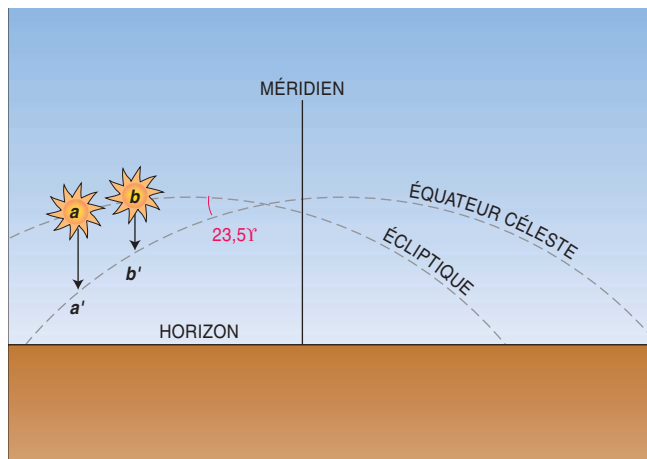
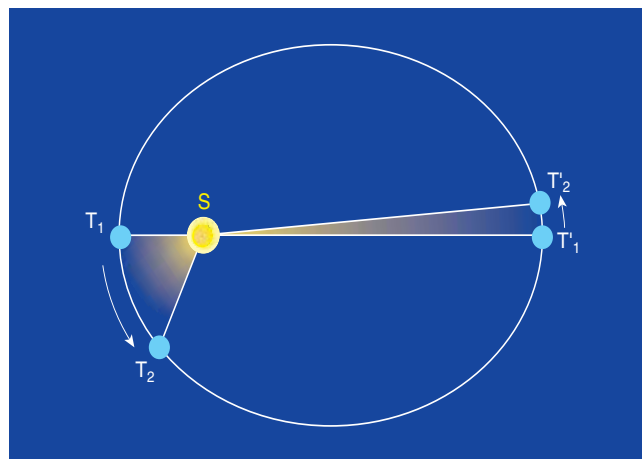




7. L'heure solaire moyenne, celle de nos montres, est définie par rapport à un Soleil imaginaire, qui se déplacerait dans le plan de l'équateur. Elle représente le temps qu'il mettrait à parcourir 15 degrés d'angle sur l'équateur céleste, qui est l'intersection du plan de l'équateur terrestre avec la voûte céleste. Pour comparer l'heure solaire vraie, mesurée par les cadrans solaires et rattachée au mouvement du Soleil sur l'écliptique, à l'heure solaire moyenne, on projette sur l'équateur le trajet ab qu'a parcouru le Soleil sur l'écliptique en une heure. Le segment $a'b'$ obtenu définit un angle différent de 15 degrés, ce qui est la cause de l'une des deux inégalités de l'heure solaire vraie.



8. L'astronome Johannes Kepler, qui découvrit le caractère elliptique des orbites planétaires, énonça aussi la « loi des aires » : le temps mis par la Terre pour aller d'un point à un autre de son orbite est proportionnel à l'aire balayée par le rayon Terre-Soleil pendant ce temps. Ainsi, le temps que met la Terre pour aller de T_1 à T_2 est égal à celui qu'elle met pour aller de T_1' à T_2' , car les aires ST_1T_2 et $ST_1'T_2'$ sont égales, où S est le Soleil. La Terre se déplace donc d'autant plus lentement qu'elle est loin du Soleil. L'orbite terrestre est représentée avec une excentricité très exagérée (en fait, elle est presque circulaire).

à l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre). D'un midi au suivant, le Soleil s'est déplacé sur la voûte céleste le long de l'écliptique (voir la figure 7). Or, vu de la Terre, il a tourné, non pas de l'angle défini par son parcours sur l'écliptique, mais de la projection de cet angle sur le plan équatorial de la Terre. La différence entre ces deux angles varie au cours de l'année (elle est minimale aux équinoxes de printemps et d'automne) et entraîne une inégalité de la durée séparant deux midis consécutifs, donc de l'heure solaire.

Par ailleurs, à cause de la « loi des aires », la Terre parcourt son orbite d'autant plus vite qu'elle est plus près du Soleil (voir la figure 8). Plus elle se déplace vite, plus elle devrait tourner sur elle-même pour retrouver la même position par rapport au Soleil. Ce phénomène introduit une inégalité du jour et de l'heure solaire au cours de l'année.

MÉRIDIENNES ET HORLOGES

En 1727, à Paris, l'horloger Henri Sully entreprend la construction de la méridienne de l'église Saint-Sulpice. Après sa mort, elle est achevée par l'astronome Charles Le Monnier. C'est une bande de cuivre de 40 mètres de longueur encastrée dans le marbre (voir la figure 9) : elle part du transept Sud et se poursuit jusqu'à un obélisque placé contre le transept Nord. Un œilleton est percé dans le vitrail du transept Sud, à 24 mètres de hauteur environ. À midi, la tache de lumière formée par les rayons du Soleil qui y pénètrent passe

sur la bande de cuivre. La position de la tache de lumière aux équinoxes et aux solstices est matérialisée par des plaques de cuivre. En fait, deux œilletons sont percés dans le vitrail, mais, à cause de l'inclinaison des rayons du Soleil, la tache de lumière de l'œilleton du bas ne tombe plus sur la méridienne de septembre à avril et celle de l'œilleton du haut du 1^{er} juin au 12 juillet. En dehors de ces périodes, on voit au moins un œilleton.

Au XIX^e siècle, l'heure solaire moyenne devient obligatoire en France, afin que les horloges soient toutes à la même heure. La différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire



9. La méridienne de l'église Saint-Sulpice, à Paris, est une bande de cuivre encastrée dans le marbre. La tache de lumière est produite par les rayons du Soleil qui passent à travers un œilleton ménagé dans le vitrail du transept Sud. Lorsqu'elle passe sur la méridienne, il est midi au Soleil.

vrai est appelée équation du temps. Elle varie chaque jour et atteint -16 minutes en novembre et +14 minutes en février. Aujourd'hui, pour retrouver l'heure de nos montres avec un cadran solaire, il faut ajouter à l'heure qu'il indique l'équation du temps et une correction en longitude. Avant le XIX^e siècle, chaque ville avait son heure propre, mais le développement des moyens de communication, notamment du chemin de fer, a obligé la France à adopter une heure unique : d'abord celle du méridien de Paris, puis de Greenwich, depuis 1911. Enfin, il faut ajouter aux corrections précédentes une heure en hiver et deux heures en été.

La France possède l'un des plus riches patrimoines de cadrans solaires au monde et nous en avons présenté les exemples les plus remarquables. On en a recensé environ 12 000 dans tout le pays. Le recensement, entrepris par la Commission des cadrans solaires de la Société Astronomique de France, aidera à préserver ce patrimoine et à le faire connaître, notamment comme instrument pédagogique pour la compréhension de phénomènes liés à l'astronomie, tels les saisons, le mouvement de la Terre autour du Soleil, la définition de l'heure... Non seulement ce recensement n'est pas terminé, mais de nouveaux cadrans solaires s'ajoutent aux anciens.

Denis SAVOIE est président de la Commission des cadrans solaires.

«Jupiter chaudes» et planètes flottantes

Certaines planètes ne tournent autour d'aucune étoile «mère». Le mécanisme de leur formation a peut-être été élucidé.

Les détections de planètes gravitant autour d'étoiles semblables au Soleil s'accroissent à un rythme accéléré. Elles semblent confirmer que la formation de systèmes équivalents au Système solaire est relativement commune. Cependant, certains de ces systèmes diffèrent du nôtre, et les modèles de formation des planètes généralement admis ne s'appliquent pas. En revanche, quand on suppose que de grosses planètes peuvent se former selon des mécanismes semblables à ceux qui donnent naissance aux étoiles, on explique alors l'existence de la plupart de ces systèmes exotiques.

Au cours de ces six dernières années, une soixantaine de planètes ont été découvertes autour d'étoiles semblables au Soleil. Les astronomes ont acquis la certitude qu'il ne s'agit pas d'étoiles, mais bien d'objets comparables aux planètes géantes du Système solaire (notamment Jupiter et Saturne), car leurs masses sont environ 1 000 fois inférieures à celle d'une étoile moyenne. Leurs orbites sont, cepen-

dant, très différentes de celles des planètes du Soleil. D'abord, certaines de ces géantes sont extrêmement proches de leur étoile parente. De tels objets, dangereusement proches des feux de leur étoile, ont été surnommés «Jupiter chaudes». Ensuite, un grand nombre d'entre elles circulent sur des orbites très elliptiques, alors que les planètes du Système solaire ont toutes, sauf Pluton, des orbites quasi circulaires. Plus récemment, on a même découvert une trentaine de planètes qui sont «dépourvues d'orbite» : elles n'appartiennent pas à un système stellaire mais dérivent, solitaires, dans l'espace, telles les étoiles. Comme la masse de ces objets est trop faible (inférieure à 15 masses de Jupiter) pour que des réactions thermonucléaires puissent avoir lieu dans leur cœur, on leur refuse le statut d'étoile. On appelle ces astres exotiques des «planètes flottantes».

Le Soleil se serait formé à la suite de l'effondrement gravitationnel d'un très vaste nuage protostellaire de gaz et de poussières. Peu de temps après, un disque de matière circulant autour de la jeune étoile aurait donné naissance aux planètes par accrétion des poussières qu'il contenait. Ce modèle prévoit que les orbites des planètes ainsi formées sont presque circulaires et que les planètes géantes se forment relativement loin de leur étoile. Il justifie difficilement l'existence de planètes à orbite très elliptique et ne peut expliquer la présence de planètes flottantes.



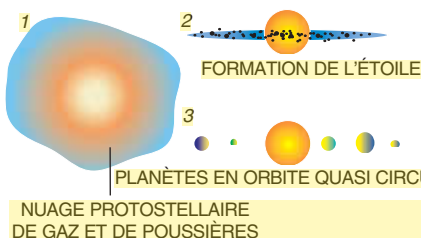
La nébuleuse d'Orion contient des planètes flottantes.

Comme alternative à ce modèle, nous avons étudié une autre possibilité. Des planètes pourraient se former dans le nuage protostellaire par condensation de petits «grumeaux», des fluctuations locales de la densité du nuage. Une fois formée, l'étoile centrale, éventuellement accompagnée de son disque d'accrétion classique, serait déjà entourée d'une nuée de planètes géantes sœurs, se déplaçant dans des plans très inclinés les uns par rapport aux autres. Les simulations numériques de l'évolution de tels systèmes montrent que ces planètes géantes interagissent fortement : quand une planète en croise une autre, elle lui cède de l'énergie et tombe vers le centre du système, tandis que l'autre en acquiert assez pour être éjectée de son orbite. Après quelques milliers de révolutions, la plupart de ces géantes sont expulsées dans l'espace ou englouties par leur étoile. Seules une ou deux survivantes restent au voisinage de l'étoile sur des orbites plus petites et très elliptiques. Un tel mécanisme explique à la fois l'existence des «Jupiter chaudes», des orbites très elliptiques et des planètes flottantes expulsées de leur système d'origine.

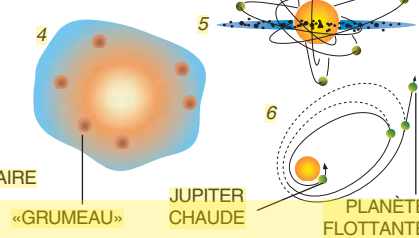
Ainsi, le mécanisme de formation de certaines planètes géantes extrasolaires semble s'apparenter davantage à celui des étoiles qu'à celui des planètes classiques. Toutefois, certains des objets détectés sont trop légers pour être le résultat d'un tel mécanisme. La croissance par accrétion dans un disque et la condensation à partir de grumeaux se produisent sans doute toutes deux dans l'Univers.

Caroline TERQUEM et John PAPALIOZOU,
Institut d'Astrophysique de Paris

a FORMATION DES PLANÈTES PAR ACCRÉTION



b FORMATION DES PLANÈTES PAR CONDENSATION



Les étoiles se forment par effondrement d'un nuage protostellaire. Quelques millièmes de la masse du nuage peuvent s'organiser en un disque de gaz et de poussières tournant autour de l'étoile. Dans le modèle de formation des planètes par accrétion (a), des poussières donnent naissance aux planètes (2 et 3). Selon le nouveau modèle proposé (b), les planètes se forment à partir de grumeaux de densité supérieure à celle qui règne, en moyenne, dans le nuage protostellaire (4). De telles planètes ont des orbites très inclinées les unes par rapport aux autres (5). Elles interagissent très fortement (6), de sorte que certaines perdent de l'énergie et tombent vers l'étoile. Elles y sont englouties ou bien adoptent une orbite et très proche de l'étoile. Celles qui récupèrent cette énergie sont éjectées du système et errent dans l'espace : ce sont les planètes flottantes.