

# « MODELISATION DE LA FORMATION DES ÉTOILES MASSIVES ET DE LEUR DISQUE PROTOPLANÉTAIRE »

## RESUME

Les étoiles massives jouent un rôle clé dans le cycle du milieu interstellaire (Zinnecker&Yorke 2007) car ce sont elles qui contribuent majoritairement au budget énergétique à travers leur rétroaction radiative (luminosité, pression de radiation, ionisation) et cinétique (outflows, jets, vents et explosion de supernovæ).

Des observations récentes suggèrent que la formation des planètes ait lieu dans les toutes premières phases d'évolution des disques protoplanétaires (Manara et al. 2018 ; Tychoniec et al. 2020 ; Segura-Cox et al. 2020). La compréhension de la formation des planètes implique donc de bien comprendre et contraindre les phases de formation des étoiles et de leurs disques protoplanétaires qui peuvent être concomitantes à la formation des planétésimaux. Ces disques jeunes sont encore enfouis dans l'enveloppe proto-stellaire dense, ce qui rend leurs observations encore limitées avec les instruments actuels. Il est donc primordial de contraindre la physique de leur formation par le biais de simulations numériques.

L'objectif de cette thèse est d'étudier les phases précoces de formation des étoiles massives et de leur disque protoplanétaire. Pour ce faire, des simulations numériques avec le code RAMSES prenant en compte l'interaction de l'hydrodynamique, du champ magnétique, du rayonnement et de la dynamique de la poussière, seront menées. Les résultats numériques seront ensuite comparés aux observations pour mieux comprendre et contraindre les scénarios de formation des étoiles.

## DESCRIPTION ET PROBLEMATIQUE

Le scénario en deux étapes (Larson 1969) de formation des étoiles est bien établi. Le gaz du nuage moléculaire initialement optiquement mince subit un premier effondrement isotherme jusqu'à atteindre les densités où il devient opaque à son propre rayonnement. Le gaz forme alors un premier cœur hydrostatique. L'accrétion permet ensuite d'augmenter la température jusqu'à atteindre le seuil de dissociation de H<sub>2</sub>, réaction endothermique, qui provoque un second effondrement jusqu'à la formation de la proto-étoile.

Dans le cas des étoiles massives, le scénario exact de formation est encore sujet à débat. La formation des étoiles se fait-elle de manière isolée ou compétitive ? Quelle est l'influence de l'environnement ? Quels sont les mécanismes d'éjection : sont-ils principalement radiatifs ou magnétiques ? Quels mécanismes fixent la multiplicité des systèmes ?

Les premières simulations 3D hybrides avec MHD non idéale de formation d'étoiles massives (Mignon-Risse et al. 2021a,b) ont pu apporter un début de réponse (accrétion principalement via un disque, outflows à dominante magnétique plutôt

que radiatif, multiplicité des systèmes stellaires liée au niveau de turbulence du milieu) mais elles restent encore approximatives quant au traitement de la poussière interstellaire. En effet, dans ces simulations, le rapport gaz sur poussière est considéré constant, les poussières ne faisant que suivre passivement le gaz.

Or, les grains de poussière affectent la dynamique du gaz par divers mécanismes (résistivités magnétiques en tant que porteurs des charges, opacités via leur distribution en taille). Suivre la dynamique des grains de poussière, l'évolution de leur concentration, ainsi que leur distribution en taille, apparaît donc comme fondamental dans le contexte de la formation des étoiles (Lebreuilly et al. 2020 pour les étoiles de faible masse).

Le but de cette thèse est de mener des simulations numériques de magnéto-hydrodynamique radiative avec dynamique de la poussière à la pointe de l'art afin de mieux contraindre les scénarios de formation des étoiles et de leur disque protoplanétaire actuellement proposés et de confronter les résultats numériques aux observations (ALMA par exemple).

## DESCRIPTION

### GROUPE/LABO/ENCADREMENT

Cette thèse, encadrée par Matthias González, Maître de Conférences à Université Paris Cité, sera effectuée au sein de l'équipe LMPA (Modélisation des Plasmas Astrophysiques), dans le laboratoire AIM (Astrophysique, Instrumentation, Modélisation). Ce laboratoire est à la pointe des simulations numériques en astrophysique en France (<http://irfu.cea.fr/Projets/COAST>) et compte en son sein un groupe d'observateurs de régions de formation d'étoiles mondialement reconnus (P. André, A. Maury, lauréate de l'ERC Advanced Grant PEEBLES en 2023). M. González est l'un des responsables scientifiques du projet ANR COSMHIC sélectionné en 2020 et participe au projet ERC Synergy ECOGAL sélectionné en 2019 (PI : P. Hennebelle). Le(la) doctorant(e) bénéficiera donc d'un environnement scientifique particulièrement riche.

Équipe LMPA : <http://irfu.cea.fr/Dap/>

<http://irfu.cea.fr/Pisp/matthias.gonzalez/>

### TRAVAIL PROPOSE

Pendant cette thèse, le(la) doctorant(e) utilisera le code RAMSES (Teyssier et al. 2002) pour modéliser la formation des étoiles. Ce code contient des modules de magnéto-hydrodynamique : MHD idéale (Fromang et al. 2006), effets non-idéaux de diffusion ambipolaire et ohmique (Masson et al. 2012), ainsi que différents modules de transfert radiatif : diffusion à flux limité (Commerçon et al. 2011, 2014, González et al. 2015) et modèle hybride (Mignon-Risse et al. 2020). La plupart de ces modules ont été (co-)développés par des membres du laboratoire AIM.

Dans un premier temps, pour prendre en main le code et s'appropriier le sujet, il sera proposé de retrouver les résultats obtenus par l'équipe lors d'une précédente étude (Mignon-Risse et al. 2021). Cette étude sera ensuite étendue en améliorant le traitement numérique de la dynamique de la poussière, en ne considérant plus un rapport gaz sur poussières constant. Pour ce faire, le module développé par un post-doc de l'équipe (Lebreuilly 2020) sera couplé à celui du schéma hybride de transfert radiatif dédié aux étoiles massives, et développé par un précédent doctorant (Mignon-Risse et al. 2020).

Une étude sera menée pour faire varier les conditions initiales et étudier la robustesse des résultats obtenus, en particulier en ce qui concerne

la proto-étoile mais également son environnement (disque d'accrétion et outflows).

Dans un second temps, il conviendra de mener des simulations à plus grande échelle de nuages moléculaires donnant naissance à plusieurs étoiles. Elles permettront d'avoir accès à la statistique de la formation d'une population d'étoiles et de leur disque protoplanétaire. L'étude de la fonction de masse initiale des étoiles et de la multiplicité des systèmes stellaires sera menée.

Tout au long de la thèse, des observations synthétiques à partir des résultats de simulations seront menées pour établir des cartes d'émission (Tung et al. soumis) et de polarisation. Ces cartes synthétiques seront inter-comparées aux observations et seront mises en ligne à la disposition de la communauté scientifique via la base de données Galactica (<http://www.galactica-simulations.eu/db/>) développée au CEA.

### FORMATION ET COMPETENCES REQUISES

Stage de master 2 préalable proposé par l'encadrant.

Un master 2 en astrophysique ou simulation numérique est vivement souhaité.

Langages de programmation : Fortran, python.

Éventuellement calcul parallèle : MPI/OpenMP.

### COMPETENCES ACQUISES

Autonomie, synthèse de résultats et écriture de rapports (français et anglais), présentations orales (français et anglais).

Programmation, calcul haute performance.

### COLLABORATIONS/PARTENARIATS

Benoît Commerçon (CRAL, ENS Lyon)

### CONTACT

Matthias González ([matthias.gonzalez@cea.fr](mailto:matthias.gonzalez@cea.fr))