



# ÉCOLE DOCTORALE

## SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'ENVIRONNEMENT ET PHYSIQUE DE L'UNIVERS, PARIS

Candidature à la composante « Physique de l'Univers » pour un début de contrat le 1<sup>er</sup> octobre 2021  
Le dossier doit être envoyé à [edstepup\\_pu@univ-paris-diderot.fr](mailto:edstepup_pu@univ-paris-diderot.fr)

### TITRE et NUMERO du SUJET :

« **Formation, évolution et impact des couples stellaires** », U33

Nom de l'étudiant :

Directeur (trice) : **CHATY, Sylvain, PR** ; [sylvain.chaty@u-paris.fr](mailto:sylvain.chaty@u-paris.fr)

Co-directeur (trice) :

Equipe d'accueil : Laboratoire APC (AHE)

Financement (ou demi-financement) possible hors contrat doctoral

Plus de renseignement voir : <http://ed560.ipgp.fr>, Rubrique : *Offres\_de\_thèse*  
Il est indispensable de faire acte de candidature sur le site de l'Ecole doctorale

Développement du sujet et organisation du travail : (1 à 2 pages)

### Contexte :

*Les étoiles massives vivent en couple...*

Plusieurs révolutions se sont produites ces dernières années dans le domaine stellaire. La première est la prise de conscience que la plupart (plus de 75%) des étoiles massives vivent au sein d'un couple stellaire (Sana et al. 2012). Cette binarité a des conséquences majeures sur l'évolution des étoiles, fortement influencée par la présence d'un « compagnon », en particulier via le transfert de masse et de moment cinétique (Chaty 2022). Le destin de ces couples stellaires est déterminé par l'évolution de chaque composante, l'étoile la plus massive s'effondrant en premier lors de l'explosion de *supernova*, donnant naissance à une étoile à neutron ou à un trou noir (Tauris et al. 2017). C'est ainsi que naît un couple stellaire accrétant, formé d'un astre compact en orbite autour de son compagnon, parmi les astres les plus fascinants de l'Univers. L'étoile compagnon, massive, se caractérise par une éjection de vent plus ou moins conséquente en fonction de sa composition, et l'astre compact, baignant dans ce vent, attire une partie de cette matière, qui, accrétée, s'accumule à la surface, chauffée à des températures de plusieurs millions de degrés, émettant principalement dans le domaine des rayons X. Ces astres donnent régulièrement lieu à des variations extrêmes de luminosité, de plusieurs ordres de grandeur sur l'ensemble du spectre électromagnétique, sur des échelles de temps allant de la seconde au mois.

*... jusqu'à fusionner...*

La deuxième révolution est la détection, par les interféromètres de la collaboration LIGO/Virgo, d'ondes gravitationnelles provenant de la fusion de deux trous noirs (première détection en 09/2015) puis de deux étoiles à neutron (08/2017). Cette fusion intervient à la fin de l'évolution de couples stellaires, en fonction de leur masse, de leur séparation orbitale, ainsi que de plusieurs autres paramètres. La fusion d'étoiles à neutron s'accompagne d'une émission d'ondes électromagnétiques, nommée *kilonova*, des observations spectroscopiques ayant détecté pour la première fois, la création d'atomes lourds lors de cet événement, via le « processus rapide » de nucléosynthèse (*r-process*).



École Doctorale : **STEP UP** : Bâtiment Condorcet - Bureau 376A  
Université Paris Diderot, Case courrier 7008 - 75205 Paris Cedex 13  
Tél.: +33(0)1. 57.27.61.10 - Email : [edstepup\\_pu@univ-paris-diderot.fr](mailto:edstepup_pu@univ-paris-diderot.fr)



... avec un impact sur leur environnement !

Il est aujourd'hui établi que l'effondrement d'étoiles massives en supernova joue un rôle clé dans l'enrichissement du milieu interstellaire -des atomes lourds aux molécules complexes-, ainsi que dans le déclenchement de la formation de nouvelles étoiles. Par contre, l'impact du vent de ces étoiles massives sur leur environnement, tout au long de leur vie, est longtemps resté négligé. Or, cette matière éjectée se disperse dans le milieu environnant, jusqu'à entrer en collision avec un milieu interstellaire dense, potentiellement à l'origine du déclenchement de nouvelles formations d'étoiles, comme suggéré par des observations du satellite *Herschel* (Chaty et al. 2012, Servillat et al. 2014). Les observations récentes de *r-process* concomitant à la détection d'une kilonova prouvent que la fusion de deux étoiles à neutron est un élément important (voire majoritaire) de nucléosynthèse dans la Galaxie.

Cette thèse, couvrant divers domaines de l'astrophysique, propose d'étudier la formation et l'évolution de ces formidables couples d'étoiles massives, dont le rôle est primordial au sein du cycle de la matière, ainsi que leur impact sur leur environnement, en se basant sur des observations multi-longueur d'onde provenant de divers observatoires au sol et dans l'espace, dont des données propriétaires (observatoire ESO) et publiques (satellite Gaia).

### Objets d'étude :



Fig. 1 : Les objets d'étude sont les couples stellaires hébergeant des astres compacts (étoiles à neutrons et trous noirs, à droite) en orbite autour d'une étoile massive (à gauche).

### Description du sujet de thèse :

1. **La formation des étoiles massives** dépend principalement des caractéristiques du milieu interstellaire environnant à leur naissance -densité, composition, taux de formation stellaire-, ainsi que de la masse et rotation des proto-étoiles. Les observations de binaires compactes, couplées à des études statistiques, montrent que les couples d'étoiles massives naissent au sein de complexes de formation stellaire, berceau des étoiles les plus massives de notre Galaxie (Coleiro & Chaty 2013, García et al. *subm.*). Ces études permettent de suivre l'évolution des couples stellaires, en particulier via des paramètres tels que leur âge, leur vitesse, et leur distance de migration à partir de leur lieu de naissance.

2. **L'évolution d'une étoile massive** au sein d'un couple stellaire est déterminée par de nombreux facteurs, tels que : rapport de masse, séparation orbitale, et échanges de matière et de moment cinétique. Un échantillon important de binaires compactes est aujourd'hui répertorié, qui a considérablement crû ces dernières années, constitué d'astres à différents stades de leur évolution (voir un recensement dans Fortin et al 2018). Nous pouvons ainsi comparer les contraintes observationnelles sur les types spectraux, compositions, âges, *kicks*, et distances de migration de ces astres, avec les prédictions des modèles d'évolution stellaire. Le destin d'un couple d'étoiles massives conduit parfois aux événements les plus énergétiques de l'Univers, lorsque les deux composantes entrent en collision et fusionnent.

3. **L'impact sur l'environnement des étoiles massives** est une question cruciale à toutes les étapes de la vie de ces étoiles. En effet, tout au long de leur vie, les étoiles massives éjectent un vent stellaire extrêmement puissant, dense et rapide, qui entre en collision avec le milieu interstellaire. Nous avons montré, à partir d'observations avec le satellite *Herschel*, que le vent d'une étoile massive pouvait créer une cavité dans le milieu interstellaire environnant, et même déclencher de la formation stellaire, comme l'indique la présence d'objets stellaires jeunes autour de certains couples d'étoiles massives. Enfin, aussi bien les explosions de supernova que les fusions d'astres compacts présentent un impact majeur sur le milieu interstellaire environnant, par la quantité de matière et d'énergie relâchée.

#### Description Groupe/labo/encadrement :

Cette thèse, encadrée par Sylvain Chaty, Professeur à l'Université de Paris, se déroulera au sein du Laboratoire d'Etude des Processus Cosmiques de Haute Energie (LEPCHE), dans l'UMR AIM (Astrophysique Instrumentation Modélisation), idéale pour effectuer une telle thèse au confluent de plusieurs domaines de l'astrophysique -couples stellaires, formation stellaire, milieu interstellaire, galaxies, etc-, avec une interaction effective entre les différents groupes d'étude.

#### Travail proposé :

- Analyse d'observations multi-longueur d'onde : photométrie grand champ, spectroscopie, paramètres orbitaux (ESO VLT/X-shooter, Gaia...)
- Rédaction d'articles scientifiques
- Rédaction de propositions de temps de télescope
- Présentations orales en congrès nationaux et internationaux

#### Formation et compétences requises :

Master en Astronomie et Astrophysique

#### Compétences acquises :

Plusieurs compétences acquises et développées au cours de cette thèse seront valorisables et transférables à d'autres domaines: analyse d'images à différentes longueurs d'onde (optique, infrarouge, radio), traitement de données, rédaction d'articles et de propositions de temps de télescope, travail en équipe, présentations orales en congrès nationaux et internationaux.

#### Collaborations/Partenariats :

Diverses collaborations de recherche (nationales/internationales) seront poursuivies et/ou mises en place pendant la thèse.

**Contact :** Scientifique : Sylvain CHATY : [sylvain.chaty@u-paris.fr](mailto:sylvain.chaty@u-paris.fr)

#### Bibliographie :

Chaty et al., 2012, POS, 176, 92 ; Chaty, 2022, Accreting Binaries, IOP eBooks ; Chaty et al., Proc. IAU Symposium, 2019, 346, 161 ; Coleiro & Chaty, 2013, ApJ, 764, 185 ; Fortin, Chaty, Coleiro et al., 2018, A&A, 618, A150 ; Sana et al., 2012, Science, 337, 444 ; Servillat, Coleiro, Chaty et al., 2014, ApJ, 797, 114 ; Tauris et al. (including Chaty), 2017, ApJ, 846, 170