

CHAPITRE I

L'ÉNERGIE SOLAIRE HORS ATMOSPHÈRE

"Quand le soleil s'éclipse on en voit la grandeur."
Sénèque

1. LE SYSTÈME SOLAIRE

De tous temps l'Homme a tourné son regard vers les étoiles cherchant à comprendre son environnement et s'interrogeant face à l'infini.

Il faut bien reconnaître que les savants qui scrutaient les cieux étaient autant astrologues qu'astronomes. Ils tentaient d'expliquer le mouvement des corps célestes pour émettre des prévisions. Ils sondaient l'espace pour déchiffrer le futur...

Mais au fil du temps l'astronomie a pris ses distances vis à vis de l'astrologie. De nos jours elle se cantonne à la recherche scientifique et n'a plus rien à voir avec un art divinatoire.

La dimension visuelle des corps célestes a longtemps limité l'étude des astres au Soleil pour la partie diurne de la journée et à la Lune pour la partie nocturne, d'où leur importance sociale. Néanmoins les Mésopotamiens ont dressé des tables d'observation de certaines étoiles formant les constellations.

La première représentation « moderne » du système solaire nous est donnée par Philolaos, disciple du savant grec Pythagore (V^e siècle av. J.-C.). Pour lui toutes les planètes y compris la Terre sont des corps sphériques en rotation autour du Soleil.

Cette hypothèse est combattue par Platon (427-347 av. J.-C.) qui place la Terre au centre de l'Univers (géocentrisme). Cette idée, reprise par Ptolémée au II^e siècle dans son *Almageste* va perdurer longtemps.

Compte tenu des techniques rudimentaires de l'Antiquité, la position relative des astres est très mal appréciée. Ainsi Hipparque, grand astronome du II^e siècle av. J.-C., considère l'ordre suivant à partir de la Terre : la Lune, le Soleil, Vénus, Mercure, Mars, Jupiter et Saturne.

L'astronomie moderne naît avec le savant polonais Nicolas Copernic (1473-1543) qui publie à la fin de sa vie un traité, *De revolutionibus orbium caelestium libri VI*, dans lequel il défend la thèse héliocentrique : les planètes, dont la Terre, tournent autour du Soleil. Mais comme il considère des orbites circulaires, son système ne rend qu'imparfaitement compte de la réalité. En 1616 son ouvrage est mis à l'Index par l'Église qui considère alors comme sacrilège de penser que la Terre n'est pas le centre du Monde.

Le savant italien Galileo Galilei (dit Galilée 1564-1642), adepte de Copernic, fera les frais de l'obscurantisme religieux et échappera de justesse à la condamnation suprême. Grâce à la lunette astronomique, nouvellement inventée, il visualise la rotation propre du Soleil en observant le mouvement apparent de taches à sa surface.

Son confrère Giordano Bruno (1548-1600), aura moins de chance et sera brûlé vif par l'Inquisition pour avoir défendu les thèses coperniciennes. Il faut dire que cet humaniste était très en avance sur son temps puisqu'il envisageait un univers infini constitué

d'étoiles semblables au soleil autour desquelles gravitent des planètes pouvant être habitées.

Les grandes avancées dans le domaine de la représentation et de la compréhension du système solaire se font avec la théorie de la gravitation universelle de Newton (1643-1727). Celle-ci permet de comprendre les fameuses lois de Kepler (1571-1630) régissant la cinématique des planètes mais aussi de séparer science et croyances.

Peu à peu le système solaire, tel qu'on le connaît aujourd'hui, prend forme. En 1781 un astronome amateur, William Herschel (1738-1822), découvre Uranus.

Neptune, quant à elle, est *imaginée* par le calcul en 1846, à la fois et indépendamment, par l'anglais Adams et le français Le Verrier. Sa découverte, la même année, par l'allemand Galle consacra la puissance de la Mécanique céleste.

Il faut attendre 1930 pour que la neuvième planète du système solaire, appelée Pluton, soit découverte par Clyde Tombaugh à l'observatoire Lowell. Mais en août 2006, l'Union Astronomique Internationale reléguait Pluton dans la catégorie des planètes naines.

L'Univers est composé de galaxies regroupées en amas. L'un de ces amas galactiques, appelé l'amas local contient la Galaxie (avec un grand G) ou Voie Lactée ; c'est celle où nous vivons. De type spiral, elle est composée d'une centaine de milliard d'étoiles dont l'une d'entre elles est le Soleil.

Les distances séparant les objets célestes étant considérables, les unités employées ne sont plus le mètre ou le kilomètre. On utilise :

- l'*unité astronomique* UA qui correspond à la distance Terre-Soleil.

$$1 \text{ UA} = 149\,597\,870 \text{ km}$$

- l'*année lumière* AL qui est la distance parcourue par la lumière durant une année :

$$1 \text{ AL} = 63\,240 \text{ UA}$$

- le *parsec* pc égal à la distance d'un astre dont la parallaxe est de 1 seconde d'arc :

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ AL}$$

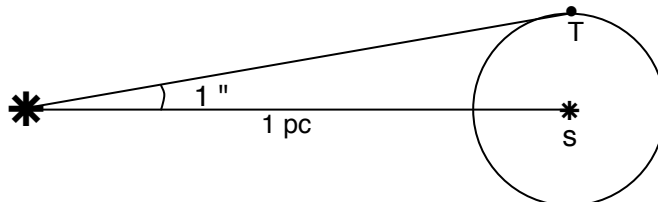


Figure I.1 - Parallaxe : angle dont on voit une distance donnée, ici la distance Terre-Soleil (T-S)

Une représentation de la Voie Lactée est donnée ci-dessous. La plus grande partie des étoiles forme un disque renflé en son centre, appelé centre galactique, d'environ 2 mille parsecs de diamètre. Des bras spiraux partent de ce centre. Dans l'un d'entre eux, à 8 kpc de distance, se trouve notre étoile, le Soleil. Celui-ci tourne autour du centre galactique avec une vitesse d'environ 250 km/s et en fait le tour en 230 millions d'années.

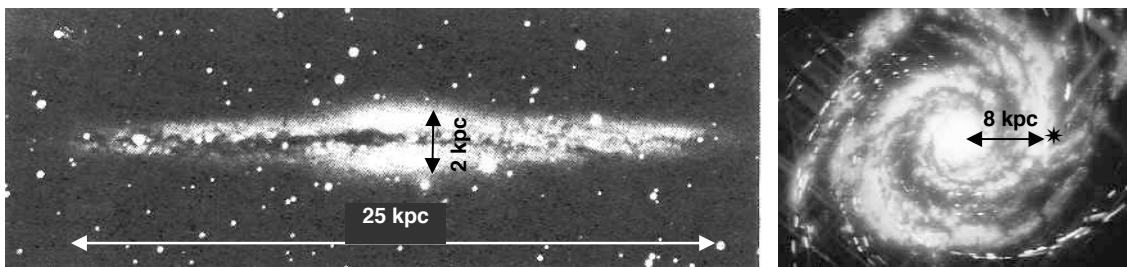


Figure I.2 – Notre Galaxie ou Voie Lactée, comme on peut se l'imaginer en fonction d'autres galaxies spirales.

Pour tenter de saisir les distances énormes que l'on rencontre en astronomie, on peut se référer aux deux figures ci-dessous.

En comparant la Terre à un grain de sable de 1 mm de diamètre, la distance Terre-Soleil serait de 12,5 m, le Soleil étant alors une sphère de 12 cm de diamètre environ.

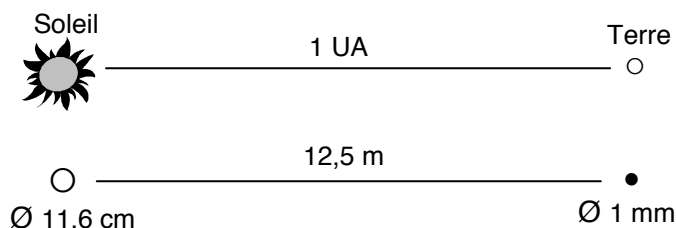


Figure I.3

Si on assimile le diamètre du disque de notre Galaxie à la distance séparant Paris de New-York, la distance Soleil-Terre est de l'ordre du millimètre.

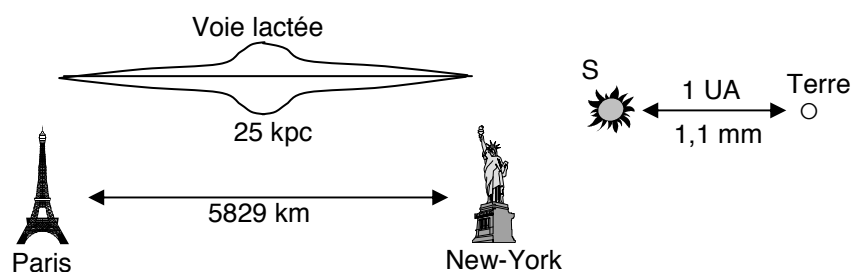


Figure I.4

distance Terre-Lune	384 400 km
étoile la plus proche du Soleil : Proxima Centauri	4,25 AL
galaxie la plus proche : nébuleuse d'Andromède	2 M AL

Tableau I.1 – Quelques distances "astronomiques".

Quelques estimations du temps écoulé		
âge de l'Univers	13,7 milliards d'années	24 h
âge du système solaire	4,5 milliards d'années	8 h
apparition des mammifères	200 millions d'années	21 min
apparition des premiers hominidés	3 millions d'années	19 s
apparition de l'homo sapiens	200 000 ans	1,3 s

Tableau I.2 – En considérant l'âge de l'Univers égal à une journée, la colonne de droite indique les autres durées rapportées à cette journée.

Le tableau I.3 ci-dessous donne quelques caractéristiques des 8 planètes du système solaire (ainsi que de Pluton) dont la somme des masses ne représente cependant que 1/1000 de la masse du système solaire.

nom	symbole	distance	diamètre	masse	masse volumique	champ gravitationnel	période
Mercure	☿	0,39	0,382	0,055	5,42	0,39	88 j
Vénus	♀	0,72	0,949	0,815	5,25	0,88	225 j
Terre	♁	1	1	1	5,52	1	1 a
Mars	♂	1,52	0,532	0,107	3,94	0,38	1 a 322 j
Jupiter	♃	5,20	11,209	317,9	1,33	2,34	11 a 315 j
Saturne	♄	9,54	9,449	95,2	0,69	0,93	29 a 167 j
Uranus	♅	19,19	4,007	14,5	1,29	0,79	84 a 3 j
Neptune	♆	30,06	3,883	17,1	1,64	1,12	164 a 288 j
Pluton	♇	39,53	0,179	0,002	2,05	0,06	247 a 336 j

distance : moyenne au soleil (en UA)
diamètre : équatorial, relatif à celui de la Terre = 12 757 km
masse : relative à celle de la Terre = $5,98 \cdot 10^{24}$ kg
masse volumique : moyenne (en g/cm^3)
champ gravitationnel : accélération de la pesanteur moyenne à l'équateur rapportée à celle de la Terre ($9,78 \text{ m/s}^2$)
période : temps mis par la planète pour accomplir une révolution autour du soleil appelée *révolution sidérale* (a = ans, j = jours)

Tableau I.3 – Caractéristiques des planètes du système solaire.

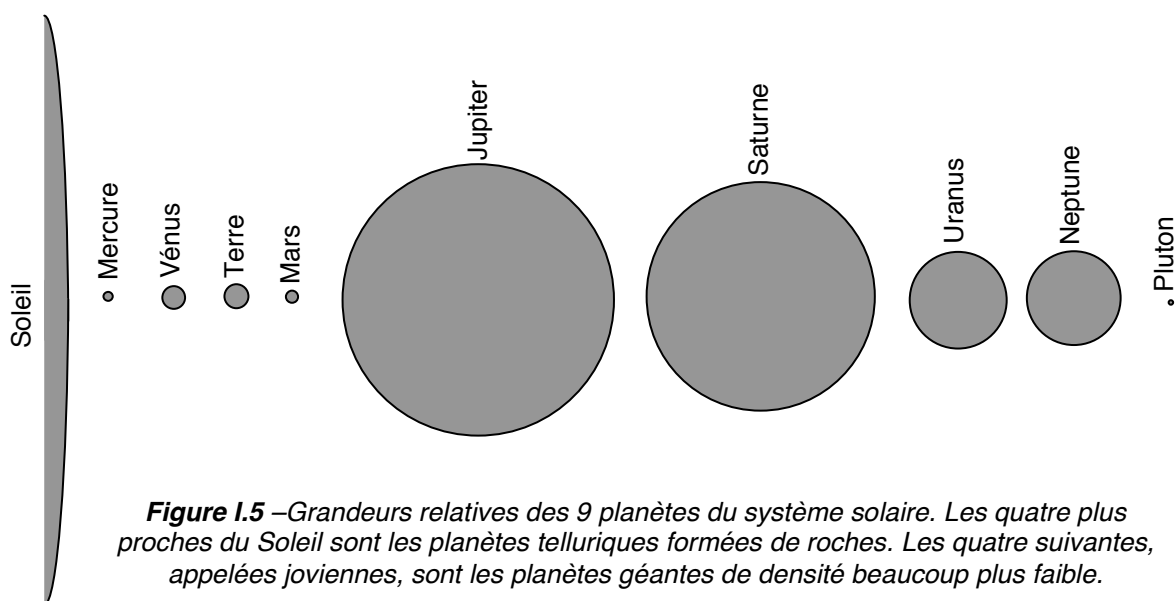


Figure I.5 – Grandeurs relatives des 9 planètes du système solaire. Les quatre plus proches du Soleil sont les planètes telluriques formées de roches. Les quatre suivantes, appelées joviennes, sont les planètes géantes de densité beaucoup plus faible.

2. LE SOLEIL

Sur le plan cosmogonique le soleil est une étoile quelconque (de type spectral G2 V) dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur Terre.

caractéristique	valeur
masse	$1,989 \cdot 10^{30}$ kg
diamètre	$1,392 \cdot 10^9$ m
masse volumique moyenne	1410 kg/m ³
magnitude absolue	+4,83
magnitude apparente	-26,74
puissance rayonnée	$3,83 \cdot 10^{26}$ W
température superficielle	5770 K

Tableau I.4 – Caractéristiques principales du Soleil

La *magnitude* m d'une étoile définit son éclat¹ apparent. L'échelle permet de comparer deux astres lumineux, de magnitude m_1 et m_2 suivant la formule, dite de Pogson :

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log\left(\frac{E_1}{E_2}\right)$$

où E_1 et E_2 sont les éclats respectifs². Par exemple si l'étoile 1 est 100 fois plus lumineuse que l'étoile 2, sa magnitude m_1 sera diminuée de 5 par rapport à m_2 . Cette valeur de m est appelée *magnitude apparente*. Le zéro de l'échelle est défini en fixant arbitrairement la magnitude d'une étoile de référence³.

Les astronomes parlent de *magnitude absolue* M d'une étoile comme étant la magnitude apparente de celle-ci placée à une distance de 10 parsecs. Comme les éclats E sont proportionnels au carré des distances d , on peut écrire :

$$M - m = -2,5 \log\left(\frac{d^2}{100}\right) = -5 \log(d) + 5$$

avec d exprimée en parsec.

Dans le cas du Soleil, $d=1$ UA = $\frac{1}{3,26 \times 63240} = 4,85 \cdot 10^{-6}$ pc et $m=-26,74$. On obtient :

$$M = -26,74 - 5 \log(4,85 \cdot 10^{-6}) + 5 = 4,83.$$

La structure du soleil est schématisée à la figure I.6. On distingue quatre zones particulières; le *noyau*, la *photosphère*, la *chromosphère* et la *couronne*.

C'est dans le **noyau** que se produisent les réactions nucléaires de fusion libérant une énergie considérable. La densité du noyau est très élevée ($\approx 10^5$ kg/m³) ainsi que sa température (15 millions de degrés) et sa pression ($2 \cdot 10^{11}$ bars). Ce sont les conditions

¹ L'*éclat* d'un astre caractérise la sensation lumineuse de la rétine. Ce terme est à l'origine de la notion de *magnitude visuelle* grâce à la loi physiologique de Fechner : la sensation est proportionnelle au logarithme de l'excitation. La valeur de la magnitude dépend du récepteur. Quand on utilise une émulsion photographique on parle de *magnitude photographique*.

² Il s'agit dans cette expression du logarithme à base 10.

³ Pour se rapprocher de l'échelle définie par Ptolémée, on a par exemple choisi d'affecter une magnitude apparente de +2,15 à l'Étoile Polaire.

nécessaires à l'entretien des réactions nucléaires. La densité diminuant avec l'éloignement au centre, les réactions nucléaires cessent de se produire à une distance estimée à un quart du rayon solaire, soit 175 000 km environ. C'est le rayon de la bombe thermonucléaire qui nous donne la vie.

L'énergie produite se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

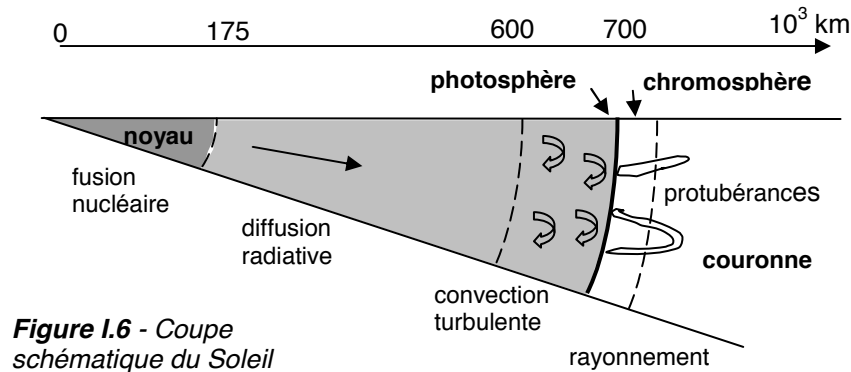


Figure 1.6 - Coupe schématique du Soleil

Compte tenu de la masse considérable du Soleil et des lois de la pesanteur, toute particule devrait être attirée inexorablement vers le centre et le Soleil devrait s'effondrer sur lui-même. Pourquoi notre étoile est-elle stable ? Pour répondre à cette question il faut s'intéresser à sa genèse.

Le soleil est né de la contraction de matière stellaire, gaz et poussières. Devenant de plus en plus dense à cause de l'attraction gravitationnelle, il est devenu de plus en plus opaque. Ainsi la chaleur engendrée par sa contraction, ne pouvant plus être évacuée par rayonnement, le cœur commença à s'échauffer pour atteindre quelques millions de degrés, températures d'amorçage des réactions nucléaires. L'énergie supplémentaire ainsi dégagée fit monter encore la température jusqu'à 15 millions de degrés kelvin. À cette température, les forces de pression de radiation et d'agitation de la matière s'opposent à la force gravitationnelle. La matière étant stabilisée, le soleil cessa de se contracter.

La **photosphère** est une couche d'environ 300 km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil. Sa surface apparaît granuleuse à cause de cellules de convection irrégulières dues à la remontée de bulles de fluide chaud venant y mourir et qui retombent ensuite vers des couches plus profondes. D'environ 1000 km de diamètre, ces cellules ont la forme de *grains de riz* qui peuvent durer quelques minutes. La photosphère apparaît donc comme une surface bouillonnante.

On y observe aussi des *taches* qui constituent l'aspect le plus évident de l'activité solaire. Ces taches correspondent à une température moindre (4500 K) ce qui les fait apparaître de couleur sombre. Elles sont sources d'un très important champ magnétique. C'est grâce à l'observation du mouvement apparent de ces taches que l'on a pu déterminer la période de rotation du Soleil : 25 jours et 9 heures à l'équateur et 30 jours aux pôles. Cette rotation différentielle de la couche superficielle du soleil montre que celui-ci ne se comporte pas comme un solide ; il possède une surface fluide. L'astronome suisse Wolf (1816-1893) a compilé toutes les observations faites depuis Galilée au sujet des taches solaires et a pu mettre en évidence un cycle d'activité d'environ 11 ans.

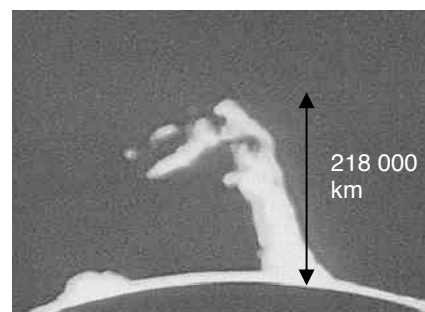


Figure 1.7 - Protubérance solaire

La **chromosphère** est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8 000 km et une température de 20 000 K environ. Le spectre de la chromosphère, analysé par Joseph von Fraunhofer en 1868, mit en évidence la présence d'un élément inconnu à cet époque et baptisé hélium en l'honneur du soleil (Hélios pour les Grecs). Visible lors d'une éclipse totale, la chromosphère est le siège de *protubérances*, jets de gaz pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de km comme le montre la figure 1.7.

Lors d'un maximum d'activité solaire, des particules très énergétiques (protons, électrons) et d'intenses flux de rayonnement X et UV sont envoyés dans l'espace et peuvent atteindre la Terre. Ces *orages magnétiques* créent un *vent solaire* qui peut déformer la magnétosphère et entraîner la destruction de satellites, compromettre des vols spatiaux, perturber les communications radio et même créer de dangereuses surtensions dans les grands réseaux électriques terrestres. Ils sont aussi à l'origine des fameuses *aurores polaires* dues à l'interaction des particules de grande énergie avec les molécules de la haute atmosphère terrestre. Les particules ionisées sont alors canalisées par les lignes du champ magnétique terrestre. Ces lignes étant beaucoup plus resserrées aux pôles, c'est là qu'on observe les aurores boréales ou australes.

La **couronne** est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la Terre, car son éclat se confond avec celui du ciel bleu, elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés. Il semble que l'énergie fournie pour atteindre une telle température soit d'origine magnétique. Les progrès obtenus dans l'étude du soleil et en particulier de sa couronne sont le résultat des analyses réalisées par des instruments en orbite. Les spectres UV et X de la couronne peuvent en effet y être analysés, ce qui est impossible à la surface de la Terre, l'atmosphère étant opaque pour ces longueurs d'onde. Et comme la photosphère et la chromosphère n'émettent pas dans les bandes UV et X, on peut photographier entièrement la couronne sans être gêné par le rayonnement des couches inférieures de notre étoile.

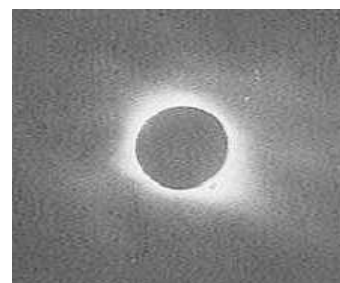


Figure 1.8 - Éclipse de soleil montrant la couronne

L'analyse du *spectre continu* de la lumière émise par la photosphère montre des raies sombres. Celles-ci sont la preuve de l'existence de différents éléments présents en particulier dans la chromosphère. En effet à l'état gazeux, tout élément émet et absorbe un spectre qui lui est propre et que l'on peut déterminer en laboratoire. La présence de certaines raies fournit une indication sur l'existence de certains éléments et la largeur des raies une indication sur l'abondance de ces éléments. L'étude des raies d'absorption du spectre de la photosphère permet de remonter à la composition chimique de l'atmosphère solaire. On y décèle ainsi la présence d'hydrogène, de fer, de calcium, de magnésium, de sodium, de nickel...

Une représentation schématique du système Soleil-Terre est donnée à la figure 1.9. Le Soleil, limité à la photosphère, est vu de la Terre sous un angle de 32 minutes d'arc environ (variable de 31,5' à 32,6'). Une chance pour les astronomes est que cet angle correspond à quelque chose près à celui dont on peut voir la Lune de la Terre; ce dernier varie en effet de 28,5' à 33,5'. Cette propriété permet d'obtenir, de temps en temps, des éclipses totales du soleil. Il est alors possible, depuis la Terre, d'étudier la couronne du soleil grâce à l'occultation par la Lune de la photosphère solaire.

L'orbite de la Terre autour du Soleil définit un plan que l'on appelle *plan de l'écliptique* car les éclipses de soleil ne peuvent se produire que si la Lune s'y trouve. La trajectoire de la Terre dans ce plan est une ellipse de faible excentricité. Lorsque la Terre est au plus près du soleil (vers le 15 janvier), on parle de *périhélie*. La distance Terre-Soleil est dans ce cas de 147 100 000 km. Quand la Terre est le plus éloignée du Soleil (vers la fin juin), on parle d'*aphélie*. La distance Terre-Soleil est alors de 152 100 000 km

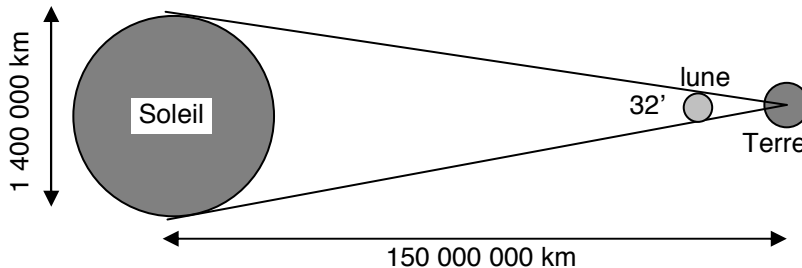


Figure I.9
Schéma des dimensions du système Soleil-Terre (valeurs arrondies)

*** Application I.1 : détermination de la masse du Soleil**

Soit M_S la masse du Soleil.

La Terre (T), de masse M_T , évolue autour du Soleil (S) à une vitesse sensiblement constante : $V \approx 30$ km/s. Son orbite est pratiquement circulaire, de rayon $R = 1$ UA. Considérons les repères $R_1(S, \vec{x}_1, \vec{y}_1)$ fixe et $R_2(S, \vec{x}_2, \vec{y}_2)$ en rotation uniforme avec $(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = \theta$, comme indiqué à la figure ci-contre.

Le vecteur position de la Terre par rapport à R_1 s'écrit :

$$\vec{ST} = R \vec{x}_2.$$

La vitesse de la Terre par rapport au repère R_1 est donnée par :

$$\left. \frac{d\vec{ST}}{dt} \right)_{R_1} = R \dot{\theta} \vec{y}_2 = V \vec{y}_2.$$

Son accélération, toujours par rapport à ce même repère R_1 , s'écrit :

$$\left. \frac{d^2\vec{ST}}{dt^2} \right)_{R_1} = -V \dot{\theta} \vec{x}_2 = -\frac{V^2}{R} \vec{x}_2 \quad \text{puisque} \quad V = R \dot{\theta}.$$

On peut considérer en première approximation que la Terre n'est soumise qu'à la seule force d'attraction gravitationnelle du Soleil que l'on peut écrire :

$$\vec{F} = -G \frac{M_T \cdot M_S}{R^2} \vec{x}_2 \quad \text{où} \quad G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \quad \text{est la constante universelle de gravitation.}$$

En considérant le repère R_1 galiléen, le principe fondamental de la mécanique permet d'écrire

$$M_T \left. \frac{d^2\vec{ST}}{dt^2} \right)_{R_1} = \vec{F}$$

$$\text{soit} \quad -M_T \frac{V^2}{R} \vec{x}_2 = -G \frac{M_T \cdot M_S}{R^2} \vec{x}_2 \quad \text{ou encore :} \quad \frac{V^2}{R} = G \frac{M_S}{R^2}.$$

$$\text{On en déduit la masse } M_S \text{ du Soleil :} \quad M_S = \frac{V^2 R}{G} = \frac{(30000)^2 \cdot 1,5 \cdot 10^{11}}{6,672 \cdot 10^{-11}} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg.}$$

