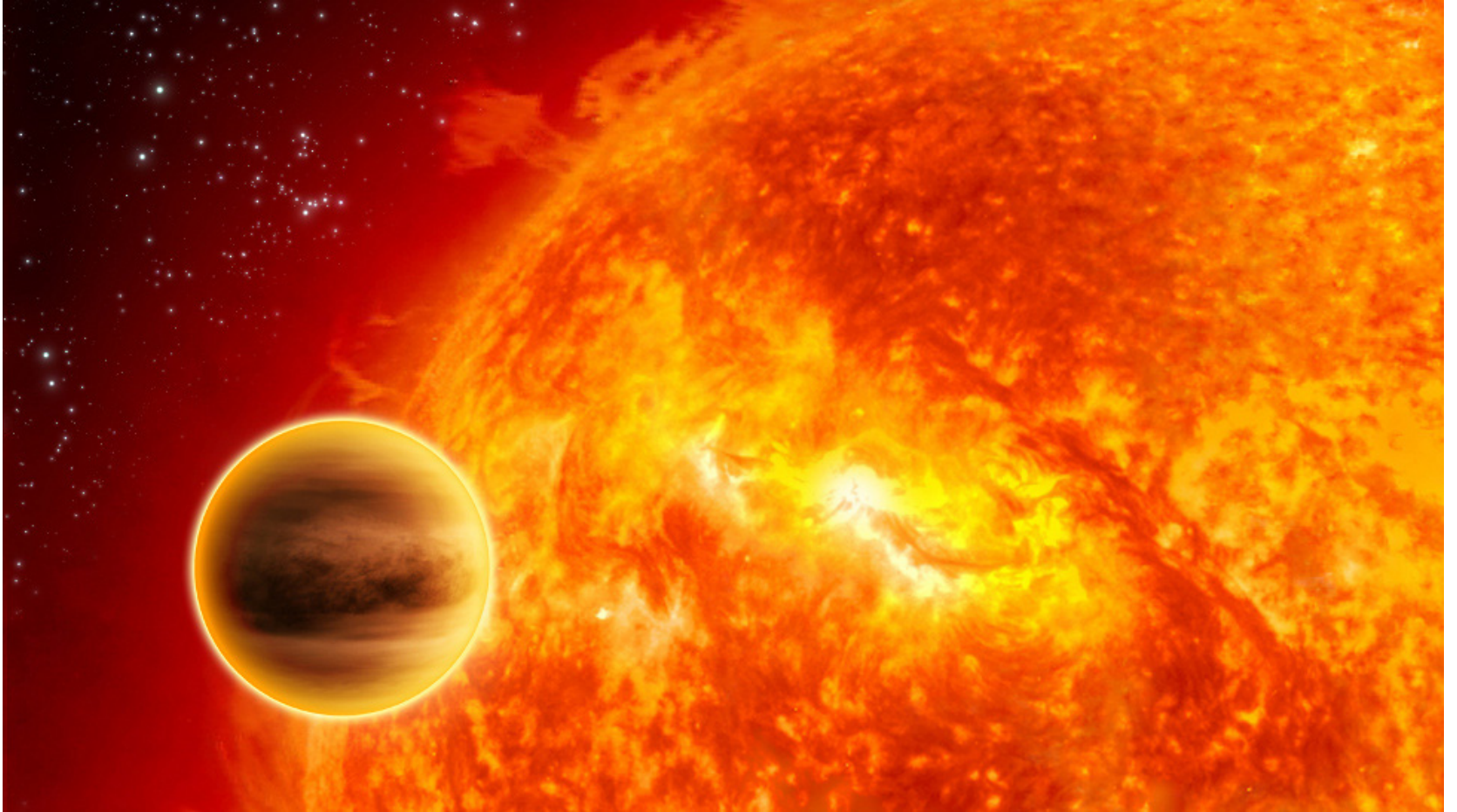


## Coup de projecteur sur les Jupiter chauds

30/01/17

Géantes, massives et orbitant tout près de leur étoile. De toutes les exoplanètes découvertes à ce jour, les Jupiter chauds sont les plus faciles à détecter et à observer. Si la vie y est impossible, elles n'en restent pas moins fascinantes, tant pour leurs milieux extrêmes que pour leurs origines aussi inconnues qu'intrigantes. Au fur et à mesure des études, le voile se lève sur ces objets réunis derrière une série de paramètres communs, et qui semblent aujourd'hui offrir un éventail de plus en plus large de profils. À la croisée des campagnes internationales de détection (WASP, TRAPPIST) et de caractérisation de nouvelles planètes et de programmes d'étude atmosphérique, Laetitia Delrez, chercheuse au Laboratoire sur les Origines en Cosmologie et Astrophysique de l'Université de Liège, actuellement en post-doctorat à Cambridge, en dresse des portraits soignés, récoltés au cours de quatre années. Une thèse(1) récemment défendue et couronnée du prestigieux prix de la Fondation Gruber, décerné chaque année par l'Union astronomique internationale (IAU).

En vingt ans, l'exoplanétologie a parcouru un chemin pour le moins remarquable. D'une planète découverte en 1995, elles sont aujourd'hui des milliers à être passées au crible des télescopes du monde entier. Particulièrement à la suite d'intenses programmes de recherche jusque dans les coins les plus reculés du ciel. Des observations encourageantes -et des études statistiques !- qui poussent les astrophysiciens à dire que presque chaque étoile accueillerait un système planétaire. Ces statistiques portent à la centaine de milliards le nombre de planètes pour notre seule galaxie. Bien que l'état des connaissances de ces planètes évolue à grande vitesse, bon nombre de questions et d'incertitudes demeurent. Il faut bien avouer que les dizaines, et plus souvent les centaines d'années lumières qui nous en séparent rendent leur observation difficile. Évidemment, les évolutions dans ce domaine traduisent au final une même grande motivation, épingler des planètes aux conditions suffisamment clémentes pour accueillir la vie et sonder leur atmosphère à la recherche d'éventuels biomarqueurs (eau, dioxyde de carbone, ozone, etc.). Les meilleures candidates sont les planètes telluriques orbitant dans la zone habitable de leur étoile. Mais hormis pour quelques prétendantes plus enclines à dévoiler leurs secrets les plus intimes (lire à ce sujet [Un trio de terres à 40 années-lumière ?](#)), déterminer avec précision les caractéristiques de ces petites planètes reste actuellement à la limite du possible.



*Vue d'artiste d'un Jupiter chaud, une planète géante gazeuse orbitant très près de son étoile.  
Credit: NASA*

### Approcher les conditions extrêmes des Jupiter Chauds

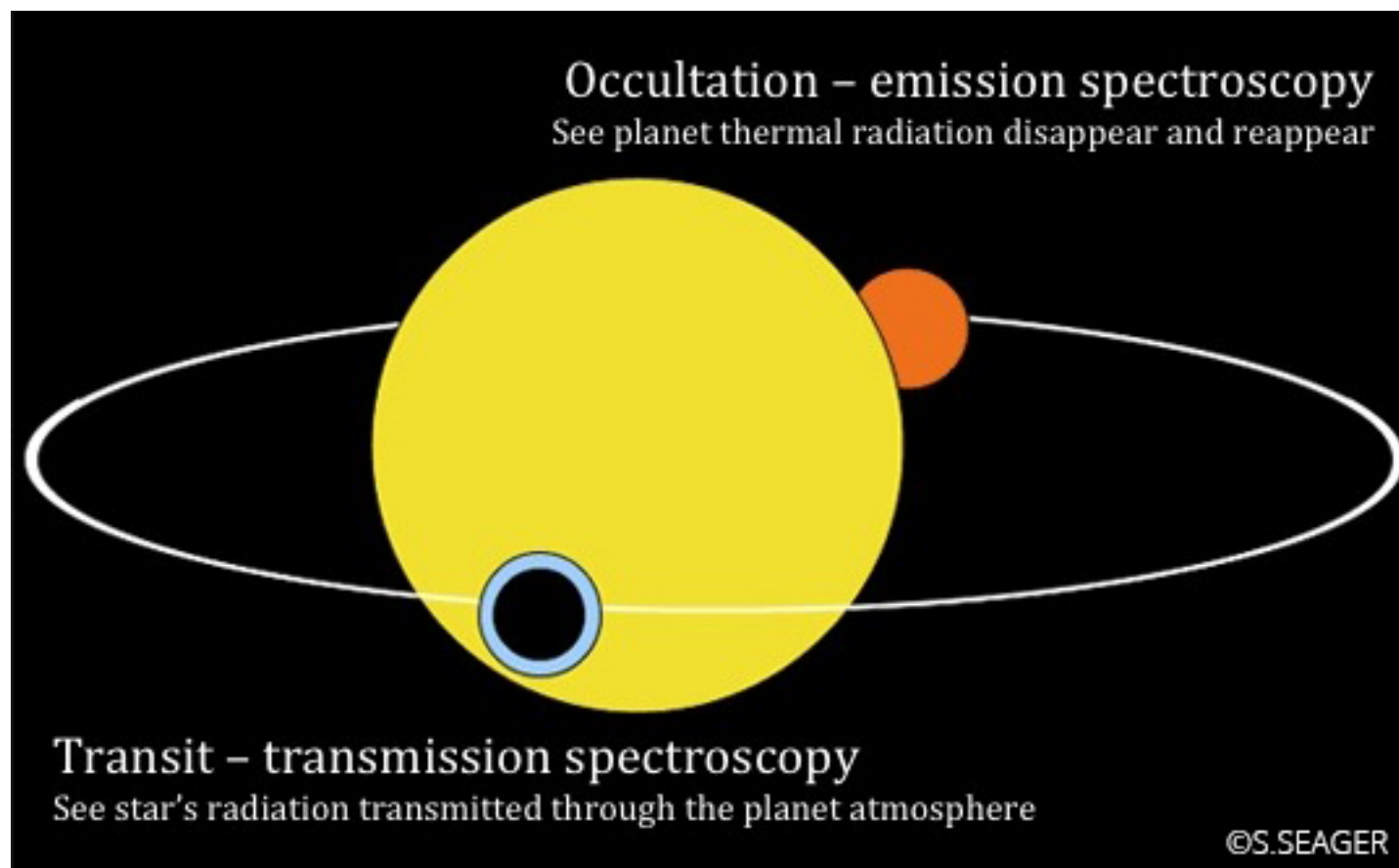
À côté de ces cibles privilégiées mais discrètes, il y a les géantes gazeuses, et plus particulièrement celles qui orbitent près de leur étoile (plus près que Mercure n'orbite autour du Soleil). Grandes, massives, et orbitant leur étoile en quelques jours seulement, ces planètes regroupées sous le nom générique de Jupiter chauds se révèlent bien plus bavardes. Elles sont effectivement les plus faciles à observer, tant par la méthode des **vitesse radiales** que par celle des **transits**. Ces planètes permettent non seulement d'en apprendre beaucoup sur la physique des systèmes planétaires de notre galaxie, mais aussi de calibrer et d'améliorer nos méthodes et nos outils actuels. Et ce n'est pas tout. « *Les Jupiter chauds sont en eux-mêmes des objets fascinants pour leurs conditions extrêmes*, commente **Laetitia Delrez**, astrophysicienne au **Laboratoire sur les Origines en Cosmologie et Astrophysique** de l'Université de Liège, actuellement en postdoctorat à Cambridge. *Ces planètes orbitent autour de leur étoile en quelques jours, parfois moins (lire à ce sujet Drame exoplanétaire : une planète s'effondre sur son étoile). Cette proximité génère des effets de marée considérables, qui vont les déformer et les conduire dans la majorité des cas à se rapprocher de leur étoile, jusqu'à ce qu'elles atteignent, dans plusieurs dizaines ou centaines de millions d'années, la **limite de Roche**,*

*et qu'elles se désagrègent. Elles sont aussi soumises à de fortes irradiations, jusqu'à plusieurs milliers de fois plus importantes que la Terre. La température en surface peut atteindre plus de deux mille **Kelvins**. Elles sont en **rotation synchrone** et présentent donc un côté jour et un côté nuit permanents. Ce phénomène induit des contrastes de températures importants, à l'origine de vents supersoniques. Des vents qui jouent un rôle dans la circulation atmosphérique et dans la redistribution de chaleur entre les deux hémisphères. »*

Si elles ont des similitudes, les Jupiter chauds montrent aussi des profils variés, notamment au niveau de leurs masses et rayons, et donc de leurs densités. Certaines planètes ont une densité élevée, c'est-à-dire un petit rayon compte tenu de leur grande masse et de leur irradiation. Ces planètes contiendraient une quantité importante d'éléments lourds (roches, glaces) qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de fois la masse de la Terre. A l'inverse, d'autres ont une densité très faible, jusqu'à dix fois plus petite que celle de notre Jupiter. Ces planètes sont aussi généralement celles qui sont le plus fortement irradiées et donc les plus chaudes. Certains Jupiters chauds, moins massifs, se rapprochent du profil de Saturne là où d'autres ont une masse jusqu'à 13 fois supérieure à celle de Jupiter, etc. En définitive, l'appellation regroupe des planètes aux caractéristiques assez diverses, dans laquelle il n'est pas inutile de mettre un peu d'ordre. C'est précisément ce à quoi s'est attelée Laetitia Delrez pendant quatre années. La jeune astrophysicienne vient de défendre une thèse sous la direction de **Michaël Gillon**, dans laquelle elle dresse un impressionnant état de la question. Ses contributions à l'exoplanétologie sont variées, et vont de la codécouverte de nouvelles planètes et leur caractérisation à l'étude de certaines de leurs atmosphères. De vastes observations menées de front au sein de plusieurs programmes de recherches comme WASP et TRAPPIST.

### **L'hypothèse d'une longue migration**

Les Jupiter chauds étonnent, et leur proximité à leur étoile encore plus. Il est en effet pratiquement impensable que, lors de leur formation, il y ait eu suffisamment de matière si proche de l'étoile pour former une géante gazeuse. Selon toute vraisemblance, elles ont donc dû se former dans la périphérie de leur système, au-delà de **la ligne des glaces**. « *Une fois formées, ces géantes auraient été poussées à migrer vers l'intérieur du système, raconte Laetitia Delrez. Cette cause inconnue fait l'objet de grands débats. La principale hypothèse serait une interaction gravitationnelle entre la planète et le disque de matière, qui orbite autour de l'étoile au moment de sa formation. La planète aurait pu aussi interagir avec d'autres planètes formées au même moment, ou migrer sous l'influence d'une autre étoile...* » Ce qu'il y a d'intéressant dans ces hypothèses de migration, c'est que dans notre propre système orbitent entre le soleil et Jupiter quatre planètes telluriques, dont la nôtre. Si les systèmes abritant un Jupiter chaud avaient compté dans leurs rangs une planète similaire à la nôtre, il est fort probable qu'en migrant, la géante gazeuse l'aurait éjectée ou aurait à tout le moins fortement perturbé son orbite. « *C'est l'une des raisons pour lesquelles nous continuons de chercher à comprendre comment ces planètes ont évolué et pourquoi notre Jupiter n'a, fort heureusement pour nous, pas migré vers le soleil après sa formation.* »



*Schéma illustrant les deux méthodes principales utilisées pour étudier les atmosphères d'exoplanètes en transit.*

### **WASP et TRAPPIST, une fructueuse collaboration**

Depuis 2010, **TRAPPIST**, le télescope de l'ULg basé à la Silla au Chili, cumule les programmes de détection et d'étude d'exoplanètes et de comètes et astéroïdes du Système solaire (Lire notamment **Des astrophysiciens liégeois au septième ciel**). Il permet notamment une étroite collaboration avec WASP, un programme anglais de détection de Jupiter chauds en transit. Collaboration qu'assure Laetitia Delrez durant sa thèse. La mission de **WASP** est de scruter depuis la Terre la quasi-totalité du ciel à la recherche de transits planétaires. Leurs outils brassent large, mais sont de très basse résolution. Il leur arrive même de mélanger plusieurs étoiles en un seul signal lumineux. S'ils observent un transit, ils n'ont pas les outils pour déterminer laquelle des étoiles observées est éclipsée. C'est là que TRAPPIST intervient. « *Une fois que WASP a recueilli une liste de candidats, explique la jeune chercheuse, nous en recevons les coordonnées, et nous les observons avec une plus grande précision. Selon les courbes de lumière que nous recueillons lors des transits, la forme du signal, sa profondeur, nous pouvons alors déterminer si le signal est bien celui d'une planète ou non. Une grande partie de ma thèse a été d'observer ces candidats, et de commencer à contraindre les paramètres du système dès que nous avons une planète.* » Depuis le début de cette fructueuse collaboration, 105 planètes sur 550 candidats ont été débusquées. À la source des détections, Laetitia Delrez était aux premières loges pour observer les planètes fraîchement découvertes. Elle pouvait alors faire son marché pour un deuxième volet encore plus épineux, l'étude de propriétés atmosphériques.

## La prouesse des études atmosphériques

De toutes les grandes caractéristiques à contraindre sur une exoplanète, les données relatives à l'atmosphère (sa composition chimique ou la distribution de température en fonction de l'altitude) comptent parmi les plus compliquées à obtenir. Là où de petits télescopes peuvent, dans certaines conditions, repérer une planète tellurique à plusieurs dizaines d'années lumières et permettre de déterminer par exemple son rayon, il faut recourir aux outils les plus précis pour étudier l'atmosphère de ces mondes lointains. Une fois de plus, les Jupiter chauds, pourvus d'une atmosphère plus étendue et plus chaude que les planètes telluriques tempérées, se prêtent plus volontiers à ce type d'étude.

Deux méthodes sont principalement utilisées. La première est la spectroscopie de transmission. *« Lors d'un transit, une partie de la lumière de l'étoile passe au travers de l'atmosphère de la planète. L'atmosphère agit donc comme un filtre. Or, chaque élément gazeux absorbe certaines longueurs d'onde de la lumière. C'est une signature chimique. Selon la composition de cette atmosphère, la lumière va donc être plus ou moins absorbée à différentes longueurs d'onde. Quand on observe des transits à ces différentes longueurs d'onde, on peut dès lors chercher des variations dans la profondeur du transit et recréer ce qu'on appelle le spectre de transmission de la planète, qui livre sa composition atmosphérique chimique. »*

La deuxième grande méthode utilisée est la spectroscopie d'émission. Il s'agit d'une mesure de la variation de la lumière au moment de l'occultation, quand la planète passe derrière son étoile. Peu avant et peu après l'occultation, il est possible d'observer la lumière émise par le côté jour de la planète. Pendant l'occultation, la planète est cachée par l'étoile qui bloque donc la lumière émise par la planète. En observant des occultations à différentes longueurs d'onde dans le domaine de l'infrarouge, il est possible de déterminer la structure thermique de l'atmosphère. Comment ? Toujours parce que, selon la température, le spectre lumineux prendra des formes différentes. *« En occultation, on observe la lumière émise par la planète de son côté jour. Selon la présence des composés atmosphériques qui bloquent telle ou telle longueur d'onde, on pourra observer l'atmosphère plus ou moins profondément. Aux longueurs d'onde où le gaz absorbe peu, on pourra sonder les couches profondes de l'atmosphère. Or l'émission thermique est proportionnelle à la température de l'atmosphère aux endroits sondés. En comparant les mesures à différentes longueurs d'ondes, on finit par pouvoir cartographier la distribution verticale de température de l'atmosphère et voir par exemple si elle augmente ou si elle diminue avec l'altitude. »* Jusqu'il y a peu, beaucoup pensaient effectivement qu'une inversion de température était monnaie courante dans les atmosphères de Jupiter chauds. Qu'il y avait une couche dans l'atmosphère où la température augmentait avec l'altitude (comme la stratosphère de la Terre). Or, les dernières observations tendent à montrer la situation inverse. À l'exception de l'une ou l'autre candidate, la température resterait constante, ou dans certains cas, diminuerait avec l'altitude. L'inversion thermique serait donc un phénomène marginal dans les atmosphères de Jupiter chauds.

## Choisir les meilleures cibles...

Parmi les planètes codécouvertes, Laetitia Delrez s'est vue confier la charge de publier les données récoltées pour un certain nombre d'entre elles. Si leur nom manque d'exotisme (WASP-68 b, WASP-73 b, WASP-88 b, WASP-121 b,...), ces découvertes ont chaque fois suscité un grand engouement pour l'équipe. *« Pour ces planètes, nous avons calculé la masse et le rayon, ce qui nous permettait d'en déduire la densité et d'avoir une idée de leur composition. Nous recensons également les paramètres orbitaux de base, leur distance par rapport à la Terre... Parmi ces nouvelles planètes, je relevais ensuite les plus favorables*

*pour une étude atmosphérique. » Les planètes ayant le profil le plus séduisant étaient soit très chaudes avec des périodes orbitales très courtes, soit avaient une densité relativement faible. C'était le cas de WASP-49b, WASP-80b et WASP-103 b. « Plus la densité de la planète est élevée, plus elle est compacte, et moins l'atmosphère est étendue. À l'inverse, une planète à faible densité témoigne d'une atmosphère plus diluée, ce qui est le cas de WASP-49 b et WASP-80 b. Or, plus cette atmosphère est étendue, plus les signaux chimiques attendus par spectroscopie de transmission seront intenses et facilement observables. WASP-103 b, quant à elle, nous intéressait pour une autre caractéristique. Elle orbite autour de son étoile en seulement 22 heures. Ce qui en fait une planète très chaude, de plus de 2000 K à sa surface du côté jour. L'émission thermique est donc relativement importante, ce qui facilite les mesures de son occultation. »*



### ... Et choisir les bons outils

Une fois les premières caractéristiques des planètes déterminées et les plus beaux profils sélectionnés, l'astrophysicienne pouvait demander du temps d'observation sur de plus grands télescopes. « Nous avons notamment obtenu du temps sur un des télescopes du VLT, au Chili, dont le miroir primaire fait 8 mètres de diamètre. Ce télescope est pourvu d'un spectrographe, FORS2, qui permet de décomposer la lumière en provenance de l'étoile à différentes longueurs d'onde dans le visible. Nous pouvions alors observer avec une bonne précision des courbes de lumière de transit à différentes longueurs d'onde simultanément. Pour WASP-49 b, nous n'avons pas observé de variation de profondeur du transit avec la longueur d'onde. Nous avons un spectre de transmission plat, ce qui signifie qu'on ne distinguait aucune signature de composants atmosphériques, ce qui peut donc sembler frustrant. C'est en réalité une propriété assez fréquente chez les Jupiter chauds. On pense que les atmosphères de ces planètes contiennent des nuages à haute altitude qui cachent les signatures spectrales des composants atmosphériques. Mais pour d'autres, on observe des atmosphères claires, qui montrent des signatures atmosphériques assez nettes. La vapeur d'eau, par exemple, a été détectée dans plusieurs atmosphères de Jupiter chauds. Toutes ces observations créent des dynamiques palpitantes. Par exemple, il sera intéressant de comprendre pourquoi nous observons sur certaines planètes des formations de nuages, et pas sur d'autres. Quelle est la composition de ces nuages ? Quel rôle joue la température dans leur formation ? Pour comprendre la physique atmosphérique de ces

*planètes, on doit donc continuer de récolter ce type de données, et de les modéliser pour contraindre les propriétés atmosphériques au mieux possible. »*

De prochains instruments comme le **JWST** et des programmes fraîchement lancés comme **SPECULOOS** offrent un avenir plein de belles promesses. Les méthodologies mises en place pour étudier les atmosphères de Jupiter chauds pourront prochainement être appliquées aux planètes telluriques et permettre d'avancer d'un grand pas dans la quête d'environnements habitables. Les études atmosphériques du système planétaire TRAPPIST-1 ont déjà débuté (Lire **Les exoplanètes orbitant autour de l'étoile TRAPPIST-1 livrent d'autres secrets**). Quant au JWST, il pourra, depuis l'espace, observer avec une plus grande précision encore différents systèmes planétaires de la galaxie.

---

(1) Delrez L., *Detection and characterization of transiting hot Jupiters*, Sept. 2016.