

*Eléments de cours de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours*

### Chapitre 3

## LE SYSTEME SOLAIRE

### I – QUELQUES DEFINITIONS

L'Union Astronomique Internationale (UAI) lors de sa 26e assemblée générale qui s'est tenue à Prague du 14 mai au 25 août 2006 a redéfini les objets célestes du système solaire comme suit :

- une "**planète**" est un corps céleste qui :
  - (a) est en orbite autour du Soleil,
  - (b) a suffisamment de masse pour que sa propre gravité surmonte les forces rigides de corps de sorte qu'elle assume une forme hydrostatique d'équilibre, sous une forme sphérique,
  - (c) a éliminé tout corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche.
- une "**planète naine**" est un corps céleste qui
  - (a) est en orbite autour du Soleil,
  - (b) a suffisamment de masse pour que sa propre gravité surmonte les forces rigides de corps de sorte qu'elle assume une forme hydrostatique <sup>2</sup> d'équilibre (presque ronde),
  - (c) n'a pas dégagé le voisinage autour de son orbite, et (d) n'est pas un satellite.
- Les autres objets en orbite autour du soleil sont appelés **Petits Corps du Système Solaire**.

Ainsi conformément à ces définitions le système solaire est constitué par :

- le Soleil qui est une étoile ;
- huit planètes qui gravitent autour du Soleil dans un plan appelé écliptique Il s'agit de **Mercury, Venus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune**. Leur orbite est subcirculaire dans le sens anti-horaire (si regarde le nord du Soleil à partir du haut) sauf pour Venus et leur axe de rotation, est presque perpendiculaire à l'écliptique sauf pour Uranus qui est inclinée. (**fig.1**) ;
- des satellites (60) qui gravitent autour des planètes ;
- des planètes naines dont **Pluton, Cérès, Charon, Eris et MakeMake**.
- plusieurs **Petits Corps du Système Solaire** dont les astéroïdes et les comètes
- le milieu interplanétaire inclut au moins 2 constituants :
  - a) - la poussière interplanétaire qui sont des particules solides microscopiques,
  - b) - le gaz interplanétaire, que l'on appelle aussi *plasma*, qui est un courant de gaz chaud avec des particules chargées, pour la plupart, de protons et d'électrons. Ce courant provient du Soleil et il est appelé le **vent solaire**.

La répartition de la masse à l'intérieur du système solaire se présente de la façon suivante :  
Soleil : 99,85%; Planètes : 0,13%; Comètes, Satellites, Astéroïdes, Milieu Interplanétaire : 0,02%

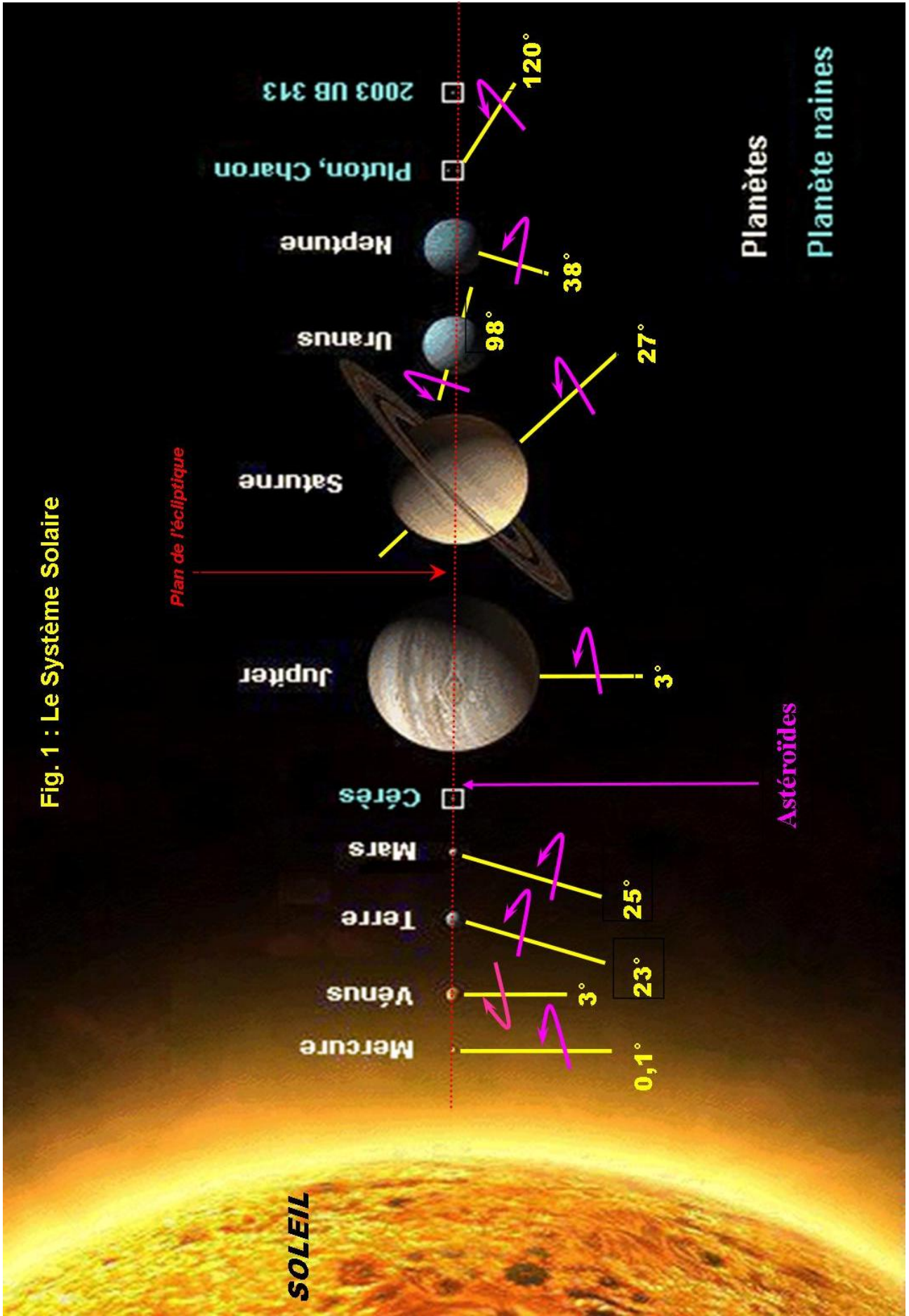


Fig. 1 : Le Système Solaire

## II - DIMENSIONS DU SYSTEME SOLAIRE

Parties il y a 31 ans, les sondes américaines Voyager 1 et 2 révèlent récemment que notre système solaire n'est pas aussi rond qu'on le pensait. Il a la forme d'un œuf.

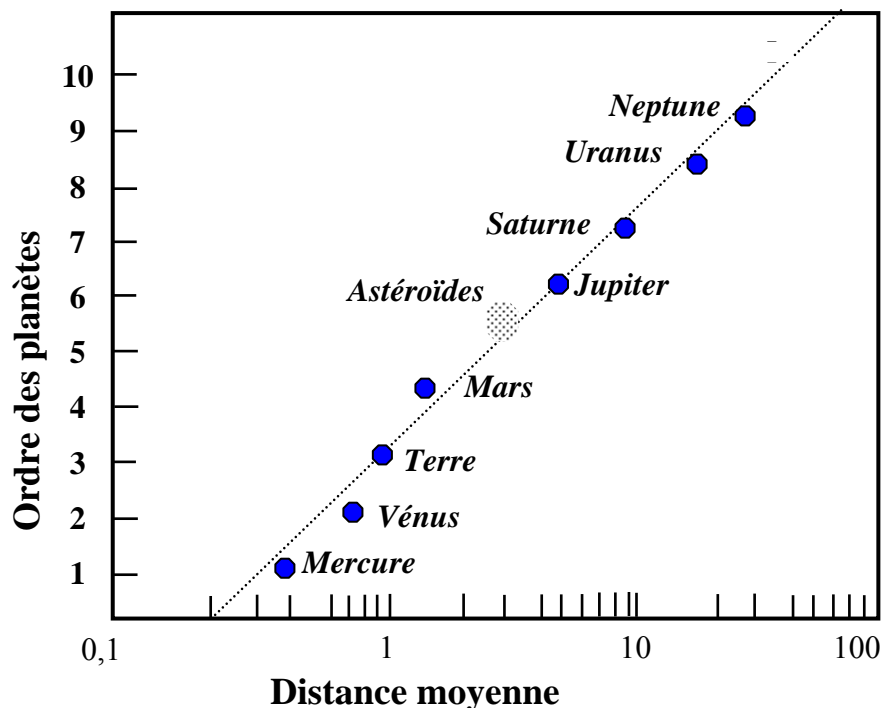
Les dimensions de ce système sont spécifiées en terme de distance moyenne de la Terre au Soleil, appelée unité astronomique (1UA=150.000.000 km). La plus lointaine des planètes connues, Pluton, a son orbite distante de 39,44 UA.

Les distances Soleil-planètes sont établies par la loi de Bode où *chaque planète est deux fois plus éloignée du soleil que sa voisine intérieure (fig.2)*. On peut retrouver les demi-grands axes relatifs approximatifs en appliquant la règle simple suivante, basée sur la Loi de Titus-Bode.

- soit la suite :       →       0 - 3 - 6 - 12 - 24 - 48 - 96 - 192 - 384 ;
- ajouter 4 :         →       4 - 7 - 10 - 16 - 28 - 52 - 100 - 196 - 388 ;
- diviser par 10 :   →       0,4 - 0,7 - 1,0 - 1,6 - 2,8 - 5,2 - 10 - 20 - 39.

Le résultat est très proche de la réalité (0,38 - 0,72 - 1,0 - 1,5 - 5,2 - 9,5 - 19 - 30), hormis la valeur 2,8 (qui correspond en fait à la ceinture d'astéroïdes) et Neptune, pour laquelle l'erreur est de quelque 30 %.

Fig. 2 . : **La loi de Bode**. La distance au Soleil est exprimée en unités astronomique



Au delà de l'orbite de Neptune existe une autre ceinture d'astéroïdes appelée *ceinture de Kuiper* située entre 30 et 50 UA (fig.3).

La frontière entre le système solaire et l'espace interstellaire est appelée *héliopause*. Elle est estimée apparaître quelque part au delà de 120 UA.

Cependant les comètes, parcourent les plus grandes distances autour du Soleil; elles ont des orbites très excentrées allant jusqu'à 50.000 UA ou plus.

Le plus près voisin stellaire du Soleil est une étoile naine rougeâtre appelée *Proxima du Centaure*. Elle est située à 4,3 années- lumières de la Terre.

### III – CARACTERES GENERAUX DES PLANETES

Contrairement aux étoiles, les planètes n'émettent pas de lumière ; elles sont éclairées par le Soleil et renvoient sa lumière. On peut distinguer deux types de planètes dans le système solaire :

*Les planètes Telluriques* qui sont les quatre planètes les plus près du Soleil : Mercure, Vénus, Terre et Mars. Elles sont appelées Telluriques parce qu'elles ont une surface compacte et rocailleuse comme celle de la Terre. Les 3 dernières ont des atmosphères importantes tandis que Mercure n'en a pratiquement pas.

*Les planètes Joviennes* sont gigantesques comparées à la Terre et parce qu'elles sont d'une nature gazeuse comme Jupiter. Elles sont aussi appelées les *géantes gazeuses*, bien que certaines d'entre elles, ou toutes, devraient avoir de petits noyaux solides. Jupiter, Saturne, Uranus, et Neptune

La distance approximative entre les planètes et le Soleil ainsi que d'autres informations statistiques sur ces planètes sont résumées dans le tableau ci-après :

	Distance (AU) Par rapport à la Terre	Rayon (km)	Masse (par rapport à la Terre)	Révolution (en jours)	Rotation (jours ou heures)	# Lunes (satellites)	Inclin_orbi / l'écliptique	Inclinaison équateur	Excentricité Orbitale	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Soleil</b>	<b>0</b>	<b>696.000</b>	<b>332.800</b>		<b>25-36</b>	<b>9</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>1,41</b>
<b> Mercure</b>	<b>0,39</b>	<b>2.962</b>	<b>0,05</b>	<b>87</b>	<b>58,7 j</b>	<b>0</b>	<b>7°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,21</b>	<b>5,43</b>
<b> Vénus</b>	<b>0,72</b>	<b>6.051</b>	<b>0,89</b>	<b>224</b>	<b>243 j</b>	<b>0</b>	<b>3,39°</b>	<b>3°</b>	<b>0,01</b>	<b>5,25</b>
<b> Terre</b>	<b>1,0</b>	<b>6.378</b>	<b>1,00</b>	<b>365</b>	<b>24 h</b>	<b>1</b>	<b>0,00</b>	<b>23°</b>	<b>0,02</b>	<b>5,52</b>
<b> Mars</b>	<b>1,5</b>	<b>3.392</b>	<b>1,07</b>	<b>686</b>	<b>24,6h</b>	<b>2</b>	<b>1,85°</b>	<b>25°</b>	<b>0,09</b>	<b>3,95</b>
<b> Jupiter</b>	<b>5,2</b>	<b>71.492</b>	<b>318</b>	<b>4.332</b>	<b>9,8 h</b>	<b>16</b>	<b>1,31°</b>	<b>3°</b>	<b>0,05</b>	<b>1,33</b>
<b> Saturne</b>	<b>9,5</b>	<b>60.268</b>	<b>95</b>	<b>10.759</b>	<b>10,6 h</b>	<b>18</b>	<b>2,49</b>	<b>27°</b>	<b>0,06</b>	<b>0,69</b>
<b> Uranus</b>	<b>19,2</b>	<b>25.559</b>	<b>15</b>	<b>30.685</b>	<b>17,2 h</b>	<b>15</b>	<b>0,77</b>	<b>98°</b>	<b>0,05</b>	<b>1,29</b>
<b> Neptune</b>	<b>30,1</b>	<b>24.764</b>	<b>17</b>	<b>60.190</b>	<b>16,1 h</b>	<b>8</b>	<b>1,77</b>	<b>30°</b>	<b>0,01</b>	<b>1,64</b>

Pour plus de détail concernant le système solaire en chiffres consultez les sites web :

<http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/astronomie/Promenade/pages3/376.html>

<http://www.solarviews.com/>

### IV - LES PLANETES NAINES

Sont des corps solides et se répartissent en deux catégories :

- celles qui sont plus près du Soleil comme Cérés qui était classé jusqu'ici comme astéroïde et qui devient une planète naine et puis il a y Pluton et Charon. Recemment (16/08/2008) les astronomes suggèrent que Charon, au lieu d'être un satellite de Pluton, forme avec lui une planète naine double. Pluton et Charon formant un système binaire orbitent tous les deux autour d'un point situé dans l'espace.

- d'autres qui sont au-delà de Pluton, issus de dans la ceinture de Kuiper dont le nombre reste à déterminer. On en connaît, Eris (entre 2.400 à 3.000 km) et *makémaké* (27% plus massive que Pluton).

La distance approximative entre les planètes naines et le Soleil ainsi que d'autres informations statistiques sur ces planètes sont résumées dans le tableau ci-après :

	Distance (AU) Par rapport à la Terre	Rayon (km)	Masse (par rapport à la Terre)	Révolution (en jours)	Rotation (jours ou heures)	# Lunes (satellites)	Inclin_orbi / l'écliptique	Inclinaison équateur	Excentricité Orbitale	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Soleil</b>	<b>0</b>	<b>696.000</b>	<b>332.800</b>		<b>25-36</b>	<b>9</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>1,41</b>
<b>Terre</b>	<b>1,0</b>	<b>6.378</b>	<b>1,00</b>	<b>365</b>	<b>24 h</b>	<b>1</b>	<b>0,00</b>	<b>23°</b>	<b>0,02</b>	<b>5,52</b>
<b>Cérès</b>	<b>2,76</b>	<b>450</b>	<b>0,0002</b>	<b>21.681j</b>	<b>9 h</b>	<b>0</b>	<b>10,58°</b>	<b>10,6°</b>	<b>0,08</b>	<b>2,12</b>
<b>Pluton</b>	<b>39,5</b>	<b>1.142</b>	<b>0,002</b>	<b>90.800j</b>	<b>6,4 j</b>	<b>0</b>	<b>17,15°</b>	<b>120°</b>	<b>0,25</b>	<b>2,03</b>
<b>Charon</b>	<b>39-49</b>	<b>603</b>	<b>0,00013</b>	<b>586x365j</b>	<b>6 j</b>	<b>2</b>	<b>98°</b>	<b>17°</b>	<b>0,38</b>	<b>1,71</b>
<b>MakeMake</b>	<b>45</b>	<b>900</b>	<b>?</b>	<b>30.685j</b>	<b>?</b>	<b>?</b>	<b>?</b>	<b>?</b>	<b>0,15</b>	<b>?</b>
<b>Eris</b>	<b>97</b>	<b>1.200</b>	<b>0,054</b>	<b>203450j</b>	<b>8 h</b>	<b>1</b>	<b>45°</b>	<b>?</b>	<b>0,44</b>	<b>2</b>

## V – LE SOLEIL

### 1. - Structure

Le Soleil est une sphère de rayon d'environ 696.000 km. Sa température de surface est de 5.800°K; elle augmente jusqu'à 15.000.000 °K au centre. Il accomplit une rotation complète en 25 jours à l'équateur et 36 jours aux pôles. Ce phénomène, appelé "rotation différentielle" est dû au fait que le Soleil n'est pas un corps solide comme la Terre. Par contre, le noyau du Soleil tourne comme un corps solide.

Le Soleil est actuellement constitué de 75% d'hydrogène et 25% d'hélium en masse. Le reste ("métaux") compte pour environ 0.1%. Cette composition change lentement alors que le Soleil transforme l'hydrogène en hélium à l'intérieur de son noyau.

Le Soleil émet des ondes radio, des rayons X, des particules énergétiques, une quantité importante de neutrinos, en plus de la lumière visible. La production d'énergie du Soleil (386 milliards de milliards de mégawatts) est produite par la fusion nucléaire.

L'étoile Soleil est constituée de plusieurs couches de gaz ayant chacune des propriétés thermodynamiques particulières (fig.4). De l'intérieur vers l'extérieur on distingue :

#### a) - Le noyau solaire

- épaisseur moyenne environ 25% le rayon solaire.
- température approximative de 15 Millions de °K.
- 40% de la masse du Soleil et sa densité = 160.
- sous de très hautes pressions et de température, l'hydrogène est transformé en hélium.
- émission d'une quantité très importante de neutrinos.

#### b) - La zone radiative

- épaisseur moyenne environ 60% le rayon solaire.
- température varie entre 1 et 7 millions °K.

- chaleur produite dans cette zone et celle du noyau est transportée sous forme de photons qui entrent constamment en collision avec les électrons avec un temps de transport d'environ  $10^6$  années.

### c) - La zone convective

- épaisseur moyenne = 100.000 km.
- température = 15.000 à 1 million °K. Elle est animée par des mouvements de convection qui sont à l'origine du transfert de l'énergie (sous forme de chaleur) de l'intérieur vers l'extérieur.

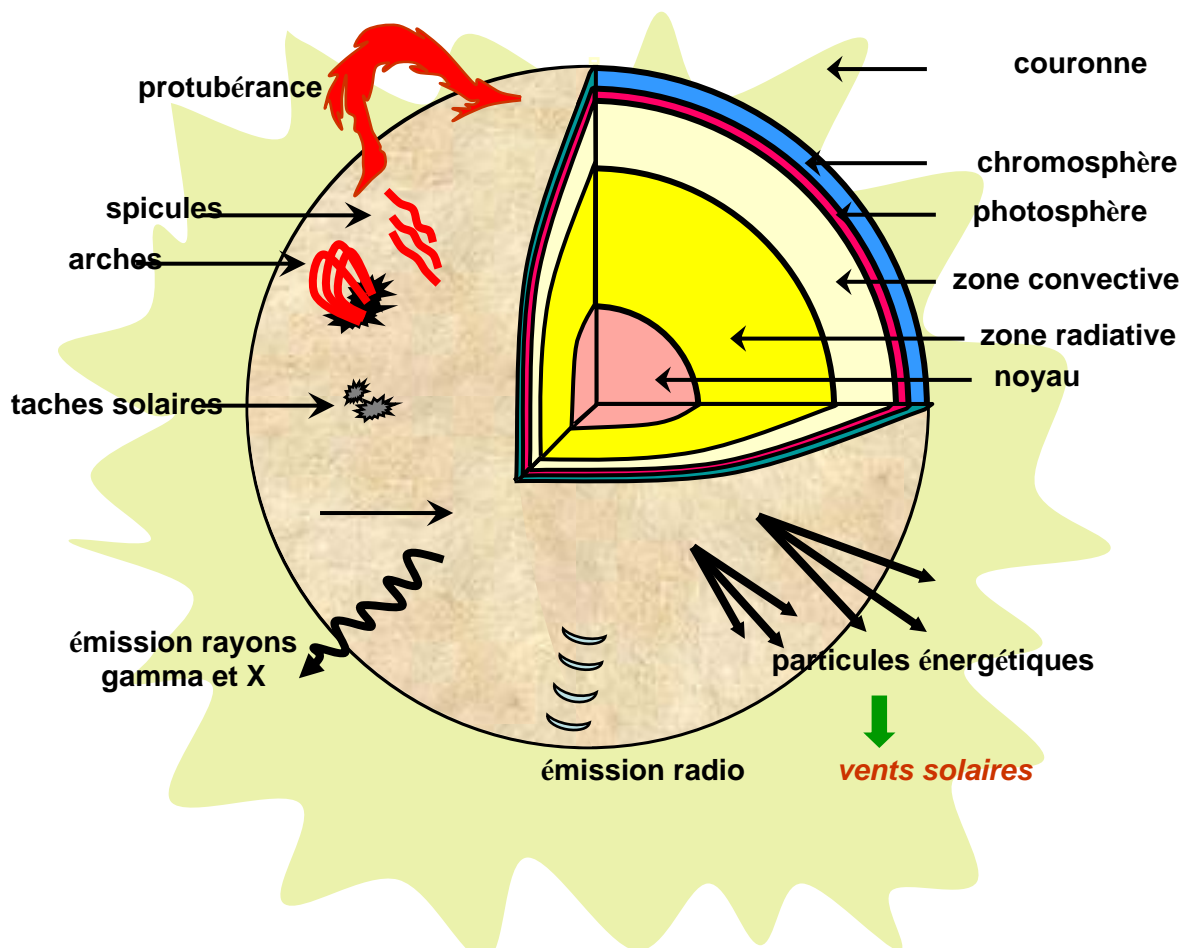
### d) - La photosphère

- aspect granuleux
- constituée de 75% d'hydrogène, 24% d'hélium et 1% d'autres éléments que l'on trouve dans l'univers.
- épaisseur = 500 km.
- température = 6.000 °K environ.
- émission dans la lumière visible et les infrarouges.
- apparition en surface des taches et facules solaires = régions sombres car plus froides (4.200°K) ayant des dimensions pouvant atteindre 25.000 km. Ces taches solaires restent en place seulement de quelques jours à quelques mois.

### e) - La chromosphère

- c'est une configuration semi-transparente de gaz
- épaisseur comprise = 1.500 à 3.000 km.
- Température environ = 4.500 °K.
- présence de spicules qui sont des jets verticaux de gaz qui peuvent atteindre 10.000 km d'altitude avec une vitesse de 20 à 50 km/s.
- spectre est dominé par des raies d'émission intense notamment H alpha qui lui donne une teinte rougeâtre prononcée.

fig.4 : Organisation du Soleil





### f) - La couronne

- constitue l'atmosphère externe du Soleil.
- température environ = 1 Millions de °K.
- visible seulement lors d'éclipses totales de Soleil.
- pas de limite précise.
- émet des raies ultraviolettes ainsi que des rayons X et des ondes radios.
- le flux de matière chaude qui s'en échappe continuellement est à l'origine du *vent solaire*.

## 2. – L'activité solaire

### a) - Le champ magnétique solaire

Le Soleil est caractérisé par un champ magnétique très puissant (en comparaison au standard terrestre) et très complexe; il est lié aux courants convectifs à l'intérieur de cette étoile. La région de l'espace dans laquelle le champ magnétique solaire est dominant est appelée *héliosphère*. Bien que le vent solaire s'échappe en direction radiale du Soleil, la rotation du Soleil donne au champ magnétique une forme de spirale.

Tous les 11 ans, les pôles magnétiques du Soleil s'inversent : On parle donc de *cycle solaire* qui dure en fait 22 ans. Au moment du maximum d'activité solaire, tous les 11 ans, on observe un grand nombre de taches, regroupées dans des régions actives qui sont le siège d'éruptions.

### b) - Les protubérances

Les protubérances appartiennent aussi à la photosphère. Elles correspondent à des jets de matière le long de lignes de champ magnétique entre deux taches solaires en formant une arche. Ce jet s'accompagne d'émissions des rayons X, des ondes radioélectriques et des rayons gamma.

Les protubérances éruptives sont les plus violentes : elles peuvent atteindre la vitesse de 600 000 km/h et elles peuvent s'élever jusqu'à plus d'un million de km.

### c) - Les éruptions solaires

Les éruptions solaires (qu'il ne faut pas confondre avec les protubérances), sont également présentes sur la photosphère. Il s'agit d'un ouragan de particules atomiques qui souffle à 3 millions de km/h qu'on appelle le *vent solaire*, qui monte toujours en spirale du champ magnétique pour atteindre l'orbite de la Terre. Ces jets de matière rayonnent dans les rayons X et UV.

## IV – LES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE

Voici brièvement les principales autres composantes du système solaire :

### 1. - Les Satellites

Les *satellites planétaires* gravitent autour des planètes. On connaît au moins 60 satellites dans le système solaire. Leur diamètre varie de 5300 km à 30 km. Ils sont constitués en général d'un mélange de roches et de glaces.

Il y a deux planètes qui n'ont pas de satellites, Mercure et Vénus, tandis que les planètes Jupiter, Saturne et Uranus en possèdent plus qu'une dizaine chacune.

Sauf la Lune et quelques satellites de la planète Jupiter, les densités des satellites sont en général inférieures à 2.

La plupart des satellites montrent d'abondants cratères d'impacts. Seule la lune Io de la planète Jupiter possède des volcans actifs comme on en observe sur la Terre.

### 2. - Les Astéroïdes

Les *astéroïdes* sont des corps rocheux de quelques km à 1000 km de diamètre. Ils se localisent entre les orbites des planètes Mars et Jupiter dans une région que l'on appelle *ceinture d'astéroïdes*.

Il existe plus de 4000 astéroïdes numérotés, mais leur masse totale n'est que 5% de celle de la Terre. Les densités des astéroïdes varient de 1,6 à 2,5.

### 3. - Les Comètes

Les *comètes* sont des astres constitués de glaces et de poussières, de forme irrégulière, tout comme les astéroïdes. Leur taille est comprise entre 1 et 40 km. Elles ont des orbites non-elliptiques autour du Soleil, en dehors de l'écliptique. Leur masse dépasse de 50 fois celle de la Terre.

A cause du chauffage par la radiation solaire, la comète émet des quantités importantes de gaz et produit une queue spectaculaire.

Leur origine serait la ceinture de Kuiper et/ou le nuage d'Oort. Leur révolution autour du soleil peut durer 76 ans (comète de Halley) jusqu'à 2.400 ans (comète de Hall - Bopp).

### 4. - Les Météorites

Les *météoroïdes* représentent des fragments de débris provenant des astéroïdes ou de comètes qui entrent dans l'atmosphère de la Terre.

Les fragments des grands météoroïdes qui tombent sur la surface terrestre sont appelés *météorites*. Elles représentent donc des échantillons de matière extraterrestre.

Chaque jour, environ 1000 tonnes de météoroïdes entrent dans l'atmosphère de la Terre dont la plupart sont consumés avant qu'ils ne puissent tomber à la surface du globe.

On classe les météorites en trois groupes sur base de l'abondance relative des métaux et des minéraux silicatés : *météorites pierreuses*, *météorites ferro-pierreuses* et *météorites métalliques*.

Cette diversité est en relation avec le mode de formation des astéroïdes qui sera examiné dans la section suivante (TD pour plus de détail).

## V - LA FORMATION DU SYSTEME SOLAIRE

Plusieurs hypothèses ont été avancées quant à l'origine du système solaire. Les interprétations récentes, basées sur des études chimiques des météorites et sur l'étude des propriétés physico-chimiques des astres, convergent à l'idée que le Soleil et les planètes proviennent d'un même nuage composé de gaz et de poussières qui aurait passé par plusieurs étapes :

1. Il y a environ 5 milliards d'années ce nuage étant en rotation, s'effondre sous sa propre gravité, puis il s'est aplati pour former un disque.
2. Le centre de ce disque se comprime et lorsque sa masse fut suffisamment dense et chaude, les réactions nucléaires se sont enclenchées. Ainsi on a naissance d'une *protoétoile* autour de laquelle gravite le reste du gaz et les poussières (10% de la masse initiale).
3. Pendant ce temps, au niveau du *disque protoplanétaire* en gravitation et relativement froid, la poussière s'agglomèrent (*accrétion*) pour former des corps solides : des astéroïdes puis des *planétoïdes* attirant vers eux de plus en plus de matière.
4. Au rythme de collisions successives, les planétoïdes forment un agglomérat de taille supérieure; tandis que la chaleur est alors si importante que ces corps entrent en fusion : le corps ainsi formé est appelé une *protoplanète*.

L'évolution de la protoplanète se fait par accrétion de la matière selon deux modes (fig.5) :

- *accrétion homogène* = agglomération de la matière non différenciée ensuite la chaleur emprisonnée dans la protoplanète et produite par les collisions et la désintégration des éléments radioactifs va entraîner des mouvements de la matière devenue fluide. Ce fluide va subir une différenciation avec accumulation d'éléments lourds vers le centre de la future planète. Les éléments légers vont migrer vers la surface.



- accréation hétérogène : la différenciation s'installe très tôt pendant l'agglomération des corps solides : les noyaux de fer se différencient les premiers; ils attirés par la gravitation vont au centre pendant que les plus légers vont migrer vers les zones externes.

C'est ainsi que naissent les planètes telluriques. Dans notre planète Terre on retrouve un noyau lourd composé de fer et de silicium pendant que les silicates se situent plutôt dans le manteau ou la croûte. Par la suite, d'autres matériaux légers ont été ajoutés par l'intense bombardement de météorites.

Parallèlement à ces événements, le vent solaire chasse les poussières et les gaz vers l'extérieur du système qui va se condenser pour former les planètes géantes gazeuses et leurs satellites.

## **VI – LES PLANETES EXTRASOLAIRES = EXOPLANETES**

En 1995 fut découverte la première planète extrasolaire. Actuellement plus 270 planètes extrasolaires ont été recensées. Récemment mi juin 2008 un nouveau système solaire du nom HD40307 a été découvert ; il est composé de trois « *super Terres* » (planètes à la compositions quasi similaire à celle de la Terre) situé à 42 années lumières de notre planète.