

# Observations de TOI-270 d - JWST

<https://arxiv.org/abs/2403.03325>

arXiv:2403.03325 [astro-ph.EP] <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.03325> **Extraits**

**Bjorn Benneke, Pierre-Alexis Roy, Louis-Philippe Coulombe, Michael Radica, Caroline Piaulet, Eva-Maria Ahrer, Raymond Pierrehumbert, Joshua Krissansen-Totton, Hilke E. Schlichting, Renyu Hu, Jeehyun Yang, Duncan Christie, Daniel Thornngren, Edward D. Young, Stefan Pelletier, Heather A. Knutson, Yamila Miguel, Thomas M. Evans-Soma, Caroline Dorn, Anna Gagnebin, Jonathan J. Fortney, Thaddeus Komacek, Ryan MacDonald, Eshan Raul, Ryan Cloutier, Lorena Acuna, David Lafreniere, Charles Cadieux, Rene Doyon, Luis Welbanks, and Romain Allart.**

## **JWST Reveals CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>O in a Metal-rich Miscible Atmosphere on a Two-Earth-Radius Exoplanet.**

**Abstract.** Even though sub-Neptunes likely represent the most common outcome of planet formation, their natures remain poorly understood. In particular, planets near 1.5–2.5R<sub>⊕</sub> often have bulk densities that can be explained equally well with widely different compositions and interior structures, resulting in grossly divergent implications for their formation and potential habitability. Here, we present the full 0.6–5.2 μm JWST IRISS / SOSS + NIRSpec / G395H transmission spectrum of the 2.2 R<sub>⊕</sub> planet TOI-270 d (4.78 M<sub>⊕</sub>, T<sub>eq</sub>=350–380 K), delivering unprecedented sensitivity for atmospheric characterization in the sub-Neptune regime. We detect five vibrational bands of CH<sub>4</sub> at 1.15, 1.4, 1.7, 2.3, and 3.3 μm (9.4σ), the signature of CO<sub>2</sub> at 4.3 μm (4.8σ), water vapor (2.5σ), and potential signatures of SO<sub>2</sub> at 4.0 μm and CS<sub>2</sub> at 4.6 μm. Intriguingly, we find an overall highly metal-rich atmosphere, with a mean molecular weight of 5.47 (+1.25, –1.14). We infer an atmospheric metal mass fraction of 58 (+8, –12) % and a C/O of 0.47(+0.16, –0.19), indicating that approximately half the mass of the outer envelope is in high-molecular-weight volatiles (H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) rather than H<sub>2</sub>/He. We introduce a sub-Neptune classification scheme and identify TOI-270d as a "miscible-envelope sub-Neptune" in which H<sub>2</sub>/He is well-mixed with the high-molecular-weight volatiles in a miscible supercritical metal-rich envelope. For a fully miscible envelope, we conclude that TOI-270d's interior is 90+3–4wt% rock/iron, indicating that it formed as a rocky planet that accreted a few wt % of H<sub>2</sub>/He, with the overall envelope metal content explained by magma-ocean/envelope reactions without the need for significant ice accretion. TOI-270d may well be an archetype of the overall population of sub-Neptunes.

**Résumé.** Même si les sub-Neptunes représentent probablement le résultat le plus courant de la formation des planètes, leurs natures restent mal connues. En particulier, les planètes proches de 1,5 - 2,5 R<sub>⊕</sub>\* ont souvent des densités apparentes qui peuvent s'expliquer également par des compositions et des structures intérieures très différentes, ce qui a des implications extrêmement divergentes pour leur formation et leur habitabilité potentielle. Nous présentons ici l'intégralité des spectres de transmission JWST NIRISS / SOSS + NIRSpec / G395H de 0,6 à 5,2 μm de la planète 2,2 R<sub>⊕</sub> TOI-270 d (4,78 M<sub>⊕</sub>\*, T<sub>eq</sub> = 350–380 K), offrant une sensibilité sans précédent pour la caractérisation atmosphérique dans le régime sous-Neptune.

**Nous détectons cinq bandes vibratoires de CH<sub>4</sub> à 1,15, 1,4, 1,7, 2,3 et 3,3 μm (9,4σ), la signature du CO<sub>2</sub> à 4,3 μm (4,8σ), la vapeur d'eau (2,5σ) et les signatures potentielles du SO<sub>2</sub> à 4,0 μm et CS<sub>2</sub> à 4,6 μm.**

Curieusement, nous trouvons une atmosphère globalement très riche en métaux, avec un poids moléculaire moyen de 5,47 (+1,25, –1,14). Nous déduisons une fraction massique de métal atmosphérique de 58 (+8, –12) % et un C/O de 0,47 (+0,16, –0,19), indiquant qu'environ la moitié de la masse de l'enveloppe externe est constituée de volatils de poids moléculaire élevé (H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) plutôt que H<sub>2</sub>/He. Nous introduisons un schéma de classification sous-Neptune et identifions TOI-270d comme un « sous-Neptune à enveloppe miscible » dans lequel H<sub>2</sub>/He est bien mélangé avec les volatils de poids moléculaire élevé dans une enveloppe riche en métaux supercritiques miscibles. Pour une enveloppe entièrement miscible, nous concluons que l'intérieur du TOI-270d est composé de 90 (+3, –4) % en poids de roche/fer, ce qui indique qu'il s'est formé comme une planète rocheuse qui a accumulé quelques % en poids de H<sub>2</sub>/He, la teneur globale en métal de l'enveloppe étant expliquée par des réactions magma-océan/enveloppe sans nécessiter une accumulation significative de glace. TOI-270d pourrait bien être un archétype de la population globale des sous-Neptunes.

\* R<sub>⊕</sub> et M<sub>⊕</sub> : rayon et masse terrestres

Copie partielle de la figure 3

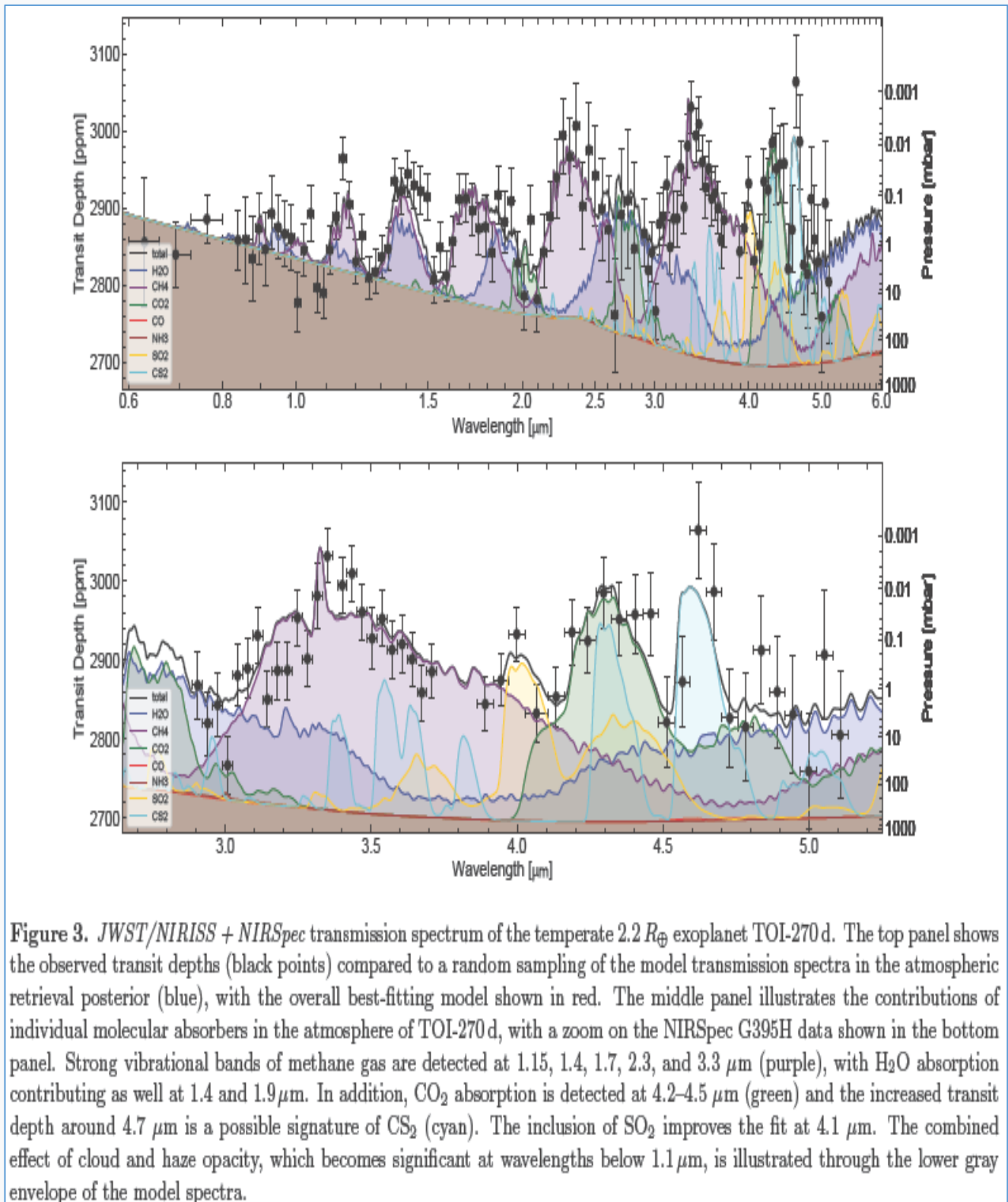


Figure 3. JWST/NIRISS + NIRSpec transmission spectrum of the temperate  $2.2 R_{\oplus}$  exoplanet TOI-270 d. The top panel shows the observed transit depths (black points) compared to a random sampling of the model transmission spectra in the atmospheric retrieval posterior (blue), with the overall best-fitting model shown in red. The middle panel illustrates the contributions of individual molecular absorbers in the atmosphere of TOI-270 d, with a zoom on the NIRSpec G395H data shown in the bottom panel. Strong vibrational bands of methane gas are detected at 1.15, 1.4, 1.7, 2.3, and 3.3  $\mu\text{m}$  (purple), with  $\text{H}_2\text{O}$  absorption contributing as well at 1.4 and 1.9  $\mu\text{m}$ . In addition,  $\text{CO}_2$  absorption is detected at 4.2–4.5  $\mu\text{m}$  (green) and the increased transit depth around 4.7  $\mu\text{m}$  is a possible signature of  $\text{CS}_2$  (cyan). The inclusion of  $\text{SO}_2$  improves the fit at 4.1  $\mu\text{m}$ . The combined effect of cloud and haze opacity, which becomes significant at wavelengths below 1.1  $\mu\text{m}$ , is illustrated through the lower gray envelope of the model spectra.

Traduction partielle

Figure 3. Spectre de transmission JWST/NIRISS + NIRSpec de l'exoplanète tempérée  $2.2R_{\oplus}$  TOI-270d. [...]

Le graphique [...] illustre les contributions des absorbeurs moléculaires individuels dans l'atmosphère de TOI-270d, avec un zoom sur les données NIR Spec G395H présentées sur le graphique inférieur. De fortes bandes vibratoires de **méthane** sont détectées à 1,15, 1,4, 1,7, 2,3 et 3,3  $\mu\text{m}$  (violet), avec absorption par  **$\text{H}_2\text{O}$**  contribuant également à 1,4 et 1,9  $\mu\text{m}$ . De plus, l'absorption du  **$\text{CO}_2$**  est détectée entre 4,2 et 4,5  $\mu\text{m}$  (vert) et l'augmentation du transit d'une profondeur d'environ 4,7  $\mu\text{m}$  est une signature possible de  **$\text{CS}_2$**  (cyan). L'inclusion de  **$\text{SO}_2$**  améliore l'ajustement à 4,1  $\mu\text{m}$ . [...]