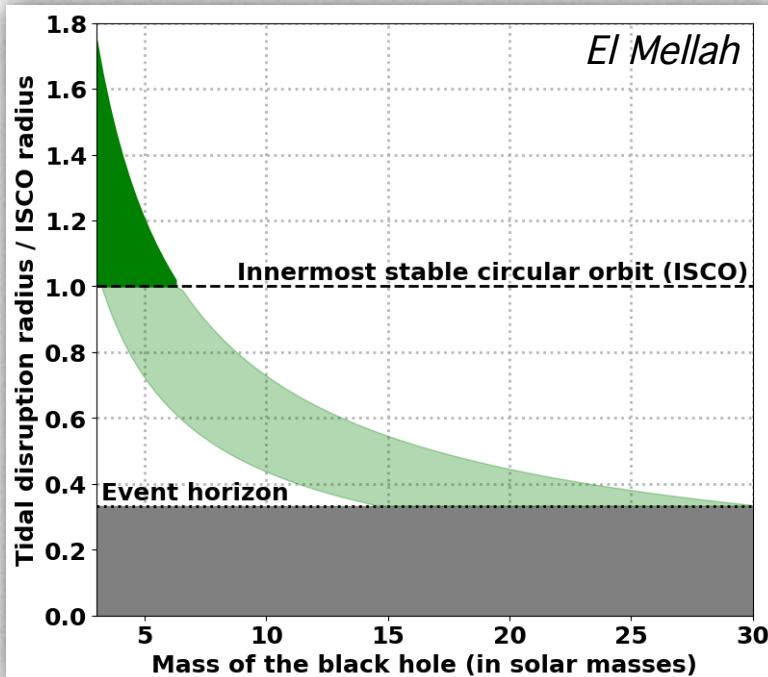
DISQUE D'ACCRÉTION

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?

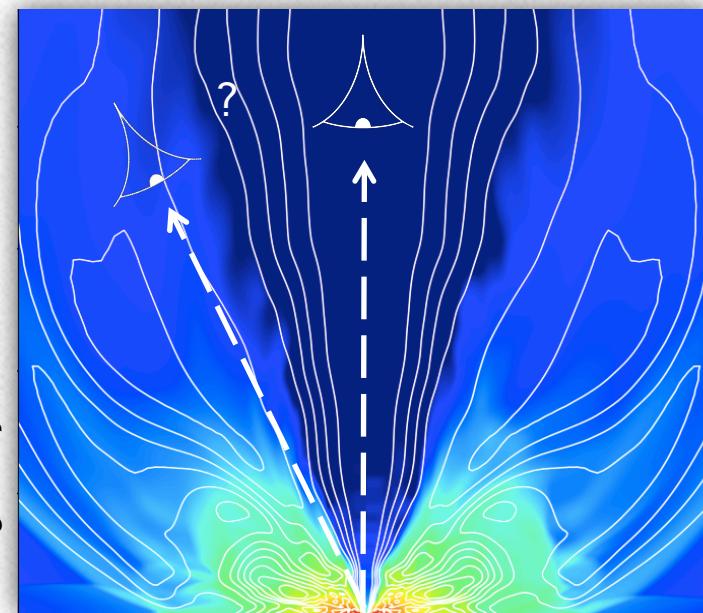
JET RELATIVISTE

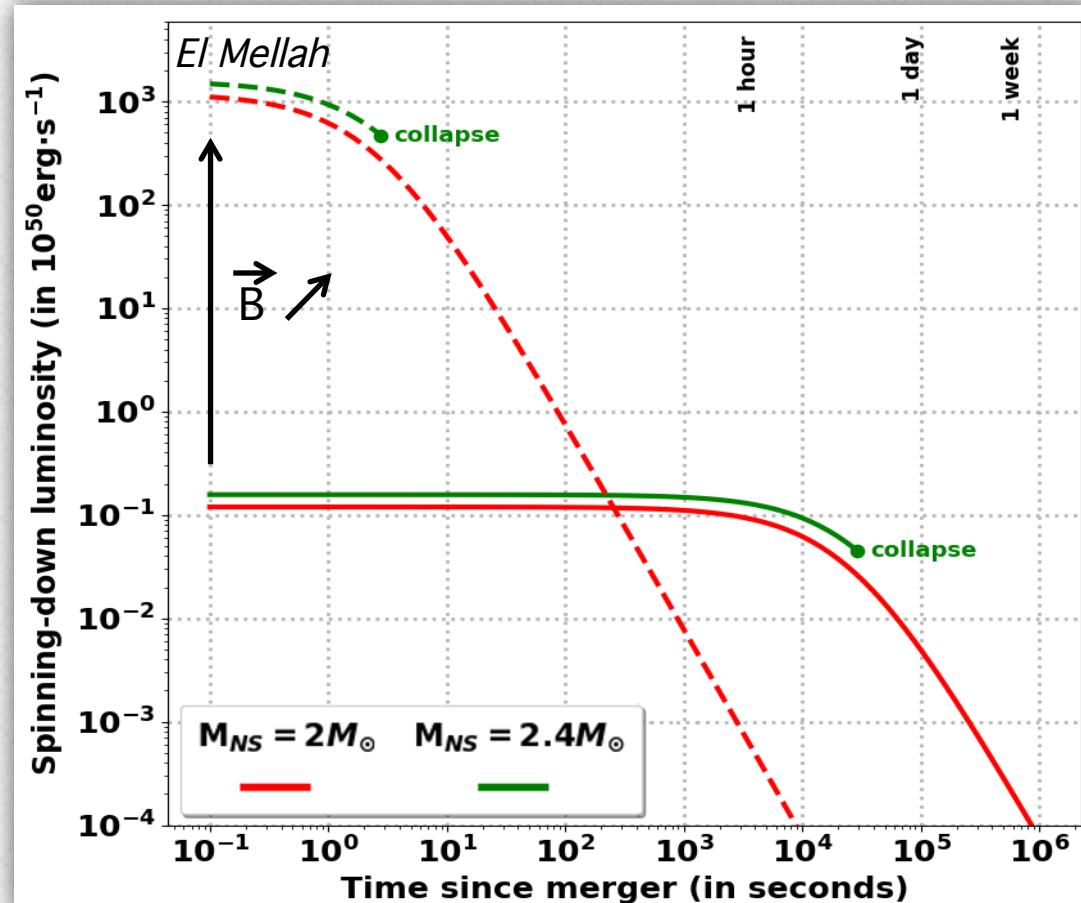
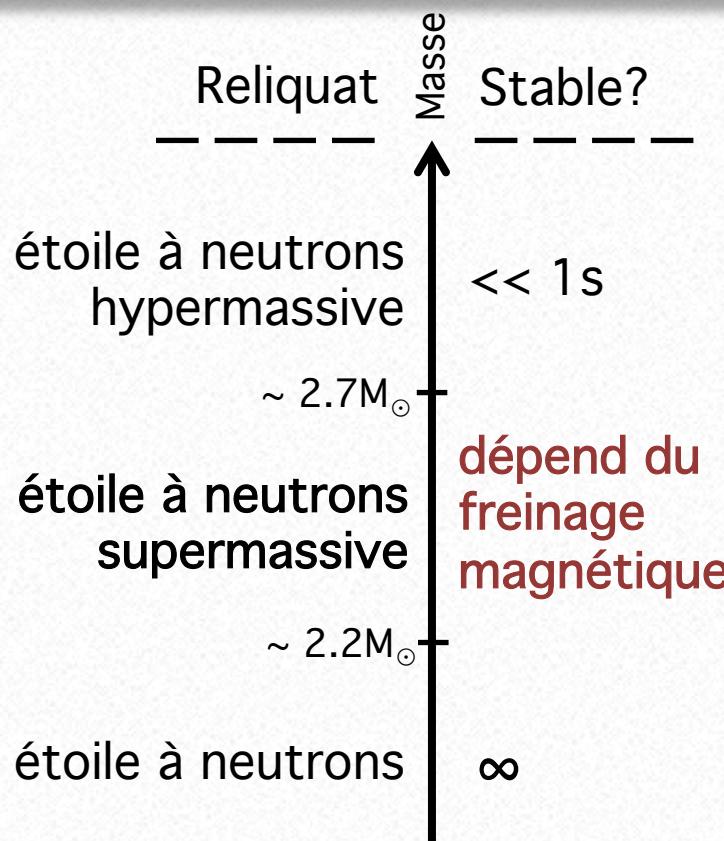
Chocs internes

- ↳ *F. Daigne & R. Mochkovitch*

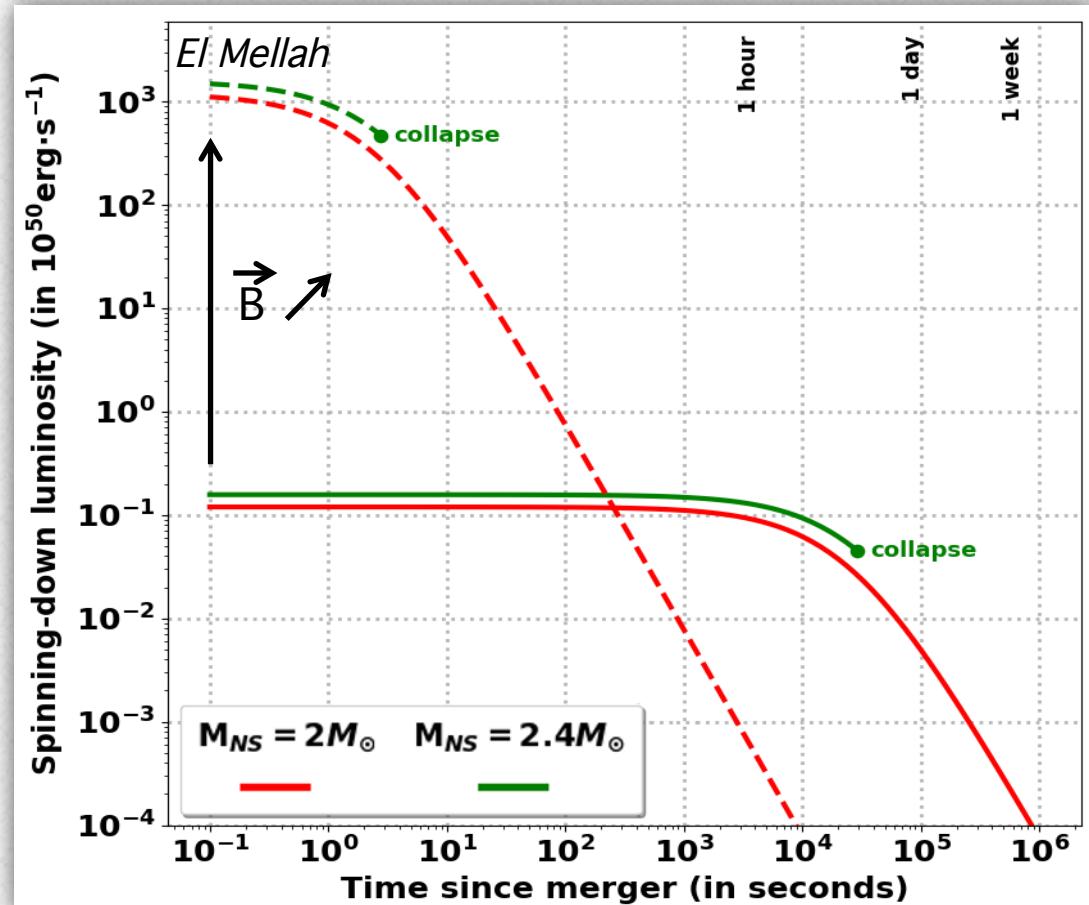
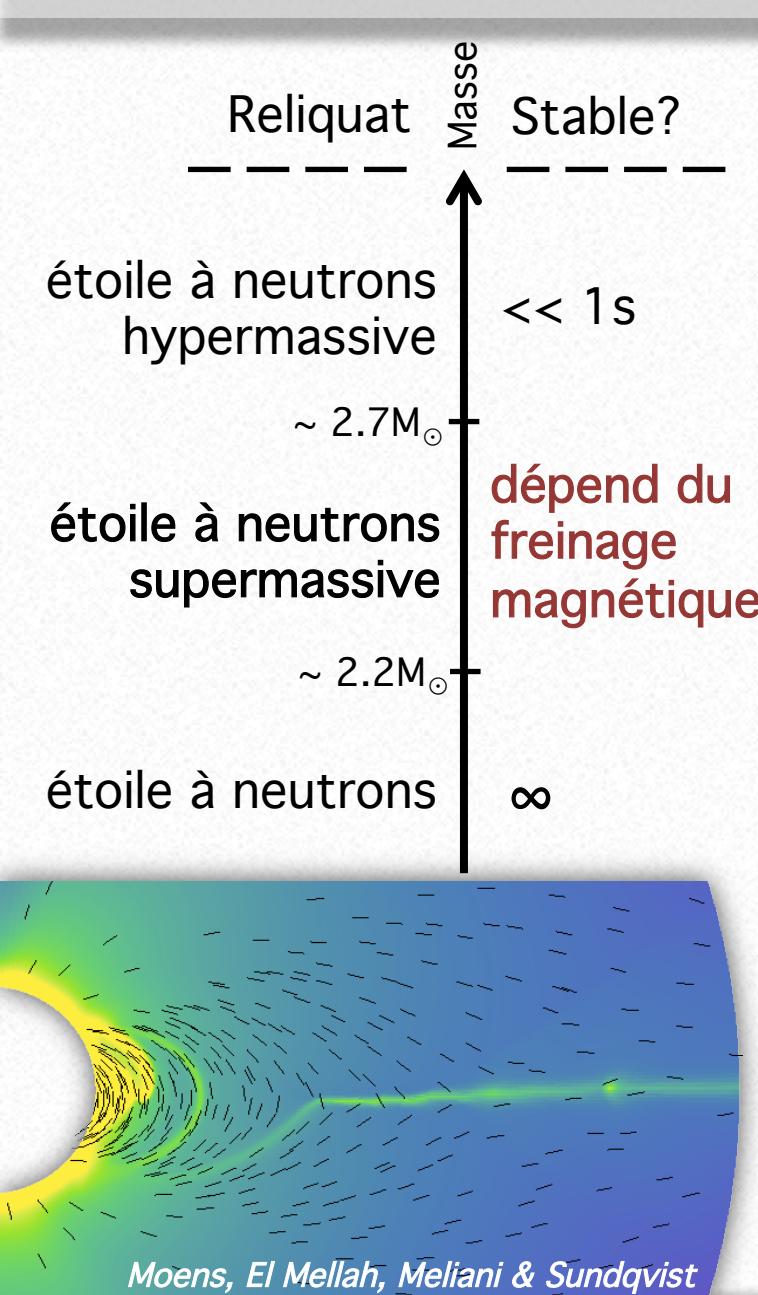


Kathirgamaraju+18





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

IAP

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^{ème}
- ↳ 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

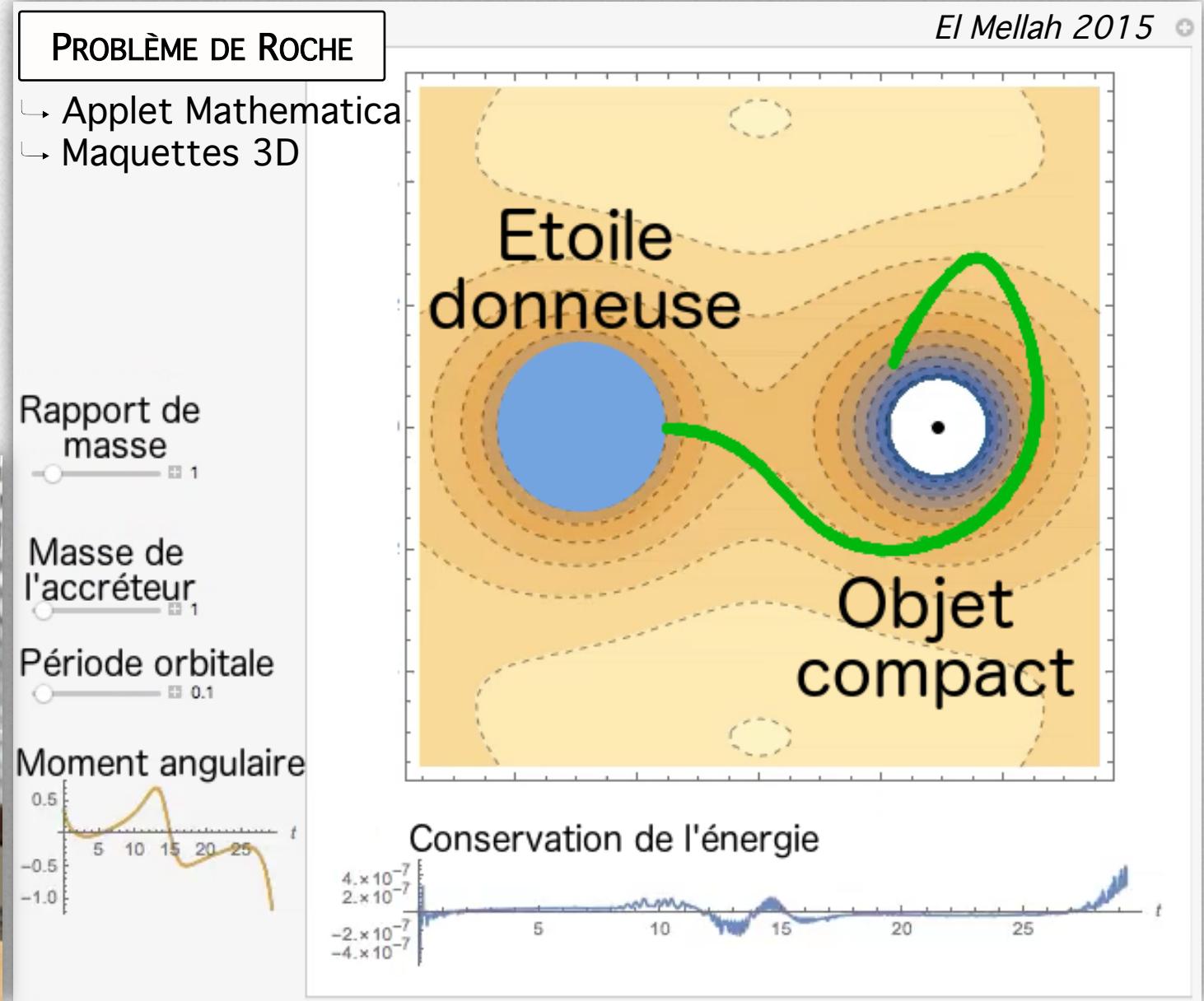
KU LEUVEN

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

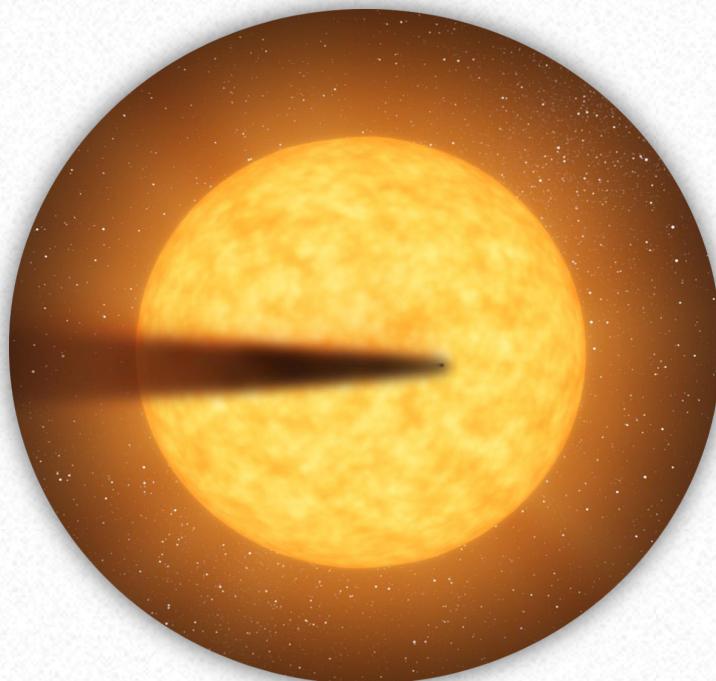
Agrégation & qualification, ~300h de cours depuis 6 ans

- ↳ 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

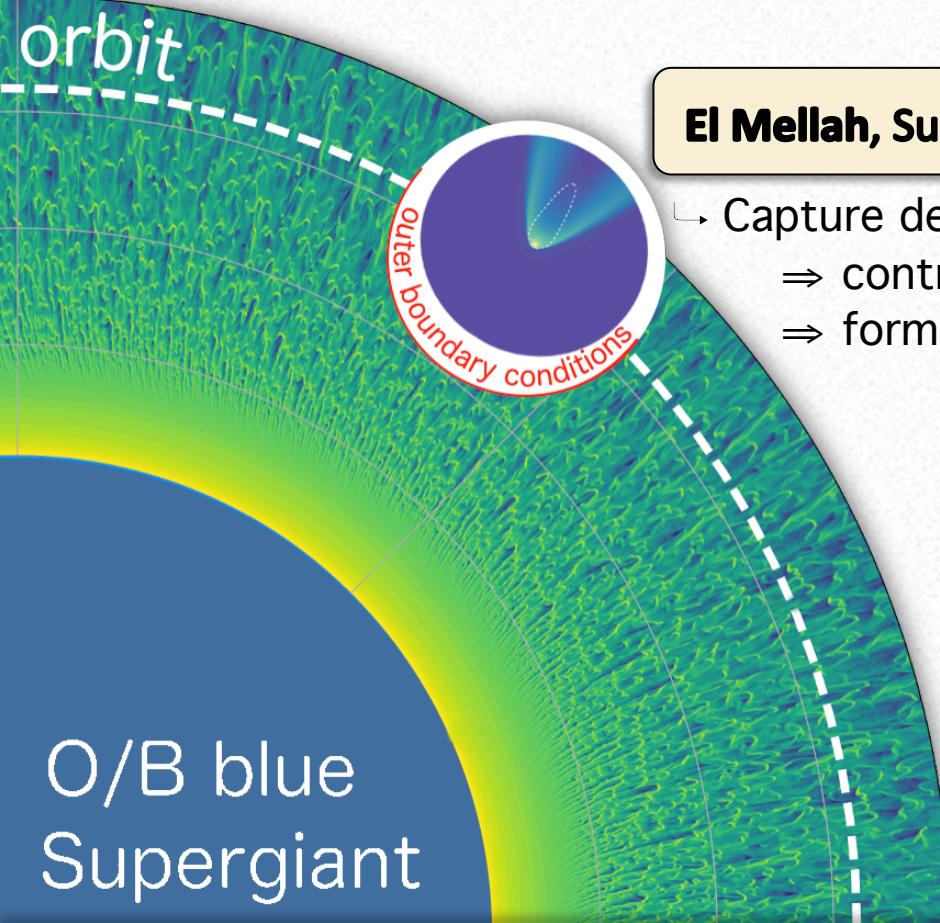
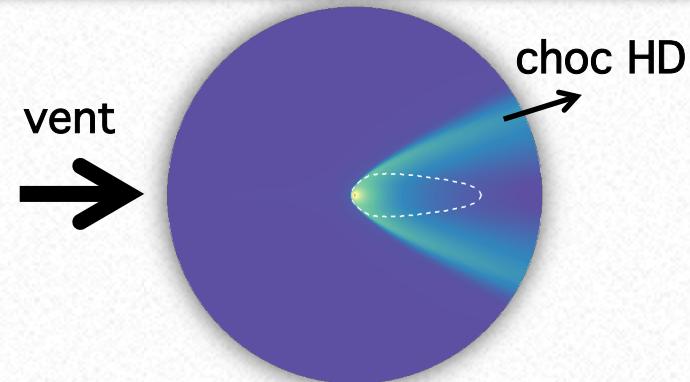
Rappaport et al., ApJ 2013

- ↳ 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

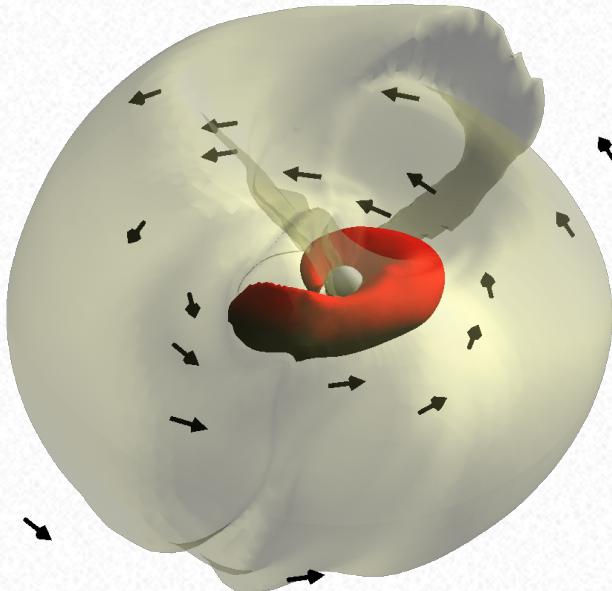


Binaires X de forte masse – Le flot d'accrétion

El Mellah & Casse, MNRAS 2017

WASO code

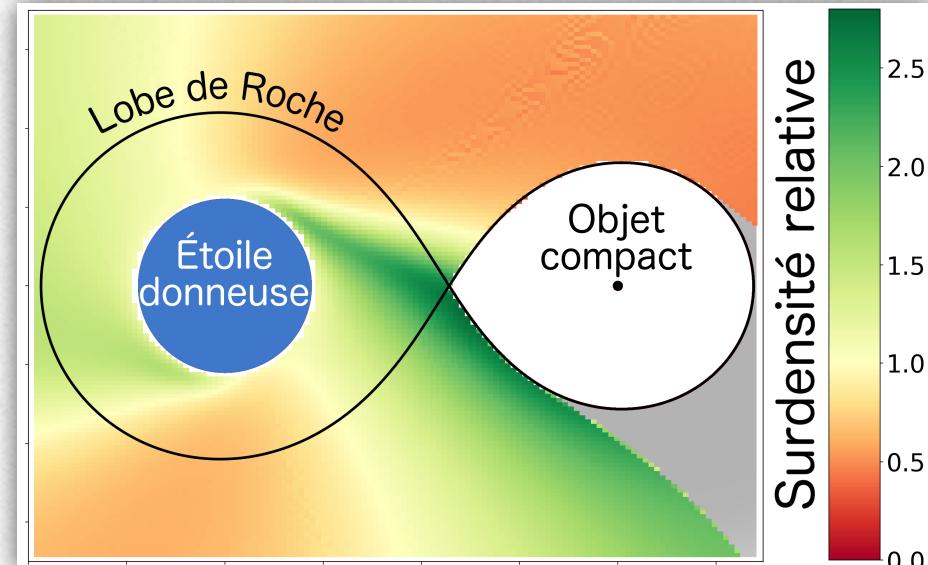
- Identification des paramètres favorables à la formation d'un disque



El Mellah, Sundqvist & Keppens, A&A 2019

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

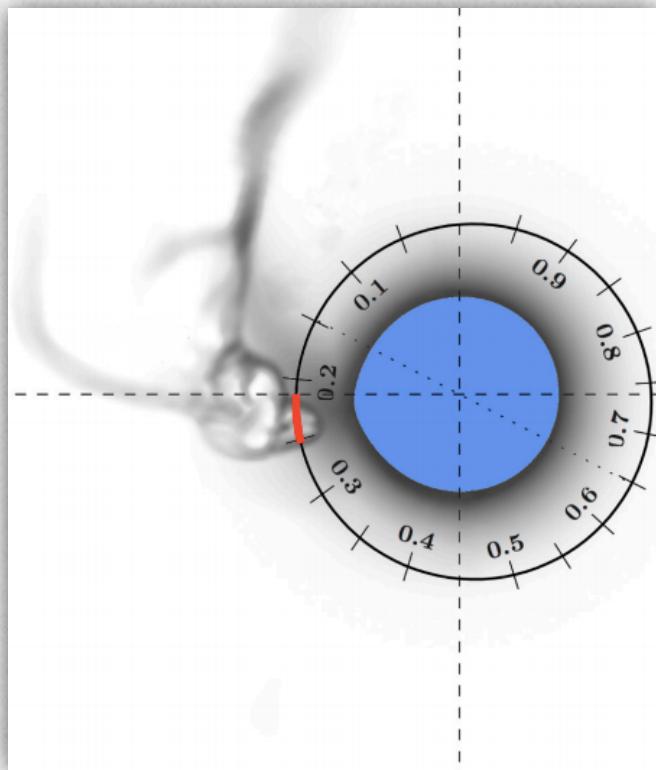


- Nouveau mécanisme de transfert de masse accéléré dans les systèmes binaires
⇒ les sources X ultra-lumineuses ne nécessitent pas de remplissage de lobe de Roche (eg M101 ULX-1)

Binaires X de forte masse (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

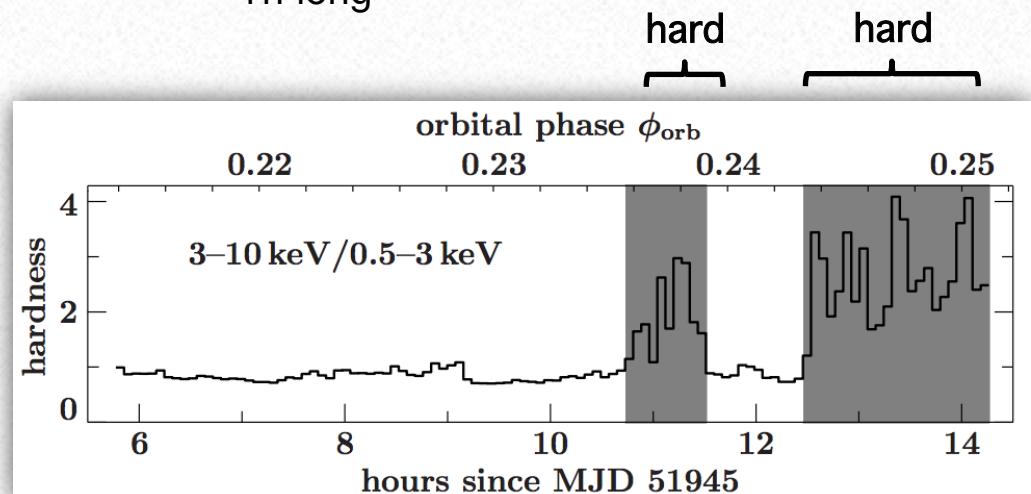


Phase ~ 0.25

- ↳ 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_{star})
- ↳ too packed
- ↳ too fast ($\sim 1,000 \text{ km/s}$)

ATHENA

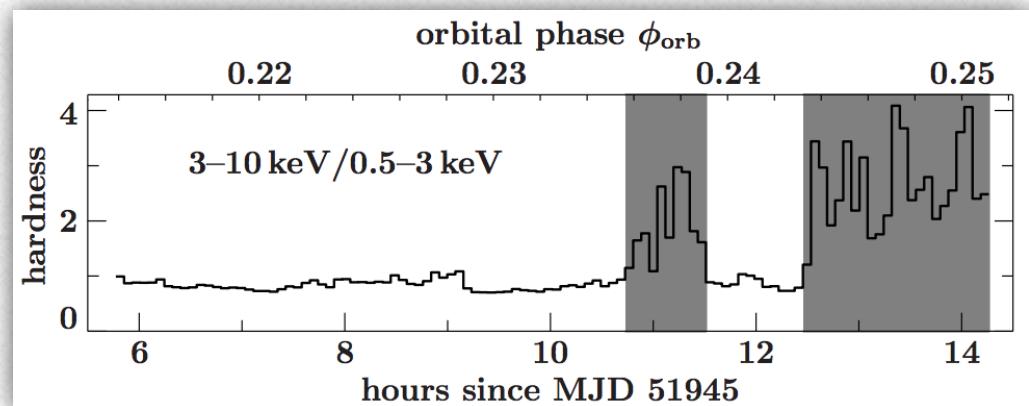
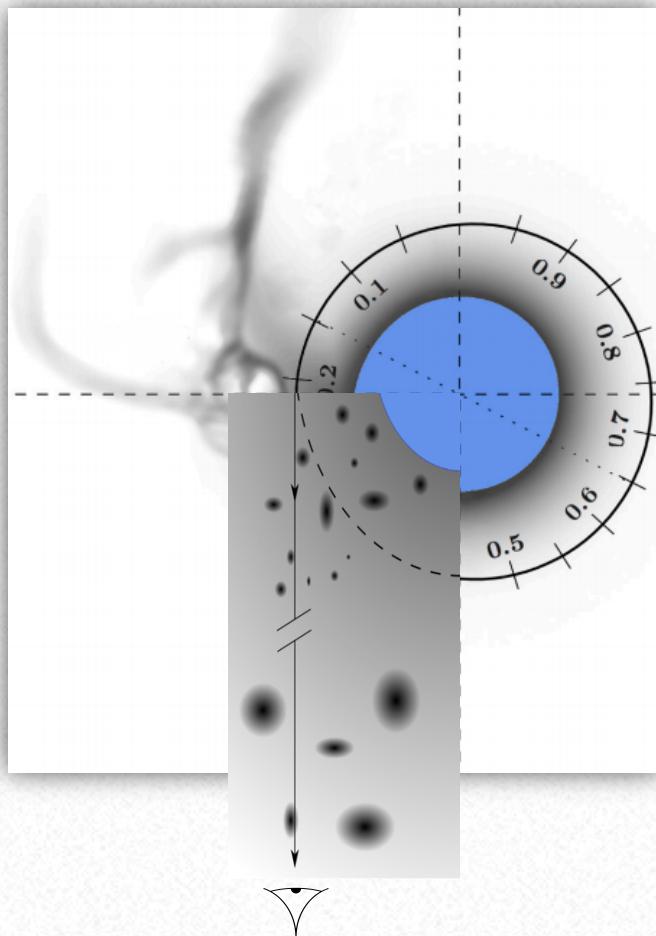


Binaires X de forte masse (et supergéantes rouges) – le vent stellaire

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

Phase ~ 0.25
↪ no tail in the L.O.S

Hardness enhanced
↪ not from source
↪ increase in N_{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

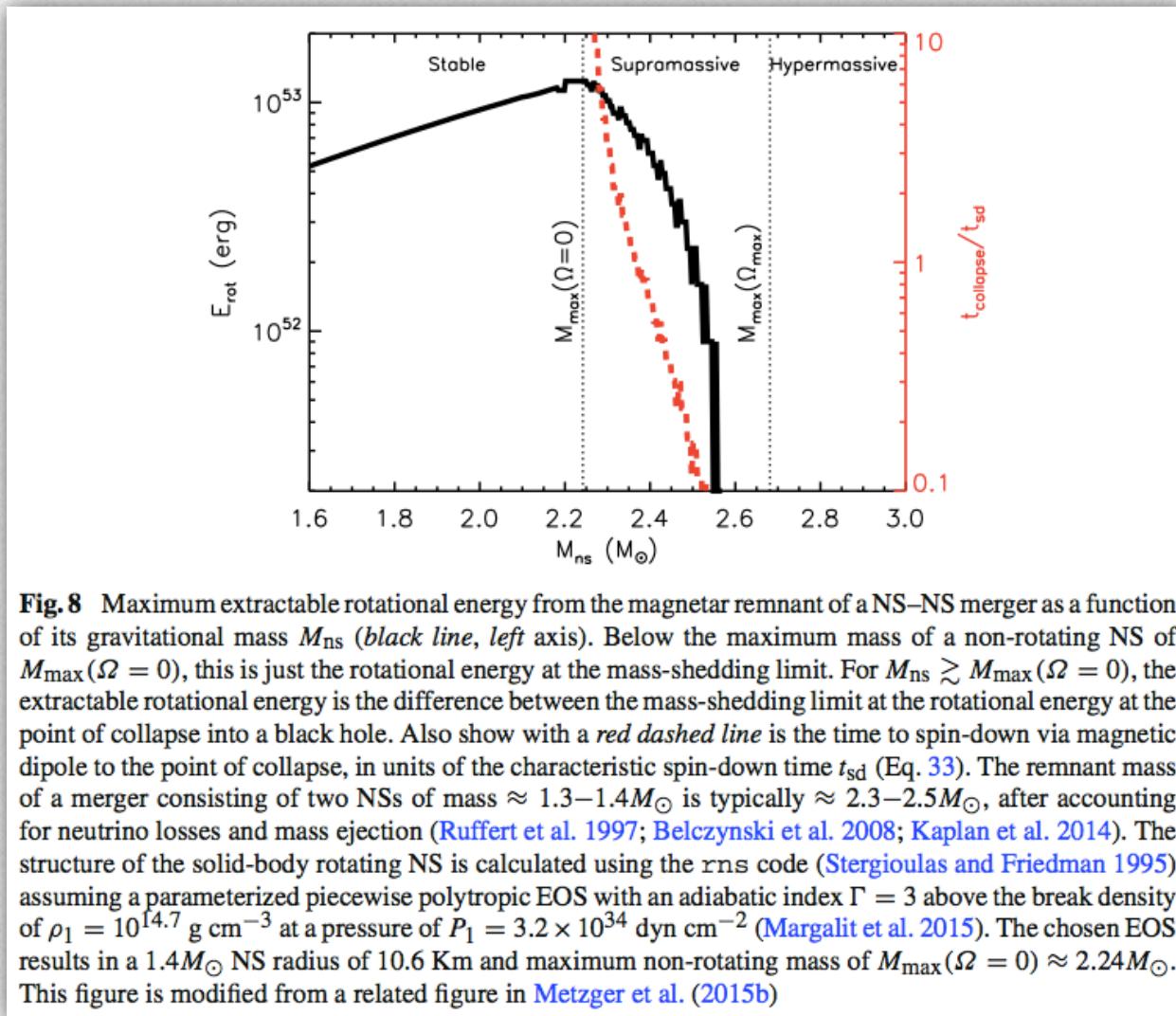
LE NUMÉRIQUE

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



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

Stabilité de l'étoile à neutrons reliquat



Coalescence et émission

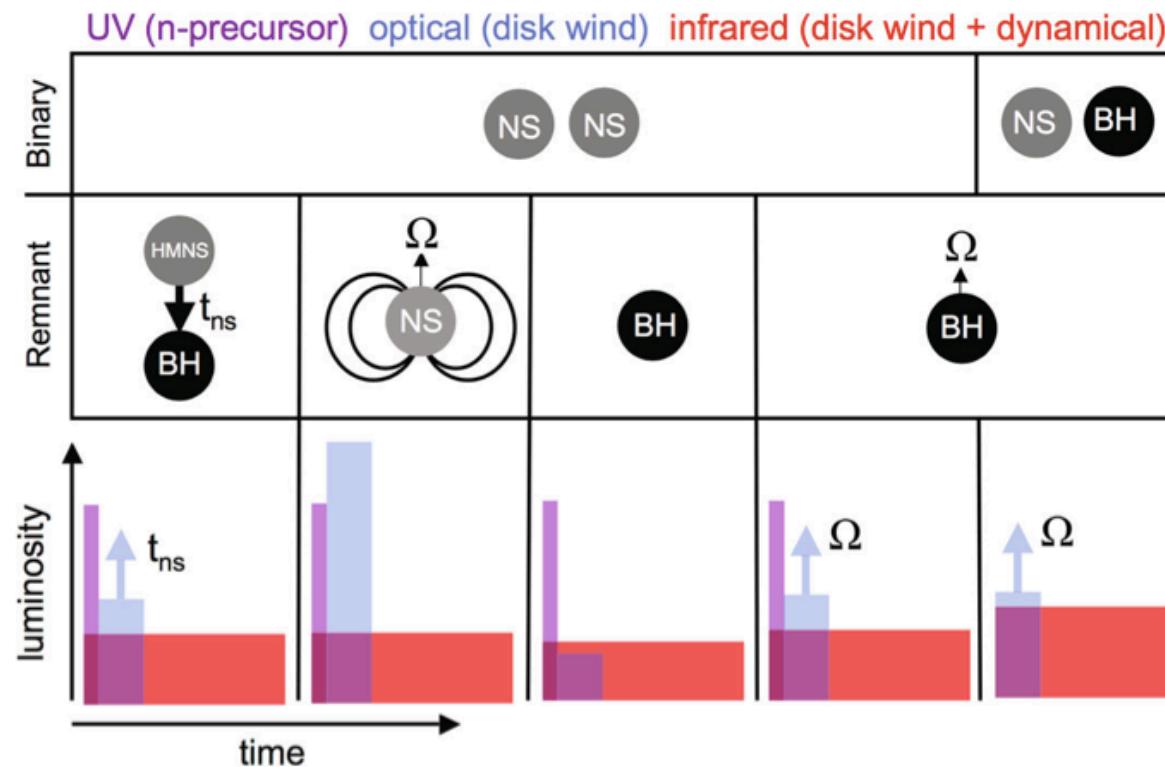


Fig. 13 Schematic illustration of the mapping between mergers and kilonova light curves. The *top panel* shows the progenitor system, either an NS–NS or an NS–BH binary, while the *middle plane* shows the final merger remnant (from left to right: an HMNS that collapses to a BH after time t_{collapse} , 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

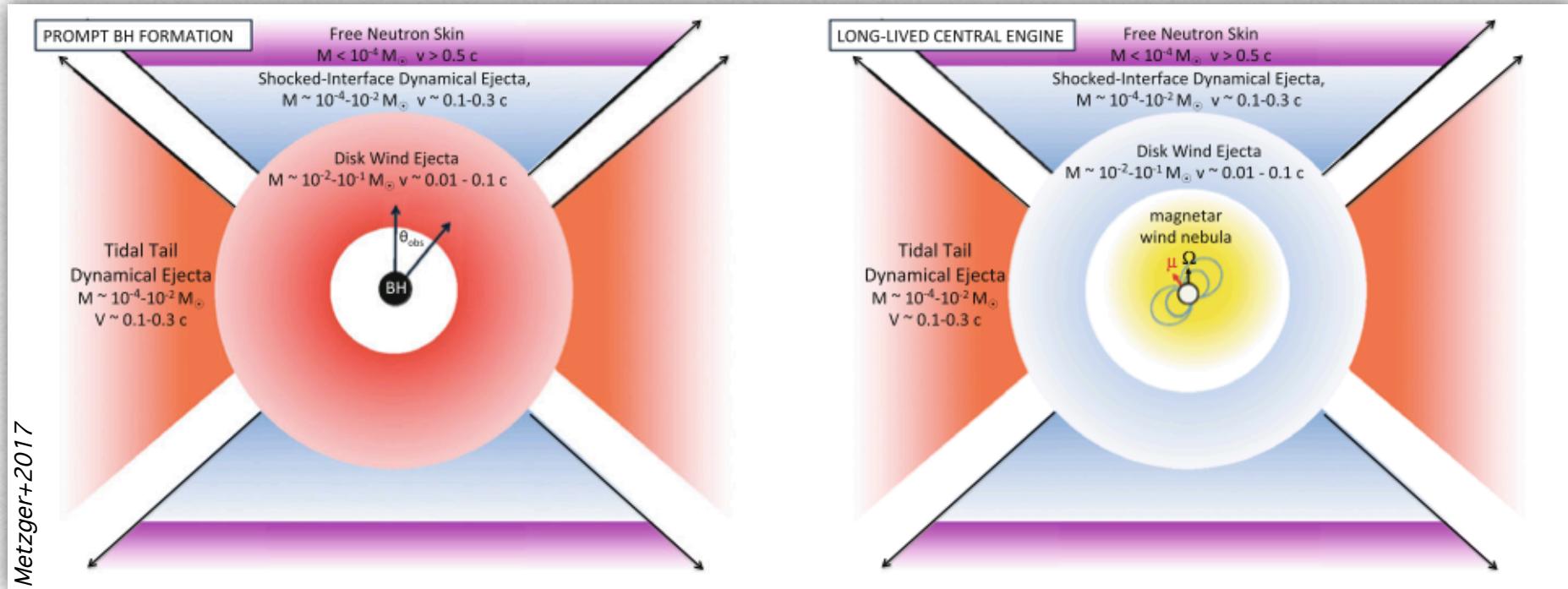


Diagramme de Corbet

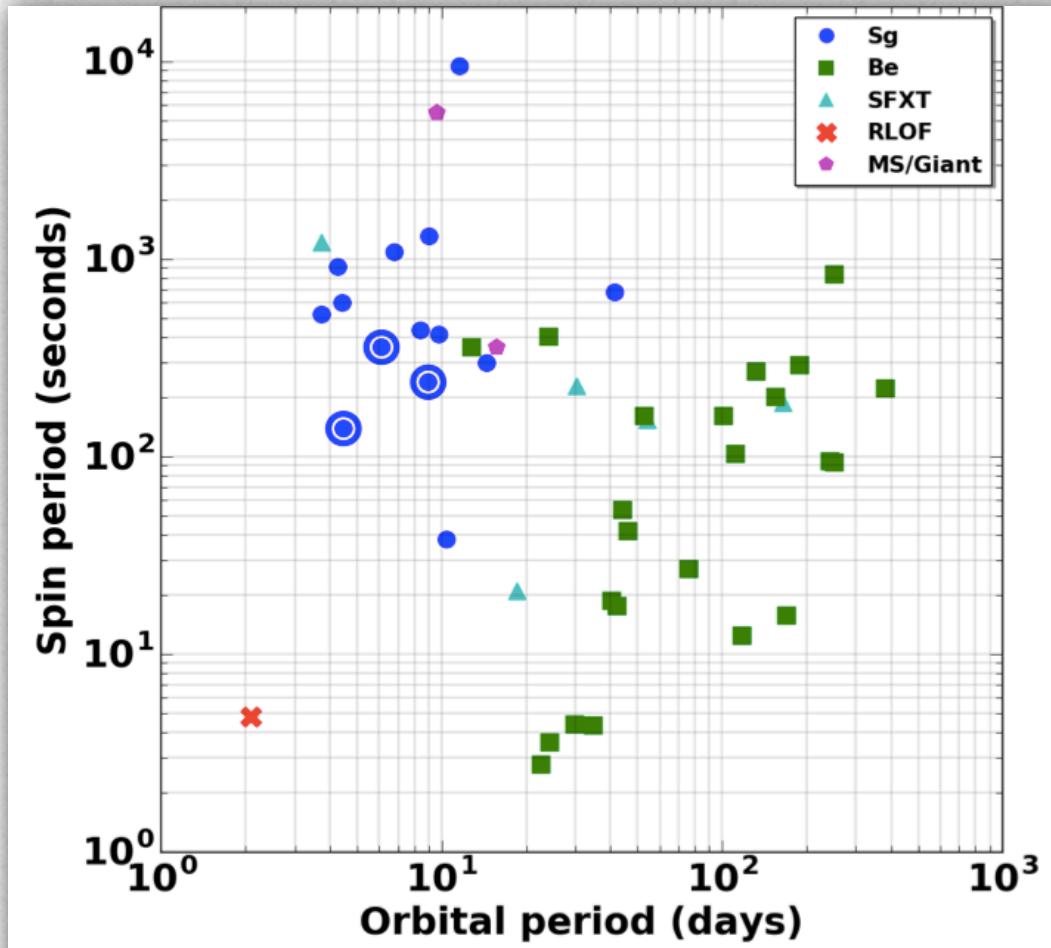
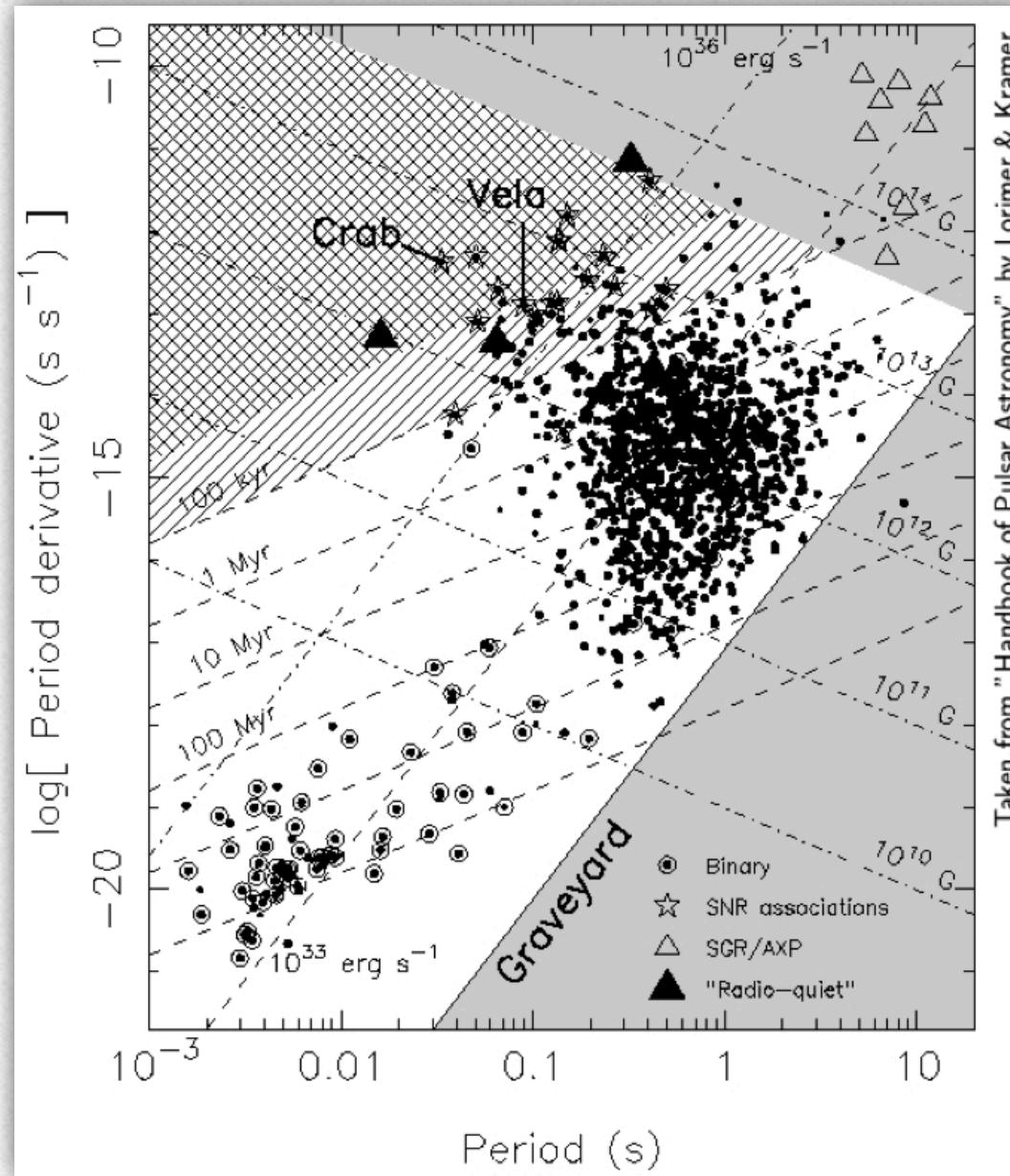
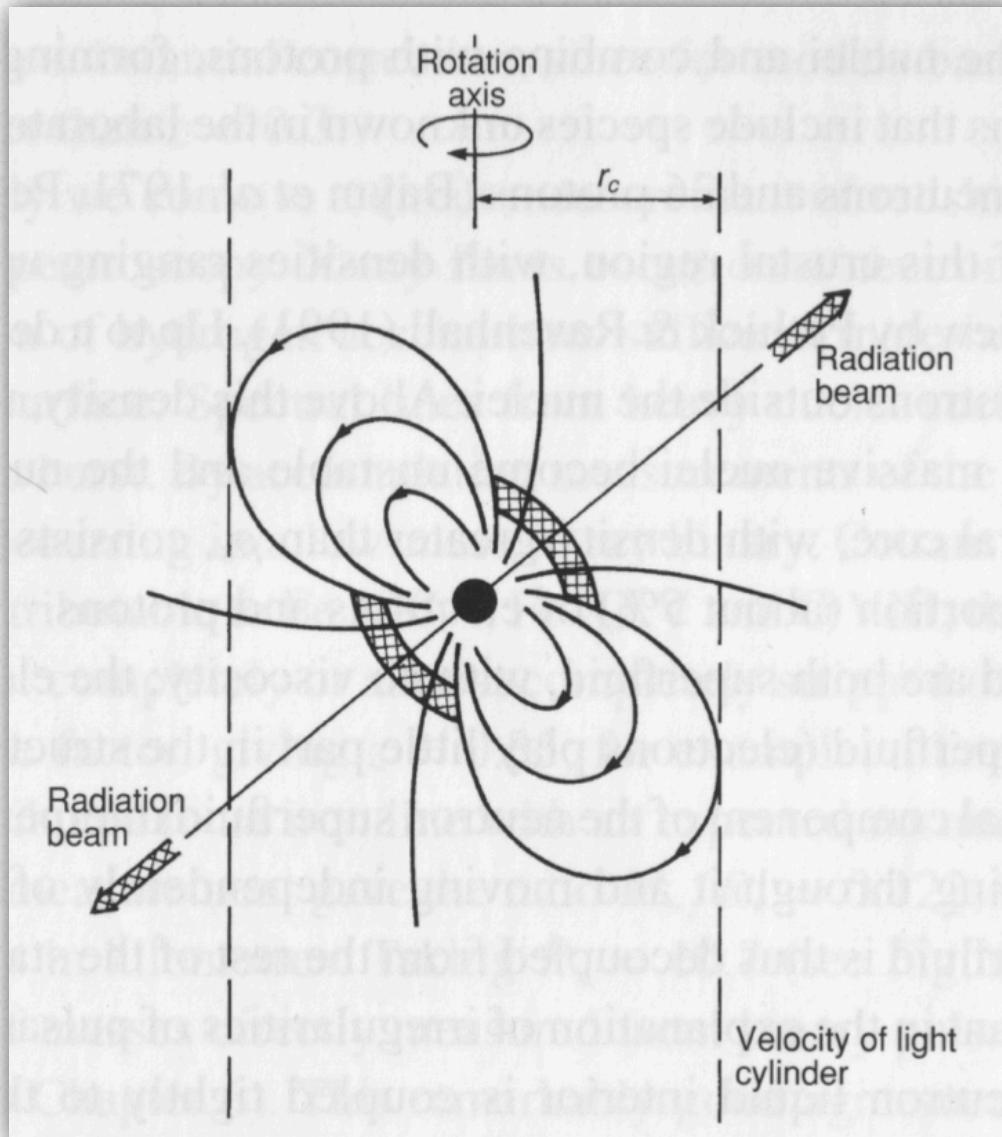


Figure 2.4: Corbet diagram of Galactic HMXB hosting a NS. The NS spin is represented as a function of the orbital period of the binary, for systems where both are measured. For BeXB (green squares), a correlation exists between the two, not in the case of SgXB (blue dots). In the bottom left part of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

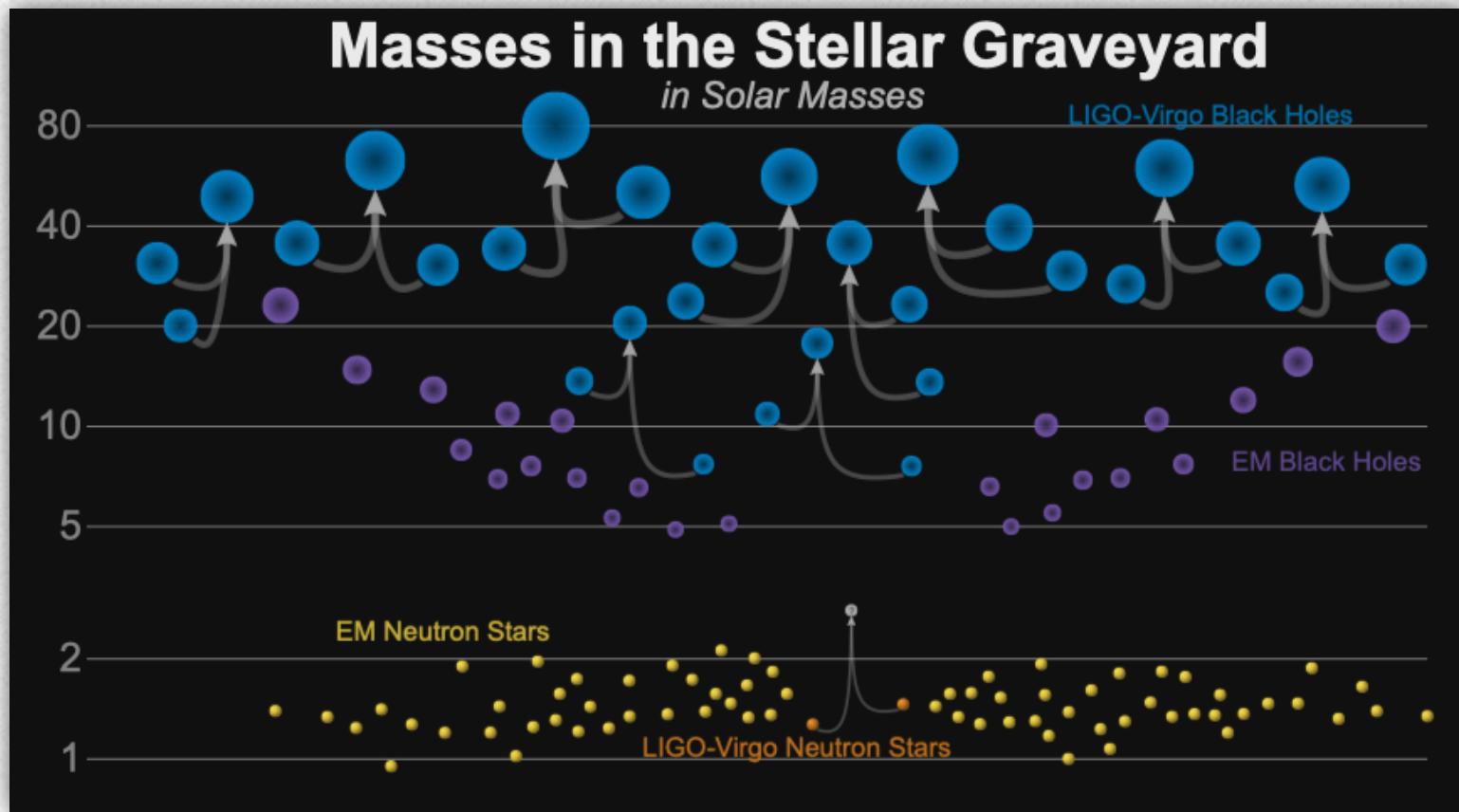
Diagramme P-Pdot



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

