

## RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PROJET STARLAB:

**CONTEXTE.** Les étoiles de masse comprise entre 0,8 et 8 Msol (désignées par "étoiles de masse faible et intermédiaire" - LIMS - dans ce qui suit) dominent la population stellaire de notre Galaxie, la Voie Lactée. Pendant leur ascension de la branche géante asymptotique (AGB), les LIMS sont le siège d'une riche nucléosynthèse, forgeant principalement du carbone et des éléments plus lourds que le fer par un processus nucléosynthétique appelé "processus s". Comme les processus de mélange amènent ces éléments à la surface des étoiles AGB, la composition de l'enveloppe de ces étoiles est modifiée, et certaines d'entre elles se transforment alors en étoiles carbonées. Lorsque les vents dispersent l'enveloppe de l'étoile AGB, des molécules et des grains de poussière se forment dans une épaisse coquille entourant l'étoile. En se dilatant, la coquille circumstellaire se dilue peu à peu dans le milieu interstellaire où elle libère les produits de la nucléosynthèse stellaire, contribuant ainsi à l'évolution chimique de la Galaxie.

Certaines familles spécifiques de LIMS se trouvent exclusivement parmi les systèmes binaires. L'interaction entre les deux composantes d'un système binaire peut avoir un impact considérable sur la structure interne et la composition chimique de surface, par le truchement de processus de mélange (par exemple, le mélange thermohaline ou celui induit par rotation) et l'échange des produits de nucléosynthèse entre les composantes stellaires.

Bien que l'évolution générale des étoiles soit bien comprise, des incertitudes majeures affectent encore notre compréhension de certains processus physiques et chimiques déterminants. Par exemple, des lacunes majeures subsistent dans la description de la convection et du mélange interne, de la perte de masse, de la formation de poussière et des réactions en phase gazeuse dans les épaisses coquilles circumstellaires et, dans le cas des systèmes binaires, du transfert de masse et de moment angulaire entre les composantes stellaires.

**OBJECTIFS.** Le but de ce projet est d'améliorer notre compréhension de (certains) des processus physiques et chimiques à l'œuvre dans les LIMS. Plus précisément, nous prévoyons

(i) de dériver les abondances de surface dans des LIMS spécifiques et de les confronter aux prévisions de nucléosynthèse. Des progrès sont attendus du fait que nous utiliserons des cibles bien choisies avec des distances connues (comme les étoiles post-AGB dans les Nuages de Magellan, et les étoiles AGB galactiques avec des parallaxes Gaia précises), ce qui nous permettra de les localiser dans le diagramme de Hertzsprung-Russell, facilitant ainsi la confrontation avec les modèles. La détermination de la composition atmosphérique des LIMS évoluées fournit des diagnostics solides sur les processus internes de combustion nucléaire et de mélange en jeu dans l'intérieur de l'étoile. Grâce à la richesse de leur nucléosynthèse, les étoiles AGB et post-AGB sont donc des laboratoires exceptionnels pour tester la robustesse des modèles stellaires.

(ii) d'explorer de nouveaux canaux évolutifs binaires qui pourraient relier des classes de LIMS dans des systèmes binaires (désignés LIMB dans ce qui suit). Des progrès sont attendus grâce la modélisation de processus physiques non traités jusqu'à présent (interaction de la marée avec un disque circumbinaire par exemple permettant d'augmenter l'excentricité de l'orbite), et grâce à la contrainte fournie par le diagnostic-clé que constitue le

diagramme excentricité - période. Ce dernier est obtenu grâce à nos mesures de longue date de la vitesse radiale de classes très diverses de LIMB afin d'obtenir leurs éléments orbitaux. Après 10 ans d'opérations de notre spectrographe HERMES, même les orbites les plus longues sont maintenant disponibles. En fin de compte, ce projet devrait permettre d'évaluer comment les diverses classes de LIMB ainsi que la composition de leur surface s'inscrivent dans un schéma global.

(iii) d'étudier les coquilles circumstellaires autour des LIMS à différentes échelles spatiales en utilisant les données du satellite infrarouge Herschel. Nous aborderons en particulier les questions relatives au comportement de la perte de masse en fonction de la géométrie de la coquille circumstellaire.

**STRATÉGIE.** Notre stratégie est de confronter les prédictions des modèles aux diagnostics observationnels en développant une étroite synergie entre les partenaires du projet. Du côté observationnel, l'équipe dispose de moyens remarquables (Herschel/ESA, PIONIER-VLTI/ESO, HERMES/Mercator/KU Leuven). Ces instruments offrent d'excellentes capacités de haute résolution spectrale (ou d'imagerie), avec une grande sensibilité et une large couverture spectrale. Les données nécessaires sont disponibles, et sont encore loin d'être pleinement exploitées. A l'inverse, les riches possibilités qu'offrent les moyens d'observation actuels ne peuvent être pleinement exploitées que si leur interprétation est basée sur une modélisation théorique de pointe. L'équipe est composée d'experts en méthodes observationnelles et en modélisation théorique. L'ambition de ce projet est d'améliorer leur interaction, afin de générer des avancées significatives dans notre compréhension des LIMS. Les membres de l'équipe sont experts en détermination d'abondance à l'aide des logiciels MARCS et Turbospectrum, en modélisation de l'évolution stellaire et de la nucléosynthèse à l'aide des codes STAREVOL et BINSTAR, et en modélisation du transfert radiatif grâce aux outils tels que RADMC-3D et DUSTY.

L'impact attendu du projet est (i) de fournir de meilleures contraintes d'observation sur les processus de nucléosynthèse et de mélange à l'œuvre dans les LIMS, (ii) de démêler les liens entre les familles spécifiques de LIMS que l'on trouve exclusivement parmi les systèmes binaires, et d'identifier les canaux évolutifs binaires par lesquels ces familles sont formées, et (iii) de mieux caractériser les propriétés de perte de masse des LIMS.

**RÉSULTATS. Objectif (i).** Les abondances d'éléments lourds dans les étoiles de type S ont montré que les modèles actuels d'évolution stellaire prédisent correctement le début de la nucléosynthèse du processus s dans les étoiles AGB et le transport de ces produits de nucléosynthèse vers la surface stellaire. Cependant, ce projet a montré que la limite inférieure de masse pour que cela se produise n'est pas de 1,5  $M_{\odot}$ , comme on le pensait précédemment, mais plutôt de 1  $M_{\odot}$ . Le seuil de luminosité prédit pour le début de l'opération du processus s sépare correctement les étoiles S intrinsèques et extrinsèques (c.-à-d. binaires). Il y a cependant quelques cas mixtes (étoiles S extrinsèques qui sont devenues intrinsèques lorsque la composante secondaire entre à son tour dans la phase AGB) qui ont été découverts dans l'échantillon étudié. Ces cas mixtes (que nous appelons étoiles S "trinsèques") ont été identifiés comme des étoiles binaires riches en Tc et en Nb. Dans la situation habituelle, les étoiles S intrinsèques sont riches en Tc et pauvres en Nb, alors que les étoiles S extrinsèques sont pauvres en Tc et riches en Nb. Une comparaison détaillée entre les abondances observées et prédites révèle que la nucléosynthèse habituelle du processus s reproduit bien les abondances observées dans les étoiles S

intrinsèques. Au contraire, certaines étoiles CEMP (appelées "étoiles CEMP-rs" où CEMP est l'acronyme de "Carbon-Enriched Metal-Poor") montrent des signatures du processus *i* de nucléosynthèse, nécessitant des densités neutroniques intermédiaires entre celles des processus *s* et *r*. En poussant à des valeurs extrêmes les paramètres décrivant le mélange à l'oeuvre dans les étoiles AGB, nos modèles STAREVOL sont capables de reproduire les profils d'abondances observés dans ces étoiles CEMP-rs.

**Objectif (ii).** Grâce à un vaste programme de surveillance de la vitesse radiale au moyen du spectrographe HERMES/Mercator, des diagrammes excentricité - période (*e* - *P*) pour plusieurs familles de LIMB ont pu être obtenus : étoiles naines et géantes à baryum, étoiles sous-géantes et géantes CH, étoiles S extrinsèques, étoiles CEMP, étoiles post-AGB et post-RGB, étoiles RV Tau, étoiles sdB, étoiles centrales de nébuleuses planétaires (CSPN). Parmi celles-ci, les systèmes aux très courtes périodes (quelques jours) se trouvent parmi les étoiles CSPN et les étoiles naines CEMP, et résultent probablement du débordement du lobe de Roche et de l'évolution ultérieure de l'enveloppe commune. Les systèmes aux plus longues périodes (~100 ans) marquent la limite d'un transfert de masse efficace par le vent de l'étoile AGB. Les diagrammes *e* - *P* de ces différentes familles de LIMB sont similaires bien qu'ils ne soient pas totalement identiques. Il y a par exemple des différences étonnantes entre les étoiles post-AGB et les étoiles Ba naines (plusieurs systèmes excentriques de courte période parmi les premiers ne se retrouvent pas parmi les seconds), malgré le fait que les étoiles Ba naines sont censées être les progénitures immédiates des systèmes post-AGB. D'autre part, les systèmes RV Tau semblent curieusement manquer d'orbites avec des périodes inférieures à 700 j, qui sont pourtant fréquentes parmi les systèmes post-AGB, malgré le fait que les systèmes RV Tau peuvent être considérés comme des systèmes post-AGB au sens large. Nous avons réalisé une étude quantitative du lien évolutif entre les étoiles naines à baryum et les étoiles à baryum géantes. Nous en avons conclu que les effets de marée opérant sur la branche des géantes rouges expliquent la présence de systèmes plus excentriques à courtes périodes (< 1000 j) parmi les étoiles naines à baryum. La distribution de masse des compagnons des étoiles à baryum a été obtenue et confirme que ces compagnons sont selon toute vraisemblance des étoiles naines blanches, comme le prévoit le scénario d'évolution binaire.

**Objectif (iii).** Une image de la surface de l'étoile S  $\pi$ 1 Gru a été obtenue grâce à des observations VLTI/PIONIER. Cette image révèle la présence de taches, probablement d'origine convective. Ces inhomogénéités de surface pourraient être à l'origine des asymétries observées dans le vent.

Une liste extensive de raies spectrales moléculaires et atomiques a été construite à partir des spectres Herschel PACS et SPIRE. Celles-ci seront utiles pour diagnostiquer les conditions physiques caractérisant les coquilles circumstellaires d'étoiles AGB.

Nous avons montré que la connaissance de la géométrie de la coquille circumstellaire (c.-à-d. spirale, disque ou sphère) est obligatoire pour dériver leur contenu en poussière de façon précise (c.-à-d. à mieux qu'un facteur 100 sur le rapport masse de gaz / masse de poussières).