

BRAIN-be 2.0 - B2/212/P1/PORTAL PhOtotrophie sur des planètes Rocheuses habiTAbles

Introduction. Le rayonnement stellaire est une source efficace et illimitée d'énergie, abondamment utilisée par la vie et à la base des réseaux trophiques sur Terre. Il est donc possible que la lumière d'autres étoiles puisse être utilisée par d'autres formes de vie ailleurs dans l'Univers. Parmi les milliers d'exoplanètes découvertes à ce jour, quelques douzaines seraient potentiellement habitables, et leurs compositions atmosphériques pourront bientôt être décrites grâce aux nouveaux télescopes. L'évaluation approfondie de l'habitabilité des systèmes planétaires autour d'étoiles naines de faible masse est donc essentielle pour la compréhension de l'universalité et des limites de la vie. Puisque le spectre lumineux de ces étoiles émet surtout dans l'infra-rouge, une vie phototrophe à la surface de ces planètes devrait développer des stratégies pour utiliser ces photons tout en se protégeant des très puissants rayonnements dans l'ultraviolet extrême (XUV) et des vents stellaires. Sur Terre, les organismes phototropes ont développé des mécanismes pour capturer les photons dans le visible, mais aussi dans l'infra-rouge, et pour se protéger des UV. La phototrophie est apparue il y a plus de 3.4 Ga sous une atmosphère anoxique et sans protection d'ozone contre les radiations UV. Vers 2.4 Ga, la photosynthèse oxygénique a drastiquement modifié la composition chimique de l'atmosphère et des océans, et a contribué à la diversification et la complexification de la vie (eucaryote). La phototrophie peut donc impacter l'évolution de la vie et des planètes.

Objectifs. Les objectifs de ce projet sont (1) de déterminer les caractéristiques des conditions physiques et d'irradiation à la surface des planètes dans la zone habitable de l'étoile naine proche TRAPPIST-1 à partir de données observationnelles et de modélisation théorique, et (2) d'investiguer dans ces conditions la possibilité de phototrophie dans l'infra-rouge, et la détectabilité de ces signatures dans des échantillons de la Terre précambrienne et d'environnements extrêmes modernes, dans des conditions exoplanétaires simulées dans un nouveau "biodome TRAPPIST", et sur des planètes en orbite autour de TRAPPIST-1.

Méthodologie. PORTAL est multidisciplinaire et combine des expertises en astrophysique, géophysique interne, géologie, paléobiologie, et microbiologie. WP1-5 (habitabilité des exoplanètes TRAPPIST-1), WP6 (photosynthèse dans l'IR sur la Terre moderne), WP7 (photosynthèse sur la Terre précambrienne) ont été développés en parallèle et en synergie pour fournir les données pour WP 8 (TRAPPIST biodome) and WP9 (possibilité de phototrophie sur planètes rocheruses habitables autour d'étoiles de très petite masse).

Résultats. Le WP1 apporte de nouvelles contraintes sur l'environnement stellaire de haute énergie qui influe sur l'échappement atmosphérique et la photochimie des planètes de TRAPPIST-1. Cette étude met en évidence diverses propriétés de l'étoile TRAPPIST-1, telles que des mesures précises de sa luminosité, de sa température et de sa métallicité, ainsi que des caractéristiques photosphériques et chromosphériques. Elle révèle également une fréquence élevée de micro-éruptions ($\sim 10^{29}$ erg/éruption) et une période de rotation d'environ 3,3 jours. Elle confirme par ailleurs une activité magnétique significative et une variabilité à court terme, pertinentes pour son émission de photons et de protons. Ce travail montre également que TRAPPIST-1 présente des signatures de gravité intermédiaire malgré son âge avancé, reflétant l'influence de l'activité magnétique et d'autres propriétés stellaires non résolues, qui peuvent avoir des conséquences directes sur la spectroscopie de transmission planétaire. Enfin, cette étude a permis d'élaborer de nouveaux protocoles et

méthodologies pour évaluer la contamination stellaire et caractériser le comportement radiatif des naines ultra-froides actives. Dans WP2, les modèles atmosphériques avec des pressions de surface \geq 1 bar et des effets de serre importants suggèrent que TRAPPIST-1 b est peu susceptible de posséder une atmosphère substantielle, tandis que TRAPPIST-1 c pourrait conserver une atmosphère ténue, pauvre en effet de serre et dominée par l'O₂, ou être également dépourvu d'atmosphère avec une surface plus réfléchissante. Ces résultats suggèrent des trajectoires évolutives ou des processus de perte atmosphérique divergents malgré des compositions similaires. Ces mesures contraignent fortement la rétention d'atmosphère dans le système TRAPPIST-1 interne.

Dans le WP3, la possibilité que les planètes de TRAPPIST-1 puissent former et maintenir une atmosphère par dégazage de composés volatils depuis leur intérieur est étudiée. Ce processus est crucial pour l'habitabilité et est contrôlé par la structure interne, la composition et l'évolution thermique des planètes, fortement influencées par le chauffage de marée. Cette étude a réussi le couplage des modèles de structure interne et de marée avec les simulations d'évolution thermique, grâce à l'utilisation d'un modèle paramétré 1D (pour une exploration efficace de l'espace des paramètres) et du code de convection mantellique 2D CHIC (pour modéliser la distribution spatiale et le transport des composés volatils). Ceci a permis de simuler l'évolution thermique des planètes et, surtout, leur histoire de dégazage sur des milliards d'années. Pour les planètes internes chaudes (comme TRAPPIST-1b), la trajectoire évolutive dépend de l'état thermique initial, de l'efficacité du refroidissement du manteau, du chauffage radioactif et de la rhéologie. Les planètes subissant un effet de marée modéré (comme TRAPPIST-1d) peuvent développer une atmosphère secondaire beaucoup plus rapidement (au cours du premier milliard d'années environ) qu'une planète sans effet de marée. Dans le WP4, les résultats de la modélisation 3D indiquent que TRAPPIST-1b est peu susceptible de posséder une atmosphère, tandis que TRAPPIST-1c pourrait en conserver une ténue. Concernant les autres planètes du système TRAPPIST-1, plus éloignées, les modélisations montrent que les observations actuelles du JWST restent compatibles avec plusieurs scénarios : absence d'atmosphère, atmosphères ténues ou atmosphères avec des couches nuageuses de haute altitude. En particulier, les simulations 3D soulignent le rôle des nuages dans l'aplatissement des spectres de transmission, ce qui nécessite des efforts d'observation supplémentaires pour identifier les caractéristiques moléculaires.

Dans le cadre du WP5, des simulations ont étudié la propagation du flux UV stellaire à travers des atmosphères oxydantes et son impact sur les conditions de surface et de subsurface, à l'aide d'un modèle couplé photochimique-climatique. Sous certaines conditions UV, l'irradiation par une naine rouge pourrait favoriser une formation d'ozone plus efficace et une oxydation atmosphérique plus précoce que sur Terre, ce qui pourrait également améliorer la détectabilité de l'ozone par le JWST. Globalement, ces études convergent vers la nécessité d'une meilleure caractérisation de l'environnement radiatif de TRAPPIST-1. Une meilleure maîtrise des flux UV et de leur variabilité temporelle est essentielle pour modéliser avec précision la chimie atmosphérique, évaluer l'habitabilité et distinguer les scénarios d'oxygénéation biotique et abiotique sur TRAPPIST-1e et les planètes similaires.

Le WP6 s'est concentré sur l'identification des limites du spectre lumineux utilisable dans l'infrarouge et sur la caractérisation des stratégies biochimiques et écologiques développées par le vivant pour

capter les photons infrarouges et se protéger des rayonnements ultraviolets intenses. Un large éventail de micro-organismes photosynthétiques terrestres anoxygéniques et oxygéniques a été examiné sous lumière visible et infrarouge. L'illumination exclusivement infrarouge a permis de caractériser les taux de survie et la composition pigmentaire de souches sélectionnées, tandis que l'activité photosynthétique sous irradiance infrarouge (avec et sans lumière visible) a été étudiée plus en détail. Les approches utilisées comprenaient la mesure de l'activité photosynthétique par fluorimétrie et spectroscopie d'absorption, la détermination de la teneur en pigments par HPLC, l'étude des interactions protéine-pigment par électrophorèse sur gel natif et l'identification de marqueurs génétiques spécifiques par PCR. Parallèlement, le génome de bactéries adaptées à l'infrarouge a été séquencé afin d'identifier les séquences protéiques orthologues et paralogues impliquées dans les structures centrales de leur appareil photosynthétique. L'histoire évolutive de leurs séquences géniques a été étudiée par phylogénie. Dans le cadre du WP7, PORTAL a également permis des avancées majeures dans notre compréhension de la phototrophie sur la Terre primitive et actuelle. Des clades de cyanobactéries et de microalgues sont capables de réaliser la photosynthèse dans l'infrarouge en adaptant leurs photosystèmes ou en utilisant différentes chlorophylles. De nouvelles contraintes éclairent des étapes évolutives importantes de l'apparition de la vie et de la photosynthèse. Les plus anciens thylakoïdes intracellulaires de cyanobactéries— les membranes où se déroule la photosynthèse oxygénique— ont été découverts (1,75 Ga), ainsi que des porphyrines intracellulaires, vestiges de chlorophylles, chez des cyanobactéries et des algues multicellulaires datant de plus d'1 Ga. Les plus anciennes cellules eucaryotes (1,75 Ga) ont également été identifiées, repoussant ainsi leur âge de plusieurs centaines de millions d'années. PORTAL contribue également à l'étude de certaines des plus anciennes cellules fossiles et tapis microbiens (entre 3,45 et 3,2 Ga). Combinant les connaissances multidisciplinaires issues des WP1 à 7, le WP8 propose un nouvel outil (un biodôme) pour étudier la phototrophie dans l'infrarouge. Ce système permet de réaliser et de mesurer la photosynthèse oxygénique par des micro-organismes terrestres modèles, dans des conditions atmosphériques et lumineuses contrôlées, similaires à celles de Trappist-1, et d'identifier d'éventuelles biosignatures détectables à distance. Cette plateforme est également utile pour étudier d'autres conditions extraterrestres et celles de la Terre primitive, ainsi que pour la formation des étudiants et l'éducation du public. Le WP9 a résumé les connaissances du système TRAPPIST-1 et son l'habitabilité des exoplanètes, le problème de faux-négatifs et les perspectives pour détecter d'éventuelles biosignatures de phototrophie dans divers systèmes exoplanétaires, et étudier l'origine et l'évolution précoce de ce métabolisme sur la Terre ancienne.

Conclusions. Le projet PORTAL a permis d'améliorer notre compréhension du système exoplanétaire TRAPPIST-1. Les nouvelles contraintes strictes sur l'irradiation de surface des exoplanètes ont été utilisées pour explorer les possibilités de phototrophie dans l'infrarouge sur ces mondes extrasolaires. Des avancées majeures ont éclairé notre compréhension de la phototrophie dans l'IR et des étapes évolutives clés de la photosynthèse sur la Terre, ainsi que l'habitabilité des exoplanètes autour d'étoiles de très basse masse, et ont conduit à la création d'une nouvelle plateforme expérimentale (un biodôme) pour étudier la phototrophie dans l'infrarouge et les biosignatures potentielles détectables à distance. **Mots clés.** Habitabilité, biosignatures, phototrophie, lumière infra-rouge, TRAPPIST-1, atmosphère, modèles, biodôme, exoplanètes, Terre, microfossiles, cyanobactérie, algue.