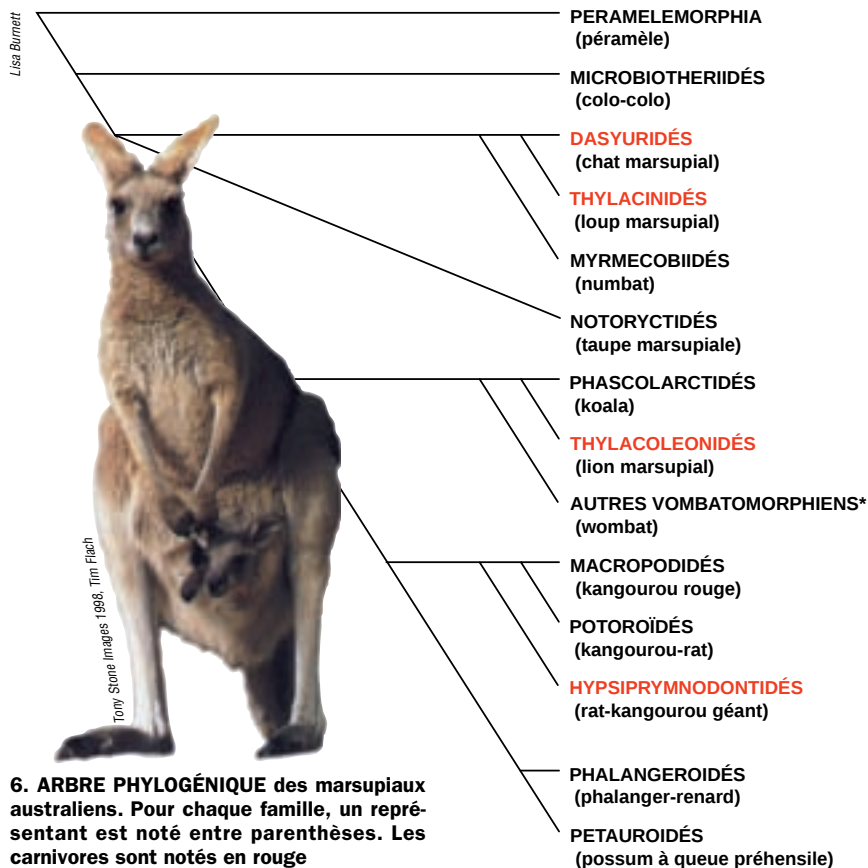




nouveaux fossiles découverts contredisent cette hypothèse.

Mort aux tueurs

Pourquoi les grands marsupiaux carnivores australiens ont-ils disparu alors qu'ils étaient nombreux et variés au Miocène? Le dernier des lions marsupiaux (*Thylacoleo carnifex*) et le dernier des rats-kangourous géants (*Propleopus oscillans*) vivaient encore lorsque les aborigènes sont arrivés en Australie, il y a au moins 50 000 ans. Les populations humaines ont-elles tué ces animaux?

La question reste ouverte. L'exemple du loup de Tasmanie, qui n'a pas survécu à l'introduction du dingo, semble mettre l'homme en cause, mais l'influence humaine sur les autres espèces est moins nette, car la diversité des marsupiaux carnivores déclinait déjà dans la seconde moitié du Miocène, bien avant l'arrivée des

hommes. Ainsi, au moins cinq loups marsupiaux vivaient au milieu du Miocène, deux coexistaient à la fin du Miocène, mais un seul a connu les hommes.

Les aborigènes ont-ils seulement accéléré un processus d'extinction entamé par la sécheresse? Dès le milieu du Miocène, en effet, l'Australie subit des glaciations de plus en plus sévères, ainsi qu'une baisse des précipitations et du niveau des mers. Lors des deux derniers millions d'années, la faune australienne a connu 20 périodes glaciaires.

Suite aux changements climatiques et à l'arrivée des hommes, les grands herbivores auraient disparu du continent. Sans proie, les marsupiaux prédateurs australiens se sont éteints. Des grands marsupiaux carnivores australiens et américains, seuls le «chat» marsupial et le diable de Tasmanie ont survécu : tâchons de protéger ces deux derniers tueurs à poche.

Stephen WROE est paléontologue à l'Université de Sydney.

M. ARCHER, S. HAND et H. GODTHELP, *Riversleigh: The Story of Animals in Ancient Rainforests of Inland Australia*, Reed Books, 1994.

S. WROE, *Killer Kangaroo*, in *Australasian Science*, vol. 19, n° 6, pp. 25-28, juillet 1998.

S. WROE, *The Geologically Oldest Dasyurid, from the Miocene of Riversleigh, Northwestern Queensland*, in *Palaeontology* (à paraître).

Le ciel infrarouge vu de l'espace

A. ABERGEL • F. BOULANGER • G. LAGACHE • E. DARTOIS • J.-L. PUGET

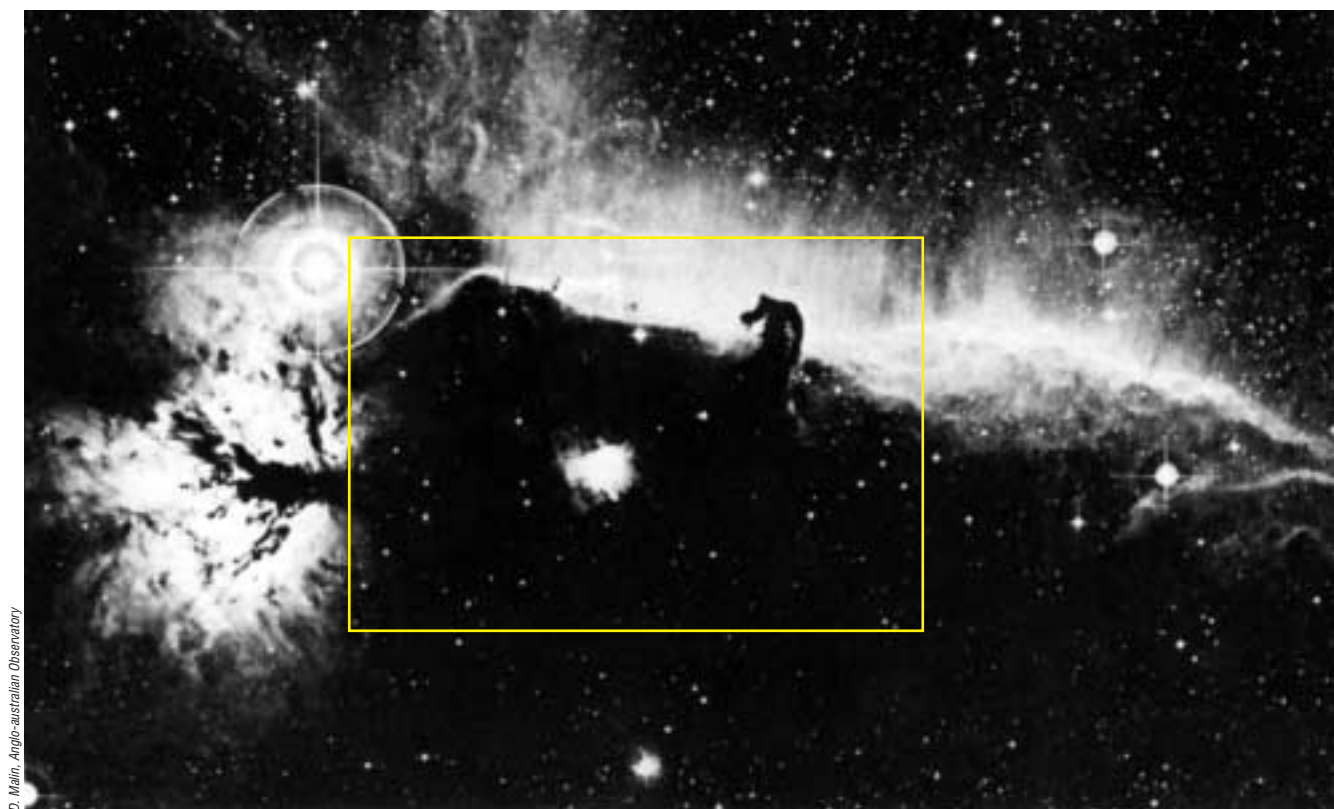
Le satellite ISO a déterminé la nature des poussières du milieu interstellaire et mesuré le rythme de formation des étoiles au cours de l'évolution de l'Univers.

L'atmosphère terrestre est quasi opaque aux rayonnements infrarouges : aussi, jusque dans les années 1970, les astronomes n'ont pu mesurer les émissions des corps célestes dans cette gamme de longueurs d'onde. Les premières observations dans l'infrarouge, à partir du sol, étaient incomplètes, et l'utilisation d'avions, de ballons ou de fusées pose des problèmes techniques et logistiques considérables.

Les satellites artificiels ont permis aux astronomes d'envisager des observations longues, soit pour étudier le

ciel entier, soit pour détailler des régions spécifiques. Le premier satellite d'observation des rayonnements infrarouges, *IRAS* (pour *Infrared astronomical satellite*, c'est-à-dire «satellite d'astronomie infrarouge»), fut lancé par la NASA en 1983. Il dressa une carte complète du ciel à quatre longueurs d'onde : 12, 25, 60 et 100 micromètres (un micromètre est égal à un milliardième de mètre ; les rayonnements infrarouges sont ceux dont la longueur d'onde est supérieure à 0,7 micromètre et inférieure au millimètre ; au-delà s'étend le domaine radio).

Le 7 novembre 1995, une fusée *Ariane 4* mit en orbite autour de la Terre le satellite *ISO* (*Infrared Space Observatory*, soit «observatoire spatial dans l'infrarouge») de l'Agence spatiale européenne. Le satellite est équipé d'un gros cryostat, qui contenait initialement plus de 2 000 litres d'hélium liquide. Ce liquide cryogénique maintenait la température des instruments embarqués à trois kelvins environ (soit -270°C), évitant que le rayonnement infrarouge émis par les instruments à bord ne perturbe les mesures. L'autonomie du système



D. Malin, Anglo-australien Observatory

de refroidissement devait être de 18 mois, mais les astronomes ont eu la bonne surprise de voir le satellite fonctionner pendant 29 mois.

Le satellite était sur une orbite très elliptique, avec un périégée de 1 000 kilomètres et un apogée de 70 500 kilomètres. La période de révolution était de 24 heures, mais les instruments ne fonctionnaient que 16 heures sur 24, les mesures étant impossibles durant la traversée des ceintures de Van Allen, zones où le champ magnétique terrestre canalise des particules solaires très énergiques, qui perturbent les détecteurs.

Le télescope collecteur a un diamètre de 60 centimètres, identique à celui du satellite *IRAS*. Quatre instruments se partageaient le plan focal : deux spectromètres, un multi-photomètre (*ISOPHOT*) et une caméra nommée *ISOCAM*. Ainsi, *ISO* a mesuré les rayonnements électromagnétiques de longueurs d'onde comprises entre 2,5 et 240 micromètres, la plus petite résolution angulaire accessible étant égale à quelques secondes d'angle avec la caméra *ISOCAM*.

Si les opérations sur le satellite sont définitivement arrêtées (faute d'hélium pour refroidir le télescope), les mesures sont encore en cours de dépouillement. Déjà les premiers résultats modifient notre vision de

l'Univers : *ISO* a étudié les constituants du milieu interstellaire et éclairé l'histoire de la formation des étoiles dans l'Univers. Nous examinerons ici ces deux aspects.

Le milieu interstellaire

Lorsque l'on regarde l'Univers dans le domaine visible, le seul que les astronomes ont longtemps étudié, on voit essentiellement des étoiles. À la fin de leur vie, celles-ci éjectent, souvent violemment, leurs constituants dans l'espace interstellaire : ainsi se constitue la matière interstellaire. Cette matière s'organise ensuite jusqu'à former de nouvelles étoiles, qui brillent, qui meurent et qui, à nouveau, éjectent leurs constituants dans l'espace. Les astrophysiciens explorent l'ensemble de ce cycle de la matière interstellaire.

Sous quelle forme la matière interstellaire se trouve-t-elle ? Une partie est gazeuse et une partie est constituée de poussières. Ces dernières ont été découvertes par les astronomes parce qu'elles leur cachaient les étoiles (voir la figure 1) : c'est le phénomène d'extinction.

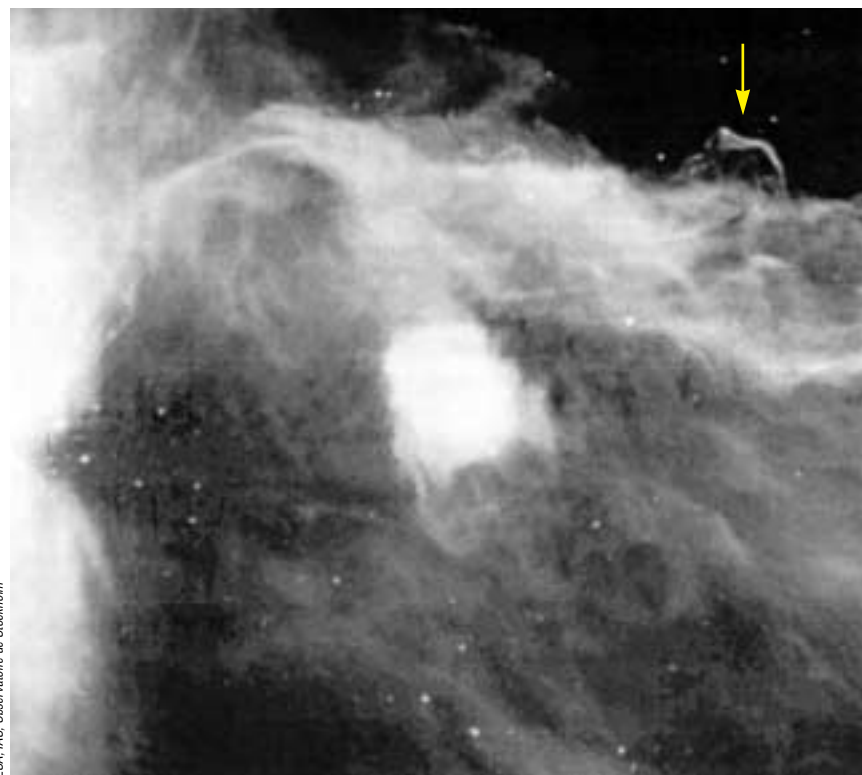
Les poussières interstellaires absorbent le rayonnement visible émis par les étoiles (l'absorption dépend fortement de la longueur d'onde). Les

astronomes étudient les poussières en mesurant le rayonnement des étoiles qui traverse les vastes nuages de poussières.

En dispersant le rayonnement mesuré (à la manière de prismes dans le domaine visible), des systèmes optiques fabriquent ensuite des spectres. Ces spectres contiennent des pics d'absorption : l'intensité reçue devient très faible à certaines longueurs d'onde. Ces pics d'absorption sont dus aux vibrations de liaisons chimiques présentes dans les molécules qui composent les poussières.

Dans les années 1970, les premières mesures de l'émission infrarouge des poussières ont mis en évidence des pics d'absorption élargis, caractéristiques de liaisons chimiques entre des atomes d'oxygène et de silicium. Un pic à une longueur d'onde égale à 9,7 micromètres a révélé la vibration de la liaison entre un atome de silicium et un atome d'oxygène, tandis qu'un pic à une longueur d'onde de 18 micromètres correspondait à la modification de l'angle formé par un atome d'oxygène central lié à deux atomes de silicium.

Ces pics indiquaient la présence de silicates, c'est-à-dire des combinaisons d'oxydes métalliques et de silice. Par analogie avec les spectres obtenus en laboratoire pour divers



ESA, IAS, Observatoire de Stockholm

1. LES POUSSIÈRES INTERSTELLAIRES apparaissent dans le visible comme de vastes nuages sombres qui absorbent le rayonnement émis par les étoiles situées derrière elles (à gauche). En revanche, ces poussières brillent sur l'image infrarouge prise par le satellite *ISO* (l'image de droite représente un champ qui correspond au cadre jaune). Les points lumineux sur l'image dans l'infrarouge correspondent à des étoiles qui sont enfouies dans le complexe ou situées à l'extérieur. Au cœur du nuage sombre, des poussières sont fortement chauffées par une étoile enfouie très brillante, formant la nébuleuse NGC2023 (tache blanche au centre du cadre). Le rayonnement émis par une étoile brillante qui n'apparaît pas dans le champ représenté ici (cette étoile, Sigma de la constellation d'Orion, se trouve au-dessus) dissocie le gaz interstellaire et perturbe les poussières le long du bord supérieur du nuage sombre. La nébuleuse dite Tête de cheval, dont on voit la forme caractéristique sur l'image en lumière visible, est une accumulation de matière située au bord du nuage. Sur l'image infrarouge prise par *ISO*, le nuage sombre est maintenant brillant : les poussières absorbent le rayonnement ultraviolet des étoiles et réémettent un rayonnement infrarouge. La nébuleuse de la Tête de cheval n'est plus visible en extinction ; on ne voit que sa « crinière » (flèche), due à l'émission des poussières fortement illuminées par l'étoile Sigma de la constellation d'Orion.

types de minéraux terrestres, on a pensé que ces silicates interstellaires étaient essentiellement des olivines ou des pyroxènes (de formules chimiques respectives Fe_2SiO_4 et FeSiO_3 , l'atome de fer pouvant être remplacé par d'autres métaux comme le magnésium). De surcroît, l'élargissement des raies d'absorption caractérisait la présence de silicates amorphes, c'est-à-

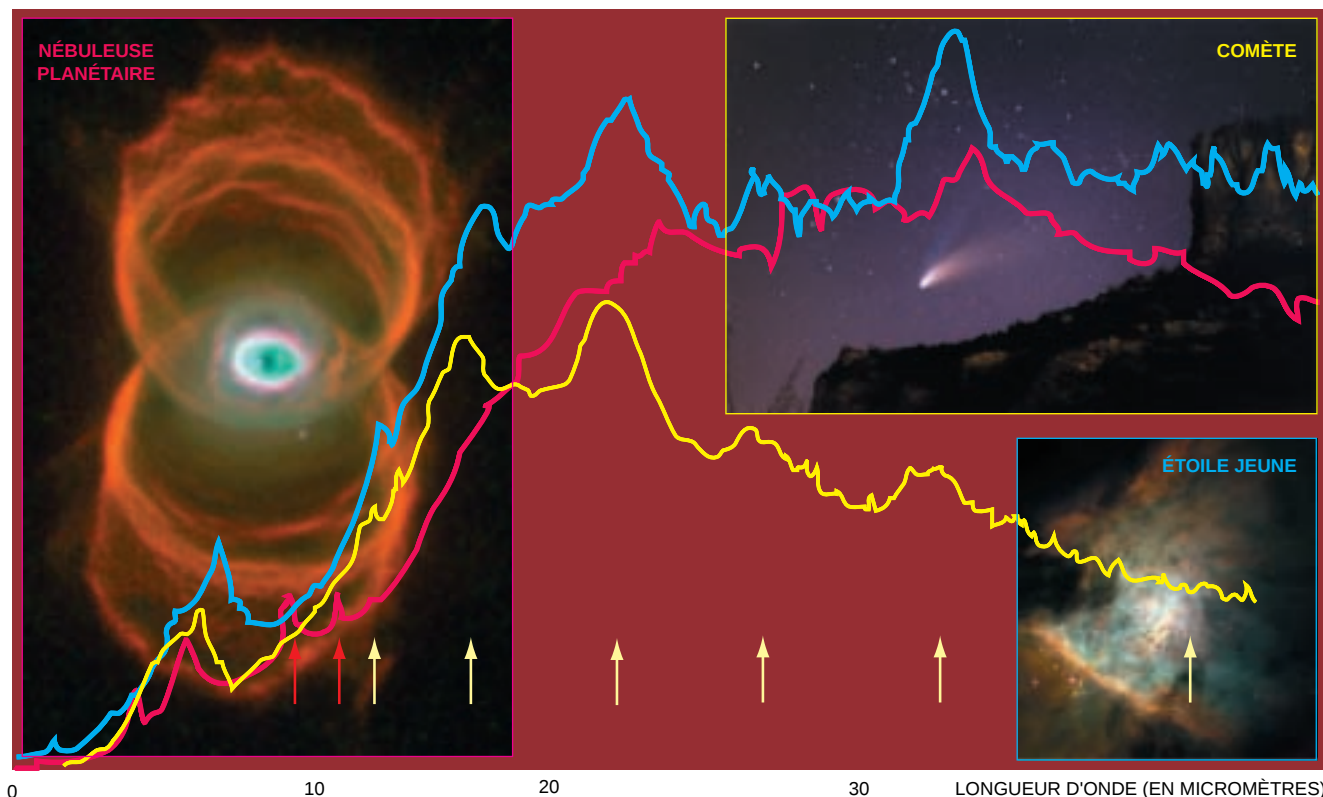
dire où les molécules ne sont pas disposées régulièrement.

L'origine des silicates interstellaires

Le satellite *ISO* a montré que les disques de poussières présents autour d'étoiles jeunes émettent un rayonnement dont le spectre contient un

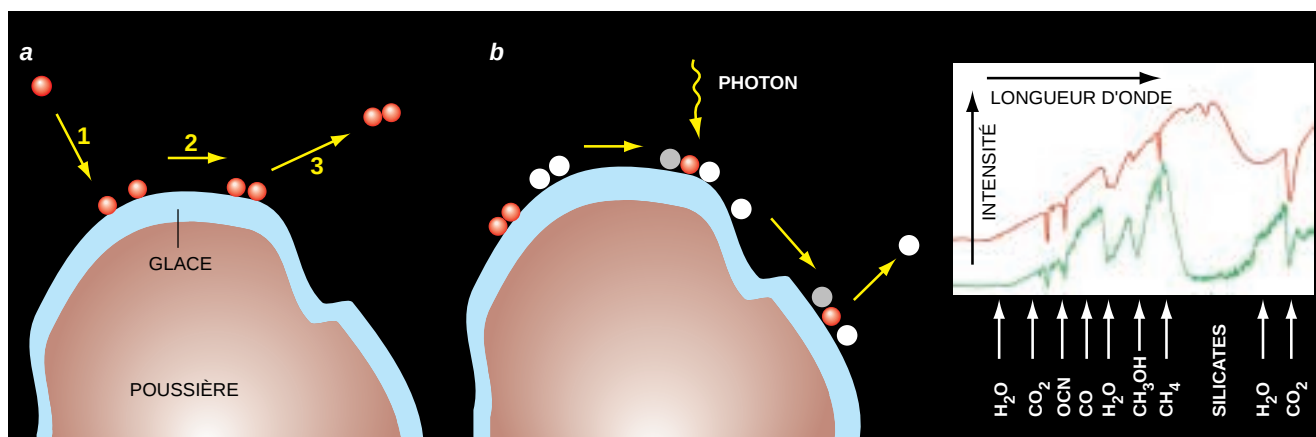
grand nombre de pics étroits, attribués à des silicates cristallins, et non amorphes (voir la figure 2). De surcroît, ces spectres sont très proches de celui de la comète Hale-Bopp.

Une partie des poussières autour des jeunes étoiles est-elle d'origine cométaire? On sait que les étoiles se forment à partir de la matière interstellaires, c'est-à-dire de silicates que



2. LES SPECTRES DU RAYONNEMENT INFRAROUGE enregistrés par le satellite *ISO* permettent l'étude des poussières interstellaires. On sait depuis longtemps que ces poussières contiennent des silicates (des composés contenant des oxydes métalliques et de la silice) amorphes, c'est-à-dire dont les molécules ne sont pas ordonnées. Pourtant le satellite *ISO* a détecté, dans des nébuleuses planétaires

et autour des étoiles jeunes, des silicates cristallins (pics repérés par des flèches jaunes). Le spectre *ISO* de la comète de Hale-Bopp présente les mêmes pics. Dans les spectres des nébuleuses planétaires, on observe en outre des pics (flèches rouges) qui sont dus à des molécules aromatiques (composées de carbone et d'hydrogène, dans une configuration analogue à celle du benzène).



3. PRINCIPE DE FORMATION des molécules interstellaires à la surface des grains de poussière. À la surface des grains, des atomes sont piégés et peuvent former des molécules qui sont libérées dans le milieu interstellaire (a). Des photons peuvent aussi déclencher des

réactions chimiques (b). Le spectre enregistré par le satellite *ISO* (à droite, en vert) présente des raies d'absorption ; en le comparant au spectre réalisé en laboratoire (en rouge), on identifie différentes molécules présentes dans les glaces interstellaires.

l'on croyait être amorphes. Or la transformation de ces silicates amorphes en silicates cristallins nécessiterait une température de l'ordre du millier de kelvins, bien supérieure à la température des comètes ! À quelles étapes de la formation stellaire les silicates interstellaires cristallisent-ils donc ?

Le satellite *ISO* a également observé des silicates cristallins dans des nébuleuses planétaires, c'est-à-dire autour d'étoiles en fin de vie, lorsque celles-ci éjectent massivement leur matière dans le milieu interstellaire. Comment le milieu interstellaire contiendrait-il des silicates amorphes si les étoiles rejettent des silicates cristallins ?

Les silicates interstellaires sont-ils réellement amorphes ? Les chocs entre les poussières interstellaires ou l'irradiation des poussières provoqueraient-ils l'amorphisation de la surface extérieure, alors que le cœur serait cristallin ? La question reste ouverte, mais ce dernier scénario est invoqué par analogie avec ce qui se passe sur la Lune : dans notre Système solaire, les silicates sont essentiellement observés sous forme cristalline, exception faite de certains minéraux observés sur la Lune et dont la surface devient amorphe sous le bombardement du vent solaire. À l'Université d'Orsay, des expériences détermineront prochainement dans quelle mesure ce processus peut avoir lieu dans le milieu interstellaire.

Les petits grains interstellaires

Quand la matière interstellaire absorbe les rayonnements des étoiles, elle est chauffée et réémet des rayonnements qui dépendent de sa température, de la même façon qu'un filament d'ampoule change de couleur quand il est chauffé (voir la figure 4). De surcroît, la correspondance entre les longueurs d'onde du spectre infrarouge du milieu interstellaire et la taille des particules indique, nous le verrons, que les poussières interstellaires ont des dimensions variées, comprises entre la taille d'une molécule et quelques dixièmes de micromètre pour les grains les plus gros.

Ces derniers reçoivent continûment de la lumière émise par des étoiles (on parle de « champ de rayonnement interstellaire »). Un équilibre s'établit entre l'absorption et l'émission de rayonnement, à une température comprise entre

10 et 100 kelvins (entre -263 et -173 °C). Le rayonnement émis est dans l'infrarouge lointain (à une longueur d'onde voisine de 100 micromètres).

Toutefois le spectre d'émission du milieu interstellaire dans l'infrarouge proche, mesuré par le satellite *IRAS*,

par des instruments au sol ou embarqués sur des ballons, montre plusieurs bandes d'émission à des longueurs d'onde voisines de 3,3, de 6,2, de 7,7, de 8,6 et de 11,3 micromètres ; découvertes au début des années 1970, ces bandes n'ont été expliquées de manière



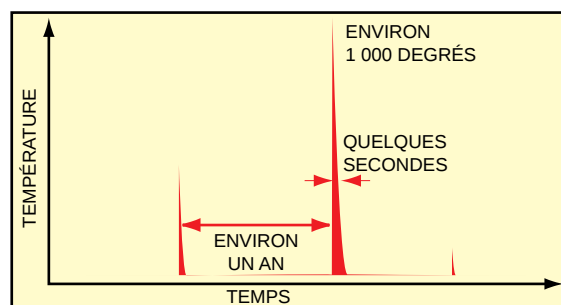
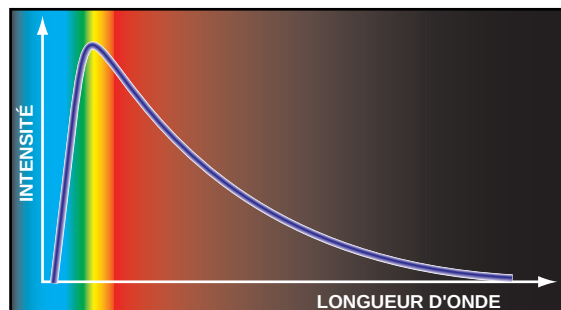
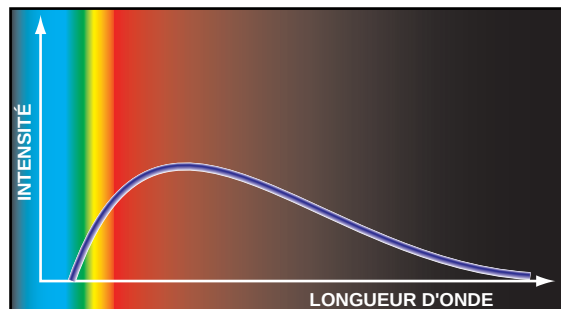
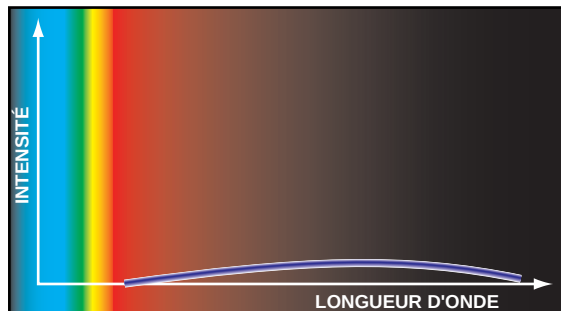
TEMPÉRATURE AMBIANTE



QUELQUES CENTAINES DE DEGRÉS



QUELQUES MILLIERS DE DEGRÉS



4. LES CORPS ÉMETTENT UN RAYONNEMENT qui dépend de leur température. Ce phénomène s'observe quand on chauffe le filament d'une ampoule à incandescence : de noir, le filament tourne au rouge, puis au blanc. Progressivement son spectre se décale vers les courtes longueurs d'onde et le rayonnement devient visible. Un objet dont la surface est à la température ambiante émet surtout des infrarouges ; un objet chauffé à plusieurs milliers de degrés (tels le Soleil ou le filament d'une ampoule) émet de la lumière visible. Les plus gros grains interstellaires, très froids, émettent dans l'infrarouge lointain ; ils sont à l'équilibre thermique. En revanche, les grains les plus petits sont chauffés très rapidement chaque fois qu'ils absorbent un photon ultraviolet ou visible. Ils sont alors portés à une très haute température et se refroidissent très vite (courbe inférieure).

satisfaisante que dix ans après : elles résulteraient de l'émission infrarouge de grains très petits, constituants majeurs de la matière interstellaire.

Ces grains sont si petits

(leur diamètre est inférieur à une dizaine de nanomètres, ou milliardièmes de mètre) que l'énergie d'un seul photon ultraviolet ou visible suffit à les chauffer à une température de l'ordre de 1 000 degrés. Or, les plus petits grains reçoivent très peu de photons, parfois moins de un par an. Après absorption d'un photon, un grain se refroidit en quelques secondes, en émettant des rayonnements infrarouges. Entre l'absorption de deux photons, les grains restent à une température très basse (quelques kelvins). Un très petit grain émet donc l'essentiel de son énergie dans le peu de temps où il est très chaud (parfois pas plus de quelques secondes par an). Ce cycle est celui

du «chauffage impulsif» (voir la figure 4).

Quelle est la nature des grains de poussière qui émettent ces rayonnements ? En 1984, à l'Université Paris VI, Alain Léger et l'un d'entre nous (J.-L. Puget) ont remarqué que les bandes d'émission à 3,3, 6,2, 8,7, 8,6 et 11,3 micromètres ressemblaient à celles de grosses molécules d'hydrocarbures aromatiques, des molécules composées seulement d'atomes de carbone et d'hydrogène, qui s'enchaînent pour former des cycles aromatiques (tel celui du benzène C_6H_6). Les bandes d'émission du milieu interstellaire seraient dues à divers modes de vibration des liaisons entre deux atomes de carbone, ou entre un atome de carbone et un atome d'hydrogène de telles molécules.

La sensibilité des instruments d'ISO a révélé les bandes d'émission infrarouge quasiment partout dans notre Galaxie, confirmant l'omniprésence des émetteurs de raies infrarouges à toutes les étapes du cycle interstellaire. Le fait que la forme du spectre observé par ISO soit inchangée alors que l'intensité du rayonnement varie typiquement de 1 à 10 000 est une éclatante confirmation du chauffage des poussières par le mécanisme impulsif.

Les observations et les modèles stellaires indiquent que les petits grains de poussière porteurs de liaisons aromatiques sont rejetés par les étoiles riches en carbone à la fin de leur vie. Cependant les estimations montrent que ces étoiles ne sont probablement pas seules à produire les grains observés dans le milieu interstellaire. L'origine des hydrocarbures aromatiques du milieu interstellaire reste ainsi une question ouverte.

Leur structure aussi, car les spectres interstellaires sont comparés à des spectres enregistrés en laboratoire. Or les composés étudiés en laboratoire sont obtenus dans des conditions physiques qui ne sont pas identiques à celles du milieu interstellaire, et les conditions d'observation sont différentes (température, pression, densité de particules...). On ne sait notamment pas isoler et étudier, dans des conditions proches de celles du milieu interstellaire, des grosses molécules aromatiques hydrogénées, composées de plus de cinq cycles benzéniques, alors que l'intensité des bandes d'émission observées dans le



5. LE SATELLITE ISO a été lancé en 1995 par l'Agence spatiale européenne. Il mesure 5,3 mètres de haut et pèse 2,4 tonnes. Il a fonctionné pendant 29 mois, mesurant les rayonnements infrarouges de l'Univers. ISO a étudié la nature des poussières du milieu interstellaire et précisé le rythme de formation des étoiles au cours de l'évolution de l'Univers.

ciel par *ISO* caractérise des molécules contenant au moins une dizaine, voire une centaine de cycles.

Les glaces moléculaires

Des centaines de molécules ont été identifiées dans le milieu interstellaire, mais comment des molécules complexes se forment-elles dans l'espace? Même dans les régions les plus denses, le gaz interstellaire est très ténu (à peine dix millions de molécules par litre), et les collisions entre atomes ou entre molécules sont rares. Toutefois, les molécules complexes se forment nécessairement par réaction d'atomes ou de molécules simples, qui doivent donc se trouver côte à côte à un certain moment.

Le mystère a été résolu quand on a observé que, dans les nuages moléculaires denses, les poussières sont parfois à des températures très faibles (de l'ordre de dix kelvins), de sorte qu'un atome ou une molécule qui percutent un grain (de rayon inférieur à un micromètre) restent collés à celui-ci, en raison de forces très faibles, nommées forces de Van der Waals (voir la figure 3).

Ainsi, les poussières se recouvrent progressivement d'un manteau de molécules, formant des «glaces interstellaires». Ces glaces sont formées non seulement d'eau solide, mais aussi de monoxyde et de dioxyde de carbone (CO et CO_2), de méthanol (CH_3OH), etc. sous la forme solide.

Des noyaux d'hydrogène qui se propagent à grande vitesse dans le milieu interstellaire, ainsi que des photons provenant des étoiles, irradient ces glaces et leur confèrent beaucoup d'énergie. Les molécules étant à proximité les unes des autres, l'énergie apportée aux atomes ou aux molécules des grains leur permet des associations chimiques et la formation de nouvelles molécules. Parfois les nouvelles espèces formées sont libérées dans le gaz : l'échange est permanent entre les molécules collées sur

les surfaces et les molécules présentes dans le gaz.

Le satellite *ISO* a identifié les molécules qui constituent les manteaux de glaces : les vibrations et rotations des molécules correspondent à des absorptions ou à des émissions dans le spectre infrarouge, à des longueurs d'onde caractéristiques des diverses molécules (voir la figure 3). Les étoiles nées dans ces nuages moléculaires émettent un rayonnement qui détruit le nuage de poussières où elles se sont formées et qui rejette ainsi toutes les molécules dans la phase gazeuse. Ces molécules voyagent dans notre Galaxie et participent à nouveau à la formation de nuages interstellaires,

et ainsi de suite. Ce cycle de matière est à l'origine de l'enrichissement moléculaire de notre Galaxie au cours du temps.

Les observations cosmologiques

Les instruments du satellite *ISO* nous ont révélé la nature de la matière interstellaire dans le voisinage du Système solaire et donné des informations sur l'Univers dans son ensemble. Parmi les grandes questions de la cosmologie contemporaine figure celle de la formation des galaxies et, plus généralement, celle de l'histoire de la formation des étoiles.

L'astrophysique suppose que l'Univers est identique en tous ses points. Pas à petite échelle, bien sûr (une étoile n'est pas identique au

vide interstellaire où elle se trouve), mais à l'échelle des distances intergalactiques.

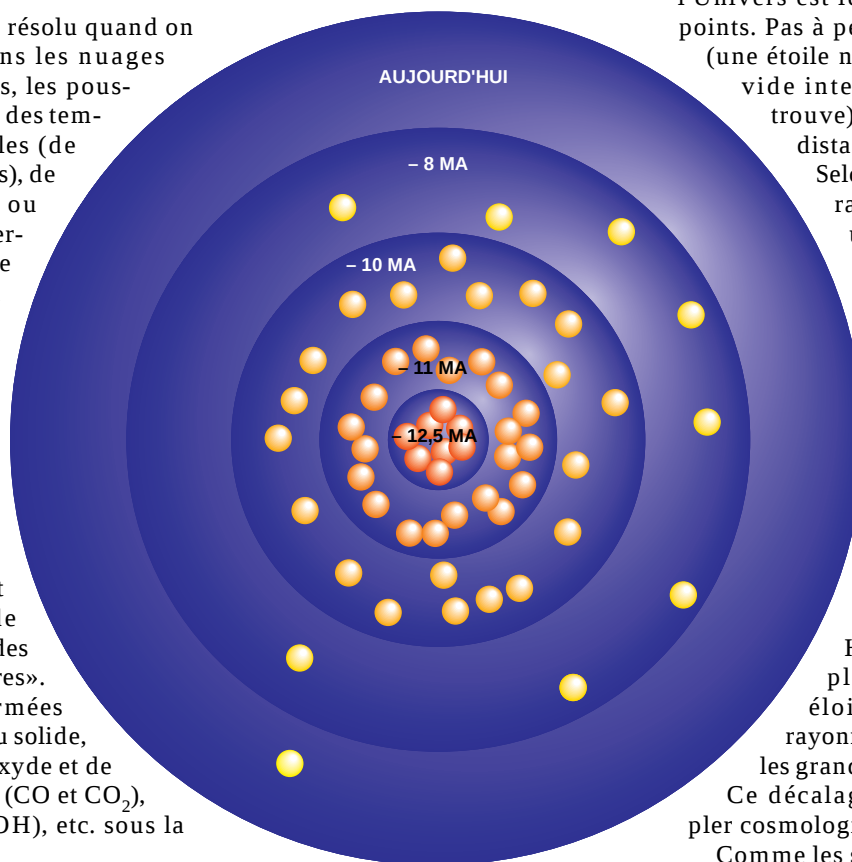
Selon cette hypothèse, les rayonnements émis par un élément chimique, tel l'hydrogène, devraient toujours être à la même longueur d'onde. Pourquoi, alors, les galaxies qui nous entourent émettent-elles des rayonnements qui semblent décalés vers les grandes longueurs d'onde?

En 1929, l'astronome américain Edwin Hubble montra que plus les galaxies sont éloignées, plus leur rayonnement est décalé vers les grandes longueurs d'onde.

Ce décalage est un effet Doppler cosmologique.

Comme les sources décalées vers le rouge sont des sources éloignées de la Terre et comme la lumière se propage à la vitesse de 300 000 kilomètres par seconde, le rayonnement qui est le plus décalé a voyagé sur de longues distances et a donc mis beaucoup de temps à nous parvenir : en regardant aux grands décalages vers le rouge, les astronomes explorent le passé de l'Univers.

La galaxie la plus lointaine jamais détectée se trouve à un décalage vers le rouge de l'ordre de 6,7, ce qui correspond à un Univers ayant dix pour



6. LE SATELLITE *ISO* A OBSERVÉ DES GALAXIES qui contribuent au fond diffus extragalactique. Ce fond provient de l'émission cumulée de toutes les galaxies depuis les premiers instants de l'Univers. Comme la lumière se propage à vitesse finie, plus les galaxies sont éloignées, plus on les voit dans le passé. Leurs émissions sont de plus en plus décalées vers les grandes longueurs d'onde. De ces émissions, on a déduit que pour une étoile de type Soleil formée aujourd'hui, il s'en formait 8 il y a 8 milliards d'années, 20 il y a 10 milliards d'années, 20 il y a 11 milliards d'années, 10 il y a 11,5 milliards d'années, 4 il y a 12 milliards d'années (sur cette figure, les échelles de taille de l'Univers ne sont pas respectées).