

Résumé

Seulement deux décennies se sont écoulées depuis que les premières exoplanètes ont été découvertes, mais nous en connaissons déjà des milliers. Elles montrent une vaste gamme de masses, de rayons et d'orbites. Nos théories de formation et d'évolution planétaire, basées pour la plupart sur le système solaire, sont insuffisantes pour expliquer une telle variété et doivent être étendues à la richesse des voies possibles de formation et d'évolution exoplanétaires. Cependant, ces processus sont encore mal compris.

Les tailles et les masses (donc la densité) sont maintenant disponibles pour environ 1 000 exoplanètes, mais sont insuffisantes pour obtenir une image complète. La composition globale d'une planète est un traceur bien meilleur de sa formation et de son évolution, mais plus difficile d'accès. Pourtant, depuis une quinzaine d'années, une fenêtre sur les intérieurs planétaires et leur chimie est ouverte: l'étude des atmosphères d'exoplanètes.

La composition chimique d'une atmosphère dépend à la fois des processus de formation et d'évolution. L'endroit où la planète s'est formée (à l'intérieur ou à l'extérieur de la ligne des glaces) et le processus de formation détaillé (accrétion nucléée ou instabilité du disque) déterminent l'enrichissement initial en éléments lourds, mieux tracé par la composition de la basse atmosphère. Les processus ultérieurs, tels que l'évaporation atmosphérique dans la haute atmosphère, provoquent un écart par rapport à la composition initiale. Les basse et haute atmosphères doivent être étudiées pour démêler ces effets.

La spectroscopie de transmission, en particulier, offre l'opportunité de sonder des atmosphères au-dessus de 10 bars et jusqu'à l'exosphère, non collisionnelle, où l'évaporation et d'autres processus évolutifs ont lieu. Deux défis majeurs limitent l'efficacité de la spectroscopie de transmission:

1. Les observations des basse et haute atmosphères proviennent de différents instruments, en termes de couverture de longueur d'onde, de puissance de résolution et de sensibilité au continuum planétaire, entravés par les effets de l'atmosphère terrestre pour les instruments terrestres. Ces différences les rendent difficile à combiner.
2. La diffusion par les aérosols peut masquer les caractéristiques spectrales, nous empêchant d'identifier les composants atmosphériques clés, mais biaisent également notre interprétation, conduisant à des conclusions erronées sur l'abondance des constituants atmosphériques.

Au cours de ma thèse, j'ai développé le code PyETA ($\pi\eta$) pour résoudre ces problèmes. $\pi\eta$ est un outil flexible capable de simuler des observations de spectres de transmission de $R \sim 100 - 100\,000$ à haute résolution, sur une large gamme de longueurs d'onde ($0.3 - 2 \mu\text{m}$), depuis le sol ou l'espace.

J'ai comparé $\pi\eta$ en faisant correspondre ses prédictions aux spectres de transmission HARPS optique, terrestre, à haute résolution ($R \sim 100\,000$) des géantes gazeuses chaudes. Dans WASP-49b, j'ai déterminé que les cœurs des raies de sodium sont générés dans la thermosphère, car leur grande intensité nécessite une température atmosphérique supérieure d'environ 2000 K à la température d'équilibre de la planète. Dans HD189733b, j'ai montré qu'une non-détection d'eau avec HARPS est cohérente avec les attentes, et déterminé que le nouveau spectrographe ESPRESSO devrait être capable de révéler de l'eau dans un Jupiter chaud, sans aérosol, avec un seul transit. Exploitant $\pi\eta$, maintenant validé, j'ai combiné pour la première fois des observations spatiales de basse résolution spectrales ($R \sim 100$), prises dans l'optique et le proche infrarouge (NIR) par HST, à des observations à haute résolution spectrale ($R \sim 100\,000$) prises au sol avec HARPS. Combinées, ces données permettent de sonder les basse et haute atmosphères de HD189733b (Pino et al., 2018).

Les résultats obtenus distinctement sur les ensembles de données HST et HARPS sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature (HST: par exemple Pont et al 2013, Sing et al 2016, HARPS: Wyttenbach et al., 2015). Alors que l'ensemble de données HST montre la prévalence des aérosols dans l'atmosphère de la planète, les analyses précédentes des observations HARPS des noyaux du doublet de sodium avaient supposé que celles-ci étaient trop faibles pour affecter leur intensité. Cependant, en tenant compte des contraintes des deux ensembles de données, j'ai montré que, sous cette hypothèse, ils sous-estimaient la température thermosphérique, qui peut atteindre 10 000 K à $0.25 R_p$ (conformément aux modèles et aux observations dans l'UV lointain).

En plus d'avoir un impact sur l'interprétation des raies atomiques, les aérosols constituent un facteur limitant pour la spectroscopie de transmission puisqu'ils occultent les caractéristiques spectrales telles que les bandes moléculaires. Si elles ne sont pas occultées, les molécules peuvent être révélées dans les spectres de transmission à haute résolution à partir de leur fonction de corrélation croisée (CCF). L'eau a plusieurs bandes d'absorption bien séparées, avec une intensité croissante de l'optique au proche infrarouge. D'autre part, l'intensité de la diffusion par les aérosols est une fonction décroissante, ou constante, de la longueur d'onde. Par conséquent, en présence d'aérosols, les bandes d'absorption moléculaire plus bleues disparaissent plus rapidement que les bandes plus rouges.

La différence dans le contraste du CCF des différentes bandes est donc une mesure de la hauteur des aérosols dans l'atmosphère. En simulant une grille de spectres de transmission à haute résolution de Jupiter chauds avec et sans aérosols, j'ai trouvé que la différence de contraste entre les CCF de deux bandes peut atteindre 100 ppm, ce qui pourrait être facilement détectable avec les spectrographes stabilisés à haute résolution actuels ou à venir. une large gamme spectrale, comme ESPRESSO, CARMENES, HARPS-N + GIANO, HARPS + NIRPS, CRIRES + ou SPIRou.

Les aérosols n'influent toutefois pas sur nos résultats dans WASP-43b, où une réduction préliminaire de 3 spectres de transmission HARPS-N montrent une signature profonde du sodium qui n'a pu être mise en évidence que si le sodium se trouve très haut dans l'atmosphère, éventuellement dans l'exosphère. L'étoile hôte est faible et l'élimination de la correction tellurique n'est donc pas optimale. Pour cette raison, j'ai demandé et obtenu des données HST STIS G750M à résolution moyenne ($R \sim 5\,000$) pour confirmer cette détection sans précédent. La réduction des données est en cours, et les outils développés dans cette thèse permettront la combinaison de cet ensemble de données avec des données au sol antérieures.

En résumé, cette thèse a permis de caractériser les atmosphères planétaires avec une combinaison de différentes techniques, capables de sonder de la basse à la haute atmosphère. La question des aérosols est également abordée, en fournissant une méthode alternative et innovante pour les diagnostiquer. Les observations de JWST et des ELT fourniront des idées clés sur la formation de la planète et les théories de l'évolution, et pourraient grandement bénéficier du développement des idées présentées dans cette thèse.