

1) Contexte et objectif scientifique:

Les étoiles jeunes, de même que les trous noirs super-massifs au centre des galaxies, sont alimentés en masse par un disque de gaz en accrétion. Le processus physique qui permet au disque d'accréter sur l'objet central aux taux observés demeure cependant **une des grandes énigmes de l'astrophysique contemporaine**. En effet le moment cinétique dans un disque en rotation képlérienne augmente vers l'extérieur comme la racine carrée du rayon. Il faut donc que le gaz perde du moment cinétique pour spiraler vers l'intérieur. La viscosité collisionnelle n'étant pas suffisante, deux autres processus sont invoqués: une 'viscosité turbulente' qui transporte le moment cinétique radialement (eg. Balbus & Hawley 1998), ou un 'vent de disque' magnéto-centrifuge, qui extrait le moment cinétique verticalement (Blandford & Payne 1982). Distinguer entre ces deux possibilités est crucial pour comprendre la physique des disques d'accrétion, et pour établir *une théorie fiable de la formation des planètes*. En effet, celle-ci serait *dramatiquement impactée par la présence d'un vent de disque magnéto-centrifuge* dans les disques protoplanétaires (eg. Raymond & Morbidelli 2020, Pascucci et al. 2023).

Alors que le scénario de 'viscosité turbulente' tenait jusqu'ici le haut du pavé, les observations récentes du grand radio-interféromètre ALMA (en particulier par notre équipe) ont rebattu les cartes en révélant dans plusieurs proto-étoiles un "flot" conique de gaz moléculaire en rotation quittant les parties internes du disque, et dont le flux de masse et le moment cinétique semblent en accord avec un vent de disque magnéto-centrifuge (eg. Tabone et al. 2017, 2020; de Valon et al. 2020, 2022). Néanmoins, avant d'opérer un changement définitif et majeur de paradigme sur le processus responsable de l'accrétion dans les disques (et sur les conditions de formation planétaire) il est crucial de vérifier si l'interprétation des observations en termes de vent de disque MHD est correcte.

En effet, ces systèmes en accrétion possèdent aussi sur leur axe un jet très rapide (provenant du bord interne du disque), dont la variabilité temporelle produit des chocs d'étrave très puissants dans leur voisinage; on peut alors se demander si les flots moléculaires en rotation observés par ALMA pourraient tracer non pas un vent magnéto-centrifuge mais simplement l'entraînement, par les chocs d'étrave successifs du jet, de l'atmosphère du disque en rotation ?

L'objectif de la thèse sera de répondre à cette question cruciale, et ainsi d'établir pour la première fois de façon solide l'interprétation correcte des flots coniques en rotation observés par ALMA, et leur rétroaction sur le processus d'accrétion et de formation planétaire. Cela se fera par le biais de simulations numériques incluant les molécules (pour lesquelles la collaboration proposée avec l'UNAM est indispensable), puis leur comparaison détaillée avec les dernières observations obtenues par notre équipe avec le *James Webb Space Telescope* (JWST) et l'interféromètre ALMA.

Le sujet étant essentiellement inexploité, il offre de nombreuses possibilités d'avancées originales et de publications dans des articles à referee. Les résultats obtenus auront aussi des implications plus vastes sur l'interprétation des flots moléculaires issus des disques d'accrétion de trous noirs super massifs. Mis à part le facteur d'échelle, ces flots s'avèrent en effet très semblables à ceux des protoétoiles, et abritent eux aussi un jet variable sur leur axe...

2) Justification de l'approche scientifique et de la collaboration stratégique SU-UNAM:

Le travail de thèse consistera à mener des simulations numériques à haute résolution (qq unités astronomiques) de la rétroaction des chocs engendrés par un jet variable sur l'environnement à petite échelle de la protoétoile, cad le disque d'accrétion où se forment les planètes, puis les comparer aux dernières observations ALMA et JWST.

Cette thèse s'inscrit dans le prolongement naturel de la thèse de Mialy Rabenanahary, dirigée de 2019 à 2022 par S. Cabrit (LERMA), en co-supervision avec Z. Meliani (expert en numérique, LUTh), et G. Pineau des Forêts (expert en chocs interstellaires, LERMA). Elle avait consisté à simuler numériquement les chocs d'étrave d'un jet de protoétoile variable dans l'enveloppe parente statique à *grande échelle* (Rabenanahary et al. 2022). Nous allons ici "zoomer" sur les régions internes afin de voir si le même scénario d'entraînement pourrait expliquer les vents moléculaires coniques en rotation observés à l'échelle du disque (**cf. Figure 1**).

L'étudiant.e simulera deux scénarios distincts: (1) l'interaction d'un jet variable avec l'atmosphère du disque en rotation; (2) l'interaction d'un jet variable avec un vent éjecté depuis le disque. Puis il.elle les comparera aux observations ALMA et JWST de notre équipe, afin d'établir si l'entraînement seul suffit à les reproduire (scénario 1), ou si un vent de disque est nécessaire (scénario 2).

Comme pour M. Rabenanahary, nous utiliserons le code public parallélisé à grille adaptative AMR-VAC (voir <http://amrvac.org>; Keppens et al. 2021), sous la co-supervision étroite de Z. Meliani (expert co-développeur de AMR-VAC). Ce code est très bien adapté pour modéliser le lancement et la propagation de vents et jets à l'échelle

circumstellaire (e.g. van Marle et al. 2012, Rabenanahary et al. 2022). Il permet aussi de suivre l'entraînement des grains de poussière (pour comparer aux images JWST en lumière diffusée) et d'ajouter un champ magnétique (pour simuler un vent de disque MHD externe, cf. Meliani et al. 2006). Il est donc parfaitement adapté à nos objectifs. Les simulations seront effectuées sur le meso-centre de calcul de l'Observatoire de Paris-PSL, auquel nous avons un accès garanti, ainsi que sur les centres nationaux où Z. Meliani à l'habitude de demander et obtenir du temps de calcul.

Un dernier ingrédient devra être ajouté à AMR-VAC pour comparer aux observations ALMA (en CO) et JWST (en H2) : le calcul de l'abondance chimique *hors-équilibre* des molécules. En effet les chocs d'étrave produits par le jet sont suffisamment rapides et chauds pour les dissocier en partie, et donc leurs processus de reformation (dont les temps caractéristiques sont bien plus longs que les temps d'advection) doivent être *intégrés en parallèle avec la dynamique* pour obtenir des abondances réalistes. Le refroidissement radiatif par H2 (très efficace) doit aussi être inclus pour obtenir des estimations fiables de la température du gaz. Mais ces ajouts soulèvent d'importants défis numériques dûs à l'extrême raideur ("stiffness") du système d'équations chimiques, et à l'augmentation du temps de calcul.

Pour relever ce défi, nous proposons de nous appuyer sur *l'expertise de pointe unique de l'équipe d'A. Rodriguez-Gonzalez à l'UNAM*, qui a développé ces dernières années des méthodes numériques efficaces et stables pour traiter les écoulements radiatifs réactifs, incluant jusqu'à 15-30 espèces (eg. Rodriguez-Gonzalez et al. 2023, MNRAS); l'implémentation de ces capacités chimiques dans AMR-VAC dotera notre équipe d'un outil prédictif *unique au monde* (le code de l'UNAM ne traite ni le champ magnétique ni la poussière). **Une co-direction de la thèse par notre collaborateur à l'UNAM sera nécessaire pour effectuer et valider cette implémentation, ce qui justifie la présente demande de contrat doctoral dans le cadre du partenariat stratégique SU-UNAM.** En retour, l'équipe de l'UNAM bénéficiera de l'expertise unique de notre équipe sur les jets et flots protostellaires (S. Cabrit), et sur la physico-chimie des chocs poussiéreux (code 1D Paris-Durham, dont G. Pineau des Forêts est expert développeur) ; nous les renseignerons en particulier sur les meilleurs taux de réactions chimiques et de refroidissement à adopter dans leur code, parmi tous ceux disponibles dans la littérature, pour améliorer leurs propres simulations sur des objets différents.

Notons qu'une collaboration suivie et efficace existe déjà entre Z. Meliani et A. Rodriguez-Gonzalez sur des simulations numériques dans un autre contexte (Meliani et al. 2024), aussi nous n'avons aucun doute que la co-direction proposée ici serait très fructueuse, et contribuerait à renforcer les liens entre SU et l'UNAM. Plusieurs séjours de longue durée de l'étudiant.e à l'UNAM seront financés au cours de la thèse, sur les crédits de S. Cabrit au LERMA.

S. Cabrit est co-I de programmes d'observation à très haute résolution et sensibilité de flots coniques avec ALMA et le JWST, au meilleur niveau mondial (avec C. Dougados (IPAG, Grenoble), B. Nisini (Italie), I. Pascucci (USA)). Les données sont réduites, et les résultats sont prêts à être directement comparés avec nos simulations. cf Figure 1 ci-dessous.

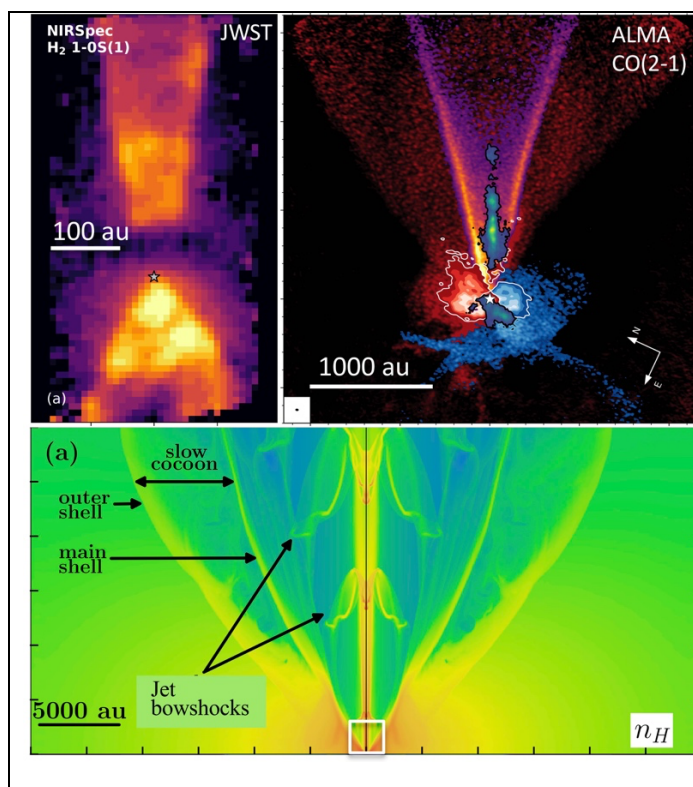


Figure 1 :

En haut : Exemple des observations que l'on cherche à modéliser dans la thèse: A gauche, en orangé, le flot conique de H2 chaud à 2000 K observé par le JWST vers la protoétoile DG Tau B (*Delabrosse et al. soumis*) ; A droite, en rose, le même flot conique observé en CO avec l'interféromètre ALMA (*de Valon et al. 2020*). Le jet axial rapide, et le disque protoplanétaire, sont aussi représentés (en vert et en rouge/bleu, resp.).

En bas : Simulation numérique AMR-VAC de l'interaction entre un jet variable et une enveloppe stratifiée (*Rabenanahary et al. 2022*). Les chocs d'étrave successifs (« jet bowshocks ») creusent une cavité conique (« main shell »). Pour comparer aux observations ci-dessus, la thèse proposée zoomera sur la région < 1000 au (carré blanc) et inclura le disque en rotation et les molécules CO et H2.