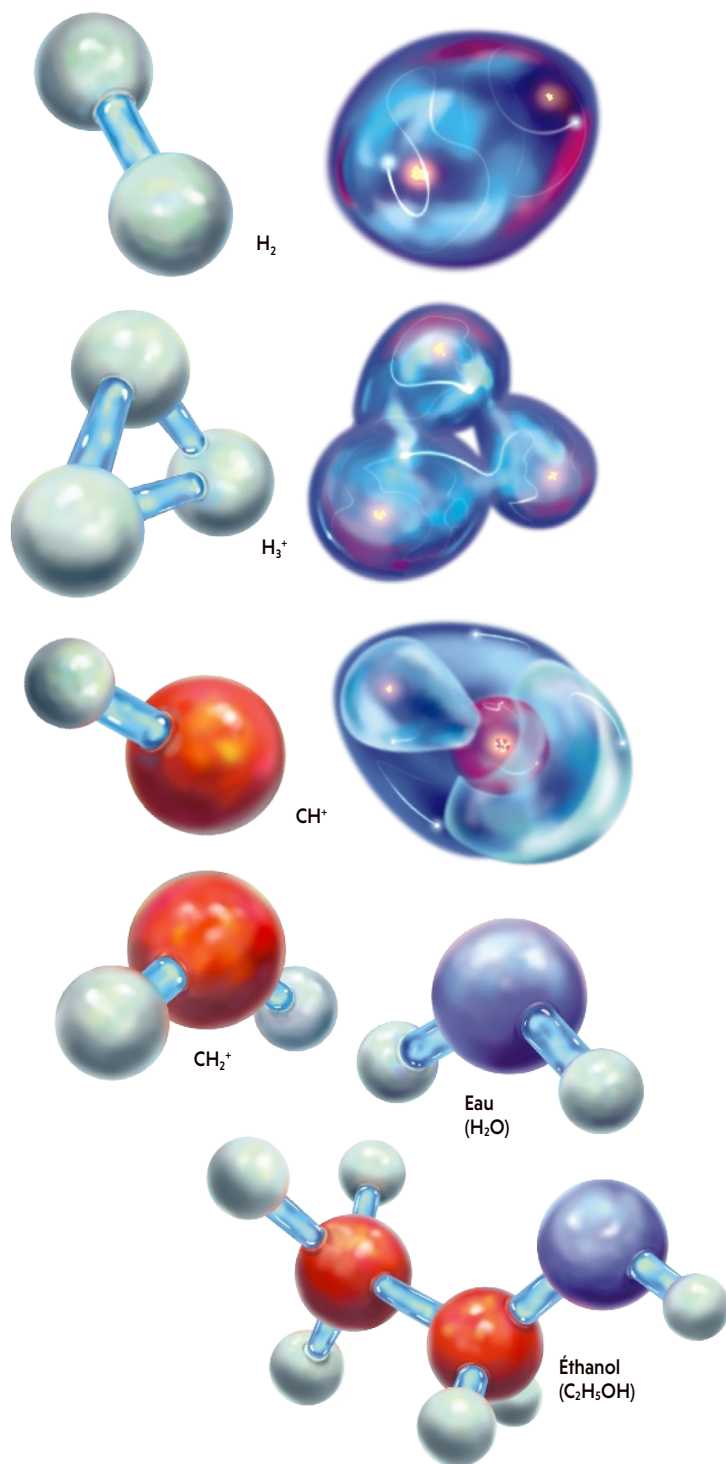




l'aluminium par du carbone pour voir s'il était possible de former des molécules carbonées observées dans les étoiles géantes rouges.

Une molécule des plus insolites est apparue: C_{60} , formée de soixante atomes de carbone agencés comme un ballon de football. En 1996, Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley ont reçu le prix Nobel de chimie pour avoir découvert la famille des fullerènes contenant, entre autres, cette molécule nommée «footballène» ou «buckminsterfullerène» (en l'honneur de l'architecte américain Buckminster Fuller, connu pour ses dômes géodésiques).

Harold Kroto était convaincu que les fullerènes étaient présents dans l'espace et étaient la source de certaines bandes interstellaires

LA MOLÉCULE HeH^+ OUVRE LA VOIE

La formation de l'hydrure d'hélium a rendu possible la formation de H_2^+ . Cela a ensuite permis la formation de nombreuses molécules. Sans HeH^+ , la synthèse de ces dernières dans l'Univers aurait été plus lente.

diffuses. Peu de scientifiques l'ont suivi, cependant, et il n'a pas persisté dans cette direction. Mais en 2010, près de vingt-cinq ans après leur découverte en laboratoire, le C_{60} et son cousin le C_{70} ont été observés, dans le domaine infrarouge, dans la nébuleuse planétaire Tc1 de la constellation du Cygne. On ne savait toujours pas si ces molécules étaient liées ou non aux BID en lumière visible. Des travaux théoriques le suggéraient, mais les scientifiques ne disposaient d'aucune confirmation expérimentale.

L'ÉNIGME DES BID S'ÉCLAIRCIT

En 2015, un cation (ion chargé positivement) de fullerène, C_{60}^+ , a été synthétisé en laboratoire et sa signature spectrale enregistrée dans le proche infrarouge. Une, puis deux des bandes d'absorption de cet ion ont alors été associées aux longueurs d'onde de bandes interstellaires diffuses connues. Par la suite, les chercheurs ont montré que ces signatures correspondaient à quatre ou cinq BID. Puis, en 2019, grâce au télescope spatial *Hubble*, Martin Cordiner, du centre Goddard de la Nasa pour le vol spatial, aux États-Unis, et son équipe ont mesuré avec précision les longueurs d'onde de BID visibles dans la direction de onze étoiles, principalement de vieilles géantes rouges. Ils en ont conclu que ces BID correspondaient bel et bien aux données expérimentales concernant C_{60}^+ , confirmant la contribution de cet ion à certaines BID.

Cette découverte révèle plus globalement qu'au moins un type de molécules laisse, de façon certaine, son empreinte dans l'espace interstellaire. On pense que les fullerènes s'y forment à partir d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, qui devraient être aussi présents dans l'espace. Les premiers indices ont commencé à s'accumuler à partir de 2018, quand des chercheurs ont observé pour la première fois la signature spectroscopique de molécules proches de la famille des HAP. La molécule qu'ils ont détectée, le benzonitrile (C_6H_5-CN), est un hydrocarbure aromatique rare avec un seul cycle d'atomes de carbone, ce qui le rend plus facile à détecter que les HAP. Encore plus récemment, les scientifiques ont détecté des cyanonaphtalènes à deux cycles, ce qui montre que des HAP de plus grande taille sont aussi présents dans l'espace interstellaire.

Malgré toutes ces avancées dans le domaine de l'astrochimie, HeH^+ est resté invisible dans l'Univers. On pense que les premières molécules ont disparu assez rapidement dans la jeunesse de l'Univers. Alors que celui-ci se dilatait et se refroidissait, les noyaux d'hydrogène résiduels, restés isolés, ont commencé à capturer eux-mêmes des électrons. Ces atomes entraient parfois en collision avec des ions HeH^+ . Quand cela se produisait, la liaison $He-H$ dans l'ion, relativement faible, se rompait et une liaison beaucoup plus forte ➤

> s'établissait entre les deux atomes d'hydrogène pour former l'ion H_2^+ . L'atome d'hélium, pour sa part, se retrouvait isolé.

Si l'on se conforme à ce scénario, la brève existence de HeH^+ aurait peu d'importance dans le cours de l'histoire de l'Univers. Mais c'est loin d'être le cas. D'après les modèles portant sur les réactions chimiques possibles à cette époque, les astrochimistes pensent que, sans la présence de HeH^+ , l'ion H_2^+ , ainsi que la molécule de dihydrogène, H_2 , se seraient formés beaucoup plus lentement : les autres chemins menant à ces composés requièrent plus d'énergie. Puis la formation de H_2 a donné naissance à de nombreuses autres espèces chimiques : l'ion H_3^+ , qui a engendré CH^+ , qui a lui-même produit CH_2^+ et une succession d'autres molécules. Finalement, cette cascade a donné naissance à l'eau (H_2O), à l'éthanol (C_2H_5OH) et à des molécules plus grosses. Toutes ces transformations ont pour origine première la liaison faible et asymétrique dans HeH^+ ; sans cet ion, l'Univers serait bien différent de celui que nous connaissons.

En 2013, les astrochimistes étaient frustrés de n'être toujours pas parvenus à détecter HeH^+ . Mais cette année-là, une lueur d'espoir est apparue lorsque des chercheurs ont découvert l'ion ArH^+ , contenant de l'argon – un élément inerte comme l'hélium –, dans la nébuleuse du Crabe, un reste de supernova. Les scientifiques ont alors axé leurs recherches de HeH^+ dans des environnements similaires, très chauds. Un problème majeur s'est toutefois posé. Les raies spectrales permettant d'identifier l'état fondamental de HeH^+ sont très proches de celles de deux transitions, d'un état interne à un autre, de la molécule CH (la toute première molécule jamais observée dans l'espace). Aucun télescope alors en service n'était capable de distinguer leurs signatures spectrales.

UN TÉLESCOPE SUR UN AVION

C'est alors que fut mis à contribution l'Observatoire stratosphérique pour l'astronomie infrarouge (*Sofia*, pour *Stratospheric observatory for infrared astronomy*), le résultat d'une collaboration entre la Nasa et le Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique (DLR) – l'agence spatiale allemande. Il s'agit d'un télescope infrarouge aéroporté : dans le flanc d'un avion, un Boeing 747 reconverti, une ouverture a été pratiquée pour permettre au télescope de réaliser des observations à haute altitude.

En mai 2016, une équipe internationale a utilisé *Sofia* pendant trois nuits pour scruter l'espace. Le télescope de *Sofia* a une résolution spectrale suffisante pour discerner le marqueur spectroscopique unique de HeH^+ , à une fréquence de 2010,184 gigahertz (dans l'infrarouge lointain). Après une analyse méticuleuse des données récoltées, le résultat a été publié

en 2019 : c'est dans les restes d'une étoile en fin de vie dans la nébuleuse planétaire NGC 7027, dans la constellation du Cygne, que l'équipe de Rolf Güsten a déniché la signature chimique recherchée depuis si longtemps.

Certes, les ions HeH^+ détectés ne sont pas ceux de l'Univers primordial : les composés que Rolf Güsten et ses collègues ont mis en évidence ont sans doute été produits beaucoup plus récemment. Mais cette percée contribue à affiner notre connaissance de cette espèce chimique. Elle fournit des indices sur les conditions qui régnaient dans l'Univers primordial quand HeH^+ était le seul composé présent dans l'espace. Cette découverte est également susceptible de fournir des informations sur les endroits où trouver HeH^+ dans l'espace aujourd'hui : les scientifiques chercheront dans d'autres nébuleuses planétaires, ou dans des régions de l'Univers visible si lointaines que leur observation constituerait un immense bond dans le passé.

DES QUESTIONS TOUJOURS PLUS DIFFICILES

Nous vivons une ère passionnante pour l'astrochimie. Trois questions majeures viennent de trouver une réponse concluante en peu de temps. Les scientifiques ont observé la première molécule qui s'est formée dans l'Univers, ont identifié pour la première fois certaines signatures chimiques des mystérieuses bandes interstellaires diffuses et, enfin, ils détectent des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'espace.

En outre, de nouvelles reconstitutions en laboratoire des conditions physiques interstellaires montrent comment les bases azotées et les acides aminés, les briques de base respectivement de l'ADN – ou ARN – et des protéines, ont pu se former. Des télescopes aéroportés comme *Sofia* ou spatiaux tels *Hubble* ou encore le futur *James-Webb*, en s'affranchissant des pertes liées à l'atmosphère terrestre, offrent des perspectives prometteuses dans l'étude spectrale d'objets stellaires susceptibles de présenter de nouvelles signatures chimiques.

Maintenant que de nouvelles découvertes ont fourni une réponse à un certain nombre de questions, d'autres interrogations surgissent. Les astrochimistes espèrent en effet répondre à des questions plus difficiles, comme : « À quels composés correspondent les autres B1D? », « Quelles sont les origines moléculaires de la vie? », ou encore « Quelles sont les conditions chimiques nécessaires à la formation de planètes telluriques plutôt que de géantes gazeuses? ». Le partage d'électrons entre l'hydrogène et l'hélium a engendré la matière telle que nous la connaissons. Lorsque nous comprendrons mieux ces processus chimiques, nous aurons une conception plus fine de l'astrophysique et de l'histoire globale de l'Univers. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Güsten et al., **Astrophysical detection of the helium hydride ion HeH^+** , *Nature*, vol. 568, pp. 357-359, 2019.

A. Loiseau, **Les fullerènes, nouvelle forme du carbone**, *Pour la Science*, n° 481, novembre 2017.

D. A. Williams et T. W. Hartquist, **The Cosmic-Chemical Bond : Chemistry from the Big Bang to Planet Formation**, Royal Society of Chemistry, 2013.

L. d'Hendecourt et T. Chiavassa, **Entre les étoiles la chimie des origines ?**, *Dossier Pour la Science*, n° 60, juillet-août 2008.