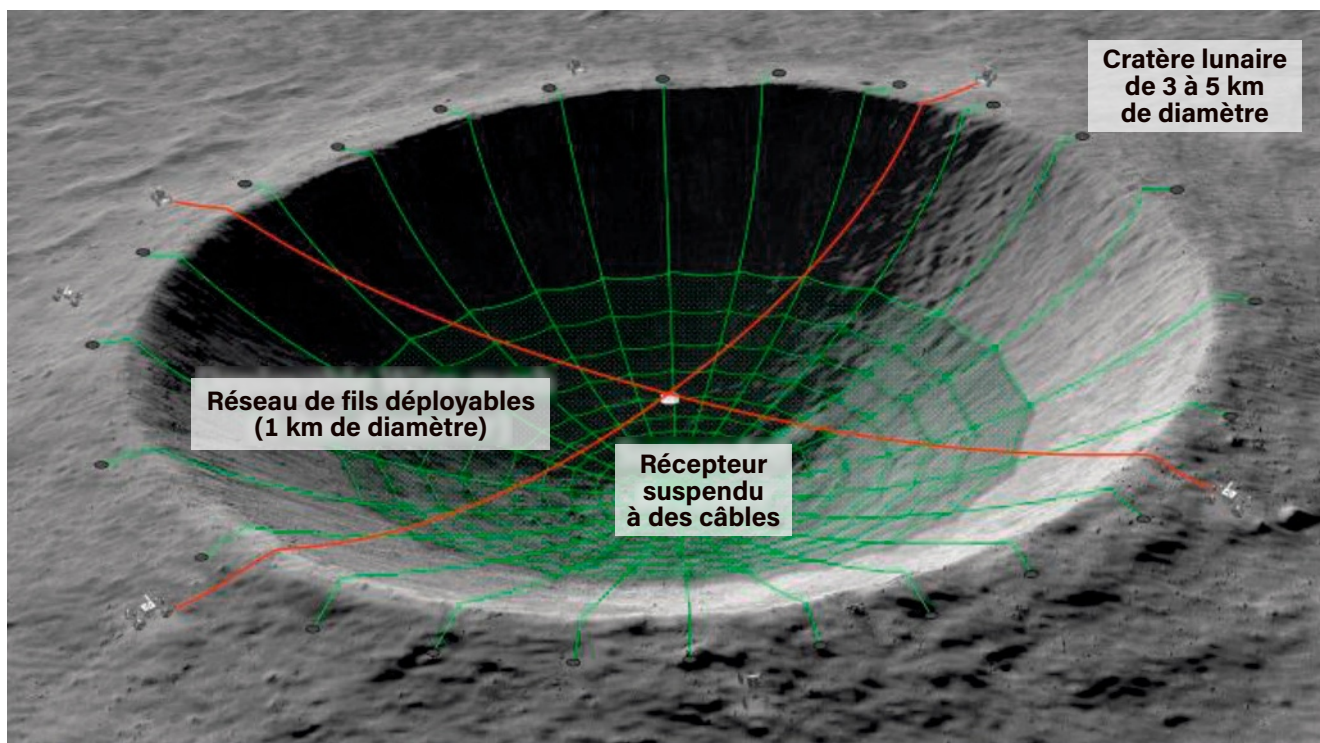




photon correspondant à une onde de fréquence 1420 mégahertz (21 centimètres de longueur d'onde). Le phénomène se produit lorsque l'atome passe de son état fondamental (l'état de plus basse énergie) à un certain état excité dit « hyperfin », où le spin (moment cinétique intrinsèque) de l'électron est orienté dans le même sens que le spin du proton, alors qu'il a l'orientation opposée dans l'état fondamental.

La raie d'émission à 21 centimètres est le signal dû aux émissions d'un grand nombre d'atomes d'hydrogène. Ce signal est détectable pour de grands nuages d'hydrogène, d'échelle astronomique.

Un tel signal est censé être apparu quelque 380 000 ans après le Big Bang avec la formation des atomes d'hydrogène. En plus de fournir la matière première à partir de laquelle se sont formés les autres atomes, et donc toutes les formes de matière, la recombinaison entre électrons et protons a rendu l'Univers transparent, comme on l'a déjà évoqué. Libéré, le rayonnement fossile produit par le Big Bang put dès lors traverser le cosmos et former le fond diffus cosmologique détecté aujourd'hui. Après cet événement, l'hydrogène neutre s'est répandu dans l'Univers sombre pendant les premières centaines de millions d'années, jusqu'à ce que se produise l'aube cosmique, c'est-à-dire l'apparition des premières étoiles et galaxies – et de la lumière émise par ces objets.

« Un aspect très intéressant de l'hydrogène neutre primordial est qu'il ne donne pas

seulement une image instantanée de l'Univers comme le fait le fond diffus cosmologique », explique Kristian Zarb Adami, de l'université d'Oxford. En étudiant avec des radiotélescopes les fluctuations de la raie à 21 centimètres au cours du temps cosmique, on peut retracer l'évolution de l'Univers primitif, lorsqu'il est passé des âges sombres à l'aube cosmique et même au-delà. Après l'aube cosmique est venue l'époque de la réionisation, pendant laquelle le rayonnement des premières étoiles massives et d'autres phénomènes

Le LCRT (*Lunar Crater Radio Telescope*) est une proposition du Niac (Nasa Institute for Advanced Concepts) visant à assembler, à l'intérieur d'un cratère de la face cachée de la Lune, un radiotélescope opérant à très grande longueur d'onde (de l'ordre de 10 mètres). Si ce projet devait un jour être mené à bien, ce radiotélescope serait le plus grand jamais construit.



## La Lune est un terrain de jeu où l'on peut tester les théories cosmologiques

astrophysiques violents ont suffisamment chauffé l'hydrogène neutre restant pour l'ioniser et le retransformer en plasma. C'est à cette époque que les signaux correspondant à la raie à 21 centimètres se sont éteints.

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.