

Les cosmologistes s'intéressent particulièrement aux âges sombres parce qu'ils donnent un aperçu de l'Univers quand il était relativement vierge, c'est-à-dire encore dénué des nombreux effets astrophysiques de grande échelle qui troublent son observation (supernovæ, jets cosmiques, etc.).

Pendant cette période, la distribution de l'hydrogène neutre portait encore l'empreinte des fluctuations quantiques primordiales, qui avaient été profondément amplifiées par l'expansion rapide de l'espace-temps au cours des premières fractions de seconde de l'Univers, sans que l'émergence des étoiles, des galaxies et des amas de galaxies ne vienne les perturber. Il est possible que la raie à 21 centimètres issue des âges sombres porte les indices d'une « nouvelle physique », c'est-à-dire de phénomènes non compatibles par les théories actuelles. « C'est un terrain de jeu où l'on peut tester les théories cosmologiques », résume Jack Burns, astrophysicien à l'université de Boulder dans le Colorado. « Si je devais imaginer un endroit idéal pour faire de la radioastronomie décimétrique, j'inventerais la Lune, assène-t-il, et le moment d'y installer des télescopes arrive enfin. »

## L'ASTRONOMIE LUNAIRE DÉMARRE

Les premiers radiotélescopes qui seront placés sur la face cachée de la Lune ou en orbite autour de notre satellite auront un objectif simple : recueillir de premières informations sur les âges sombres. Au fur et à mesure que seront mis en service des instruments plus avancés, les signaux issus de la raie à 21 centimètres apparaîtront avec plus de détails, ce qui permettra aux astronomes de dresser des cartes dynamiques et en haute résolution des nuages primordiaux d'hydrogène.

Certains instruments sont déjà en service. Ils font partie de l'alunisseur chinois *Chang'e 4* parvenu sur la face cachée de la Lune en janvier 2019 et de l'orbiteur lunaire *Queqiao* (son nom fait allusion au « pont construit dans le ciel par les pies » de la légende chinoise) lancé en mai 2018 pour relayer le signal de l'alunisseur vers la Terre. « L'arrivée de *Chang'e 4* a été le premier alunissage en douceur sur la face cachée de la Lune, souligne Bernard Foing. Un grand succès. »

Tant *Chang'e 4* que *Queqiao* sont équipés d'antennes radio. Construites en collaboration avec une équipe néerlandaise, celles de *Queqiao* ne se sont malheureusement pas déployées complètement, tandis que le signal de l'unique antenne de *Chang'e 4* est altéré par des interférences avec les ondes radio émises par l'électronique de l'alunisseur. Afin d'éviter cette difficulté, on pourra doter d'un blindage supplémentaire les futurs engins

lunaires destinés à l'exploration des âges sombres. Il se pourrait aussi que ces engins déploient de multiples antennes sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres de sol lunaire.

La prochaine phase préparatoire de l'astronomie sur la face cachée de la Lune est en effet sur le point de commencer, avec l'installation sur la Lune, en octobre 2021, du spectromètre de basse fréquence Rolses, acronyme signifiant « Observations à la surface lunaire de la gaine de photoélectrons » (Radiowave observations at the lunar surface of the photoelectron sheath).

Rolses sera embarqué à bord d'un alunisseur privé agréé par la Nasa dans le cadre du programme CLPS (Commercial lunar payload services), un programme de l'agence spatiale américaine visant à sous-traiter le transport d'instruments scientifiques sur la Lune. Même s'il sera installé à l'ouest de la face visible de la Lune, dans la région de l'Océan des tempêtes (oceanus Procellarum), ses mesures des ondes de basses fréquences (dont des ondes radio) naturellement produites par le sol lunaire joueront un rôle crucial dans les futurs travaux, sur la face cachée, d'identification des signaux radio émis par le sol. « Enfin du concret, se réjouit Jack Burns, qui fait partie de l'équipe Rolses. Trente-cinq ans que j'y travaille, et le projet est en train de se réaliser. »

Un autre instrument visant à caractériser les interférences radio sur la Lune devrait être lancé dès 2024 : Lusee (Lunar surface electromagnetics experiment). « Lusee sera installé dans le cratère d'impact de Schrödinger sur la face cachée de la Lune », précise Jack Burns. L'alunisseur acheminant Lusee devrait aussi emporter l'instrument Dapper (Dark ages polarimeter pathfinder, « explorateur à polarimètre des âges sombres »), un radiotélescope opérant à 17-38 mégahertz et destiné à détecter la raie à 21 centimètres en provenance des âges sombres. « Dapper a été initialement conçu pour être mis en orbite autour de la Lune, mais il pourrait être embarqué sur l'alunisseur en question, explique Jack Burns. La Nasa finance notre travail sur la mission de Dapper. Nous serons prêts à temps. »

Que ce soit en orbite ou sur le sol lunaire, Dapper se limitera à un ensemble d'antennes dipolaires placées en un seul lieu. Mais les astronomes ont des plans plus ambitieux. Ils veulent installer sur la Lune des réseaux d'antennes individuelles réparties sur de grandes distances. De tels réseaux équivalent à des instruments de résolution bien supérieure à celle d'une seule antenne (la résolution est proportionnelle à la distance séparant les antennes), qui seront effectivement capables de localiser des sources radio dans le ciel.

## L'ETNA, UN TERRAIN D'ESSAI

**Une équipe de robots construits par le Centre allemand d'aéronautique et d'astronautique va déployer sur les flancs du volcan sicilien un radiotélescope constitué d'un réseau d'antennes radio localisées avec une grande précision.**

**L**es flancs de l'Etna abondent de chaos rocheux et de champs d'éjectas vitreux. C'est sur ce terrain tourmenté par les impacts, comparable à celui de la face cachée de la Lune, que plusieurs équipes du DLR, le Centre allemand d'aéronautique et d'astronautique (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) – l'équivalent allemand du Cnes français (le Centre national d'études spatiales) – vont s'entraîner en juin 2021 à déployer à distance un radiotélescope.

Pour ce faire, les ingénieurs du projet, dirigés par Armin Wedler, de l'Institut de robotique et de mécatronique du DLR, préparent une campagne de télérobotique coopérative mettant en œuvre un atterrisseur, deux rovers intelligents et un rover de l'Agence spatiale européenne téléopéré par un astronaute. Au cours de l'expérience dénommée Arches Lofar (acronymes de Autonomous Robotic Networks to Help Modern Societies et Low Frequency Array), dont Bernard Foing est le conseiller scientifique, ils vont tester le déploiement sur le terrain et en grandeur réelle d'un réseau de petites antennes simulant un radiotélescope interférentiel installé sur la face cachée de la Lune. Pendant la campagne d'essai, une équipe de robots déploiera au moins sept modules, dont quatre antennes non câblées, dans le but de construire un réseau d'antennes connu avec une bonne précision géométrique.

L'expérience comprend plusieurs étapes. La première consiste à déterminer la taille souhaitée du réseau et son emplacement sur le terrain. La deuxième consiste à faire installer par un robot un premier boîtier à antenne ; cette opération s'effectuera après avoir déterminé sur la carte du terrain une zone optimale (et une zone suboptimale à utiliser éventuellement) en fonction d'une modélisation de la topographie, de la couverture des communications radio et de la précision souhaitée pour le radiotélescope interférentiel. Dans le cas de la Lune, le terrain n'aura pu être exploré en détail, car seules des images prises par l'orbiteur avec une précision de l'ordre du mètre seront disponibles. La zone de placement devra donc être recartographiée à la demande afin de déterminer la possibilité de la faire traverser par un rover. Un drone – sur la Lune, dépourvue d'atmosphère, il sera à réaction – pourrait accomplir cette tâche. Pour la faciliter, un imageur à petit champ, mais à haute résolution, aura cartographié le terrain.

Dans la troisième étape, une fois toutes les zones de déploiement explorées, un rover récupère successivement sur



Des robots différents peuvent réaliser ensemble une tâche complexe sur la face cachée de la Lune, par exemple déployer un radiotélescope. Dans le cadre du projet Arches Lofar, la DLR (le Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique) s'apprête à tester une telle équipe hétérogène de robots sur les flancs du mont Etna.

l'atterrisseur chacun des boîtiers à antenne (modulaires) et les place sur le terrain.

Ensuite, un second rover utilise son système de navigation visuelle pour localiser trois boîtiers supplémentaires par rapport à l'atterrisseur, qui serviront à déterminer la géométrie du réseau

à l'atterrisseur par le réseau d'antennes à des fins de calibration. Sur la Lune, des sources radio célestes et fixes pourront aussi servir à calibrer le réseau. Sur l'Etna, un émetteur à basse fréquence simulant une source radio de basse fréquence telle que le Soleil sera placé en outre en un endroit connu afin d'établir que le réseau fonctionne bien.

Les modules comportant les antennes sont prévus d'après ce qui a déjà été développé pour l'atterrisseur franco-allemand *Mascot*, qui s'est posé en 2018 sur l'astéroïde Ryūgū à partir de la sonde japonaise *Hayabusa 2*. Quatre de ces modules sont équipés d'un système de communication disponible dans le commerce pour sauvegarder et transmettre les données, d'un récepteur GNSS (équivalent européen du GPS) pour déterminer leur position au sol, d'un système radio de positionnement et de synchronisation, d'une électronique radio commandée par ordinateur. Trois modules non équipés de ce système radio serviront à transformer le réseau en un système de coordonnées, qui sera utilisé en plus de la navigation visuelle des rovers – souvent imprécise – afin de bien maîtriser la géométrie du réseau. En principe, la précision atteinte dans le positionnement des antennes du radiotélescope devrait être de l'ordre du dixième de la longueur d'onde des ondes radio utilisées.

**FRANÇOIS SAVATIER**  
Pour la Science

### La zone de placement devra être recartographiée à la demande

d'antennes par rapport à l'atterrisseur et à construire un système de coordonnées.

Dans une cinquième étape, tous les robots quittent la zone du réseau et le système de synchronisation radio est activé afin de déterminer la géométrie du réseau au décimètre près, grâce à la mesure de temps de vol de paquets d'ondes radio.

Une fois le réseau d'antennes positionné et précisément localisé, une antenne dipolaire est déployée pour émettre des signaux radio à la fréquence porteuse de 20 mégahertz. Ces signaux sont reçus, échantillonnés et communiqués