Doctorat de l'Université PSL
préparé à l'Observatoire de Paris

AVIS DE SOUTENANCE

Paul HUET

Astronomie et astrophysique

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Accrétion tardive de gaz issu de disques de débris

Soutenance prévue le **29 septembre 2026** à **10h00**

Lieu : Amphithéâtre Evry Schatzman
Amphithéâtre Evry Schatzman Batiment 18, Observatoire de Paris 5 Place Jules Janssen 92195 Meudon https://www.youtube.com/@lira-observatoiredeparis

Composition du jury proposé

M. Quentin KRAL	Astronome adjoint	LIRA-Observatoire de Paris	Directeur de these
M. Jean-Charles AUGEREAU	Astronome	Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble	Rapporteur du jury
M. Clément BARUTEAU	Chargé de recherche	Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie	Rapporteur du jury
Mme Sandrine VINATIER	Directeur de recherche	LIRA-Observatoire de Paris	Membre du jury
M. Benoit TABONE	Chargé de recherche	Institut d'Astrophysique Spatiale	Membre du jury
M. Sean RAYMOND	Directeur de recherche	Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux,	Membre du jury
Mme Héloïse MéHEUT	Directeur de recherche	Laboratoire Lagrange	Membre du jury
M. Tristan GUILLOT	Directeur de recherche	Laboratoire Lagrange	Membre du jury

Mots-clés : Disques de débris,Formation planétaire.,Gaz tardif,Ligne de glace,Atmosphères,

Keywords : Debris discs,Planetary formation,Late gas,Iceline,Atmosphere,

Résumé :
La récente découverte de disques de gaz tardifs existants parfois plusieurs dizaines de millions d'années après la dissipation du disque protoplanétaire bouleverse notre perception de l'évolution des jeunes systèmes stellaires. Pourtant, l'accrétion de ce gaz est encore un phénomène peu étudié alors que les premières estimations suggèrent une accrétion très efficace. Nous proposons donc dans cette thèse de faire une modélisation numérique rigoureuse de l'évolution des atmosphères planétaires durant cette phase d'accrétion de gaz tardif. Grâce à cette modélisation, nous pouvons estimer que les taux d'accrétion sont essentiellement fixés par les propriétés dynamiques du disque de gaz. En adaptant ce modèle d'atmosphère à partir de travaux modélisant l'accrétion dans la phase protoplanétaire, nous y avons également apporté des améliorations. Nous discutons donc des conséquences des hypothèses faites

lors de la construction de ces modèles dans la phase protoplanétaire, que notre nouveau modèle permet de lever. Puisque les taux d'accrétions sont surtout fixés par la dynamique du disque, nous avons donc construit un modèle de production et d'évolution du gaz dans les disques Diffenix qui fonctionne avec une excellente efficacité numérique tout en incluant l'accrétion du gaz sur les planètes. Nous avons ainsi appliqué ce modèle sur le jeune système solaire externe, en nous appuyant sur les différents scénarios envisagés à ce jour tels que le modèle de Nice. Nous démontrons que la présence d'un disque de gaz massif de CO secondaire est envisageable dans un système similaire à ceux décrits par le modèle de Nice. Ce disque de gaz tardif peu expliquer, via l'accrétion de son gaz, l'enrichissement important en carbone observé dans les atmosphères d'Uranus et Neptune. La précision des observations actuelles des rapports [C/H] et [S/H] ne permet pas de fixer de contraintes minimales sur la masse de carbone secondaire accrétée, mais elles sont compatibles cependant avec nos estimations. Ce modèle a potentiellement une portée plus universelle, et pourra être testé plus en avant sur les exoplanètes. Nous avons ensuite généralisé le travail de Kral et al. 2024 mené dans le système solaire portant sur la formation d'un disque secondaire de vapeur d'eau à tous les systèmes extrasolaires. Il s'agit donc de modéliser la formation et l'évolution d'un disque de vapeur d'eau au niveau des (exo)ceintures d'astéroïdes et d'estimer les masses d'eau accrétées sur les planètes internes. Nous avons démontré que la production d'un disque de vapeur d'eau secondaire est presque systématique pour les étoiles G, F et A et possible dans certaines conditions pour les étoiles M. Les masses d'eau accrétées sur une éventuelle planète interne sont également conséquentes, pouvant potentiellement transformer une planète aride en planète océan. Ce modèle est donc en principe universel, la simple présence d'une ceinture d'astéroïdes au niveau de la ligne de glace, favorisée par les modèles de formation planétaire, implique la formation d'un disque de gaz secondaire et l'accrétion de masses d'eau importantes sur les planètes internes. Nous avons enfin estimé les flux lumineux émis par ces disques dans des fréquences observables par ALMA et le JWST afin de préparer de futures observations. Nos résultats sont très encourageants, car ils suggèrent que des détections sont possibles avec ces deux observatoires y compris pour des disques relativement peu massifs. La sensibilité exceptionnelle du JWST permettrait ainsi en principe des détections de disques de vapeur d'eau à plusieurs centaines de parsecs. Cette thèse démontre toute l'importance de l'accrétion de gaz tardif sur des planètes que ce soit dans le système solaire ou sur des exoplanètes. L'accrétion du gaz est très efficace et que la simple présence d'une ceinture au niveau des lignes de glace de CO ou de l'eau est susceptible de changer significativement la composition des atmosphères des (exo)planètes.

Summary :

The relatively recent discovery of so-called late-stage gas discs, which can persist for several tens of millions of years after the dissipation of the protoplanetary disc, has revolutionised our understanding of the evolution of young stellar systems. Yet, the accretion of this gas onto planets remains a poorly studied phenomenon, even though initial estimates suggest that it is extremely efficient. In this thesis, we therefore propose to conduct a rigorous numerical modelling of the evolution of planetary atmospheres during this phase of late-stage gas accretion. Through this modelling, we estimate that accretion rates are primarily determined by the dynamical properties of the gas disc. By adapting this atmospheric model from studies that simulate accretion during the protoplanetary phase, we have also introduced improvements. We thus discuss the consequences of the assumptions made in constructing these protoplanetary models, which our new model allows us to address. Since accretion rates are primarily governed by the disc's dynamics, we also have developed a model for the production and evolution of gas in discs, Diffenix, which operates with excellent numerical efficiency while including gas accretion onto planets. We applied this model to the young outer Solar System, drawing on the various scenarios considered to date, such as the Nice model. We demonstrate that the presence of a massive secondary carbon monoxide gas disc is plausible in a system similar to those described by the Nice model. This late-stage gas disc could, through gas accretion, explain the significant carbon enrichment observed in the atmospheres of Uranus and Neptune. The precision of current observations of [C/H] and [S/H] ratios does not allow us to establish minimal constraints on the mass of accreted secondary carbon, but they are nevertheless consistent with our estimates. This model potentially has a broader, more universal scope and could be further tested on exoplanets. We then generalised the work of Kral et al. 2024, conducted in the Solar System on the formation of a secondary water vapour disc, to all extrasolar systems. This involves modelling the formation and evolution of a water vapour disc at the level of (exo)asteroid belts and estimating the masses of water accreted onto inner planets. We have demonstrated that the production of a secondary water vapour disc is almost systematic for G-, F-, and A-type stars and possible under certain conditions for M-type stars. The masses of water accreted onto any potential inner planet are also substantial, potentially transforming an arid planet into an ocean planet. This model is therefore, in principle, universal: the mere presence of an asteroid belt at the snow line, as favoured by planetary formation models, implies the formation of a secondary gas disc and the accretion of significant masses of water onto inner planets. Finally, we estimated the

luminous fluxes emitted by these discs at frequencies observable by ALMA and the JWST to prepare for future observations. Our results are highly encouraging, as they suggest that detections are possible with both observatories, even for relatively low-mass discs. The exceptional sensitivity of the JWST would, in principle, enable the detection of water vapour discs at distances of several hundred parsecs. This thesis demonstrates the significant importance of late-stage gas accretion onto planets, whether in the Solar System or on exoplanets. Gas accretion is highly efficient, and the mere presence of a belt at the snow lines of CO or water is likely to significantly alter the atmospheric composition of (exo)planets.