

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-

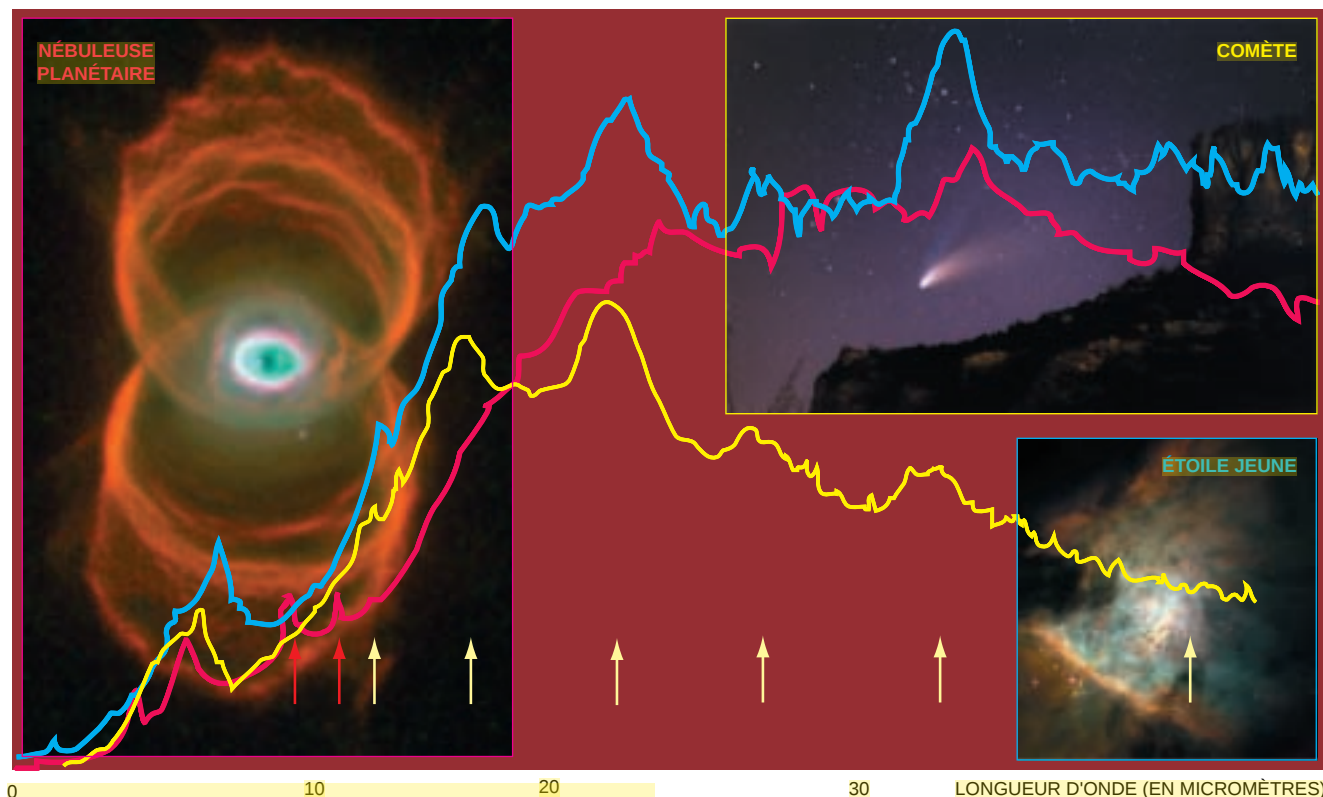
dire où les molécules ne sont pas disposées régulièrement.

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

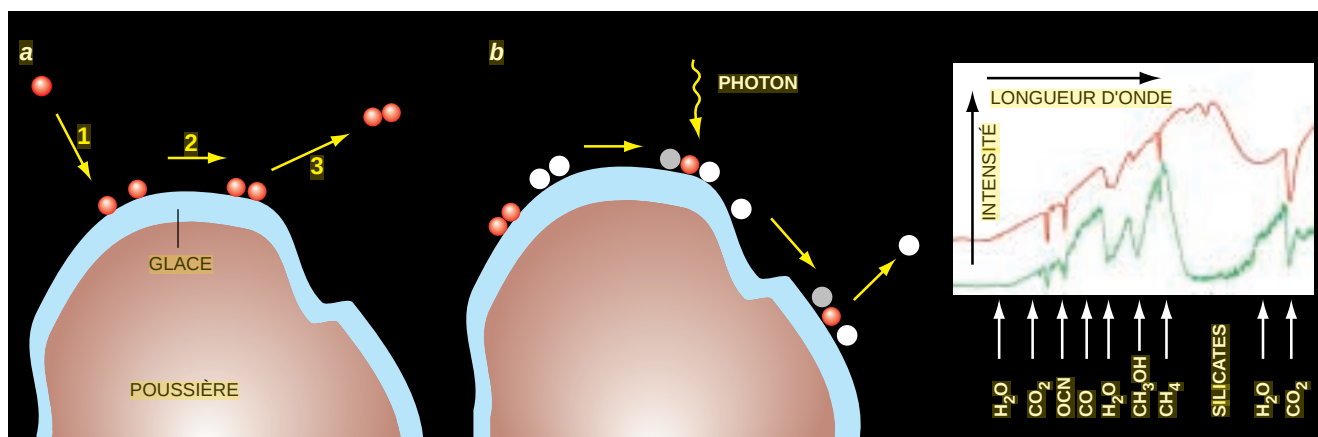
grand nombre de pics étroits, attribués à des silicates cristallins, et non amorphes (voir la figure 2). De surcroît, ces spectres sont très proches de celui de la comète Hale-Bopp.

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 interstellaire, 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



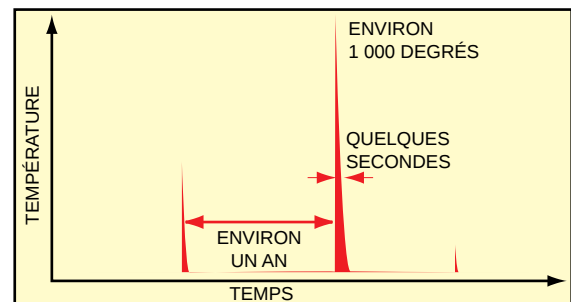
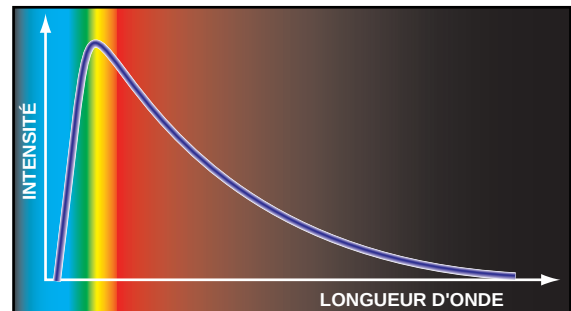
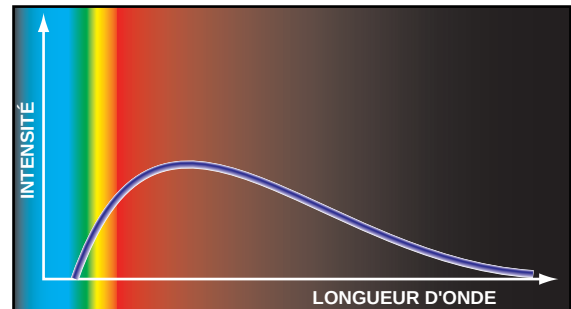
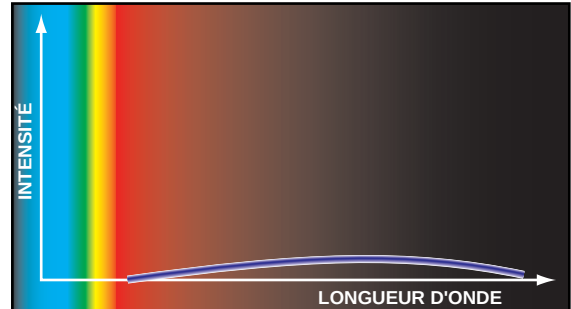
TEMPÉRATURE AMBIANTE



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).