SATELLITES ET PLANETES

1. LE SYSTEME SOLAIRE.

1.1. DESCRIPTION.

Le système solaire est un ensemble de 9 planètes et d'une multitude d'éléments dits mineurs: des astéroïdes et des comètes qui gravitent autour du Soleil, et des satellites (au nombre de 31) autour des planètes.
Les orbites des planètes et des astéroïdes sont pratiquement toutes contenues dans un même plan appelé plan de l'ecliptique.

LE SOLEIL.

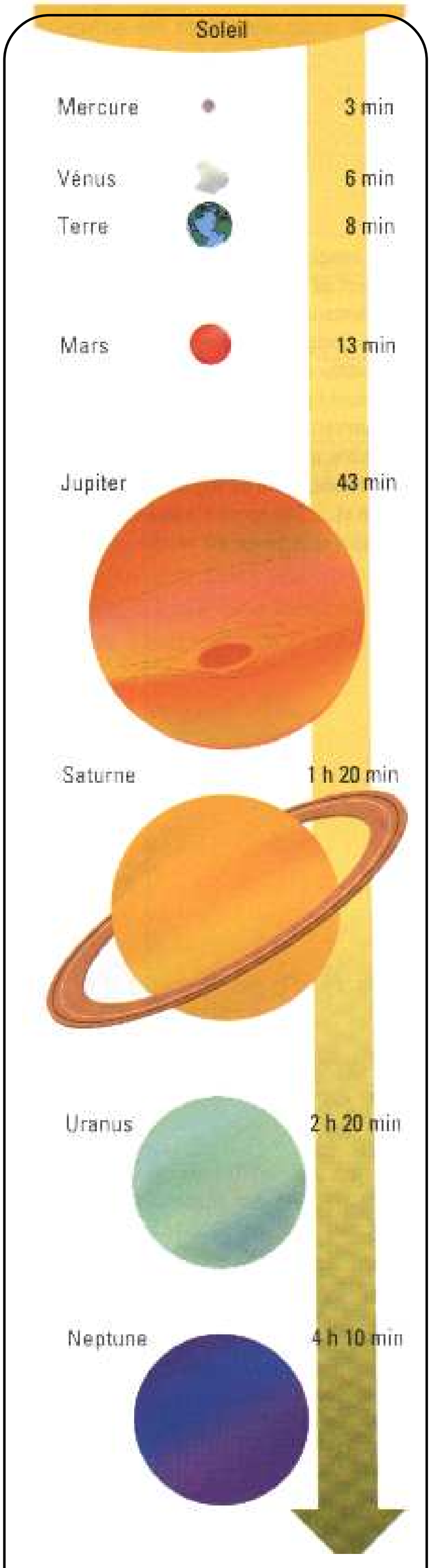
Le Soleil dont le nom vient du grec «sélas» (lumière, splendeur) est une énorme boule de gaz incandescents (son rayon est égal à 10^9 fois celeui de la Terre et sa masse est égale à plus de 300 000 fois celle de notre globe).
On estime son âge à 5 milliards d'années environ. La température du Soleil est de 6 000°C en surface.
Si précieuse pour la Terre et ses habitants, ce n'est qu'une banale étoile parmi les cent milliards de soleils qui composent notre galaxie. Mais sa chaude lumière a permis l'émergence de la vie sur notre planète. Le Soleil rayonne chaleur et lumière autour de lui. La Terre en reçoit une infime partie. En l'absence de Soleil, la Terre serait plongée dans les ténèbres et sa température ne dépasserait pas - 250°C. La vie y serait impossible.

La température de sa surface est de l'ordre de 6 000 K, mais le coeur est à plusieurs millions de degrés et est le siège de réactions thermonucléaires; le Soleil est à l'état gazeux.
La photosphère montre à l'observation un aspect granulaire dû aux différences de température entre les diverses parties de la surface. Tâches, éruptions, sont les manifestations de l'activité solaire.

Les tâches solaires apparaissent en sombre parce qu'elles ont une température inférieure d'environ 1 500°C à celles des régions voisines.
La durée de la vie des tâches, leur nombre, présentent une évolution périodique: deux maximums d'activité sont séparés de onze années en moyenne, ce qui définit le cycle solaire.
L'atmosphère solaire est parfois secouée par des manifestations très violentes: les éruptions solaires, accompagnées d'émissions lumineuses très intenses.
Tâches, éruptions solaires sont révélatrices de la présence d'un champ magnétique.

LES PLANETES.

- Les ***4 planètes*** les plus proches du Soleil sont: Mercure, Vénus, la Terre et Mars. Elles sont de tailles moyennes et possèdent un sol rocheux: on les appelle les planètes telluriques.
- Viennent ensuite les ***4 planètes géantes*** gazeuses: Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.



Temps mis par la lumière du Soleil pour atteindre les planètes.

Combien y en a-t-il exactement dans notre système solaire ?

Notre système solaire abrite, théoriquement, neuf planètes. «Théoriquement», car la liste pourrait s'alonger .... ou rétrécir ! Tout dépend en effet du sens donné au mot «planète». Si le statut de planète est accordé à tout corps orbitant autour du Soleil, alors le système solaire compte douze planètes, voire plus. Car les astronomes ont repéré en 2002 trois objets évoluant dans la ceinture de Kuipper, le térritoire des comètes qui s'étend de 4 500 à 7 500 millions de kilomètres du Soleil. Certes, Quaoar, Ixio et Varuna, les trois nouvelles, sont menues: leur diamètre varie entre 900 et 1 250 km, contre 2 300 km pour Pluton. Elles n'en orbitent pas moins autour du Soleil ! Et la liste n'est pas forcément close, tous les objets du secteur n'étant pas recensés. Cependant, les astronomes ne sont pas d'accord entre eux pour accorder le nom de planètes aux trois nouvelles prétendantes. Pour l'école «conservatrice», seuls les objets très massifs à l'orbite à la fois quasi-circulaire et peu inclinée appartiendraient en effet à la famille; ceux de la ceinture de Kuipper ne seraient alors que de grosses comètes... Tout comme Pluton, en raison de son orbite atypique et de sa petite taille alors que les manuels la recensent pourtant comme une planète depuis sa découverte en 1930 ! Au final, le système solaire ne compterait donc que huit «vraies» planètes.... Un chiffre à maintenir au conditionnel ! Car des hypothèses expliquent certaines astronomes, comme la fin abrupte de la ceinture de Kuipper, par l'existence d'une ou plusieurs vraies planètes qui nous resteraient encore cachées... Reste à les repérer.

Les planètes tirent leur nom de la mythologie. ***Cinq planètes*** sont aisèment visibles à ***l'oeil nu***. Les Anciens les avaient donc déjà remarquées. Ils les considéraient comme des divinités ayant une fonction en rapport avec leur éclat ou avec leur mouvement dans le ciel. Leur nom actuel correspond à celui que leur ont donné les Romains en transposant dans leur propre mythologie des divinités grecques:

La planète qui se déplace le plus vite parmi les étoiles a été identifiée à ***Mercure*** (***Hermès*** chez les Grecs), ***messager des dieux***, fils de Jupiter et de Maïa, coureur infatigable, que l'on représente avec des ailes aux talons. Puis, il est devenu ***dieu des marchands ambulants et du commerce*** en raison de sa grande mobilité.

La planète dont l'éclat surpasse dans le ciel celui de toutes les étoiles a été identifiée à ***Vénus*** (***Aphrodite*** chez les Grecs), déesse de ***l'Amour et de la Beauté***.

La planète dont la teinte rougeâtre rappelle la couleur du sang a été identifiée à ***Mars*** (***Arès*** chez les Grecs), ***dieu de la Guerre***.

La planète très brillante qui trône souvent toute la nuit parmi les étoiles a été identifiée à ***Jupiter*** (***Zeus*** chez les Grecs), ***dieu du Ciel***, père et maître des dieux.

La planète qui se déplace le plus lentement parmi les étoiles a été identifiée à ***Saturne*** (le cruel titan ***Kronos*** chez les Grecs qui dévorait ses enfants au fur et à mesure que son épouse Rhéa les mettait au monde. On associait donc le temps à la mort), ***dieu du Temps***, représenté avec des ailes et un sablier ou sous les traits d'un vieillard portant une faux.

LES ASTEROIDES.

Ce sont des objets de très petite taille, rocheux et de formes diverses. Ils sont estimés à 500 000, deux mille seulement sont numérotés, leur diamètre maximal n'excède pas 200 km. Ils sont classés en trois familles d'après leur spectre.
Ils se répartissent en deux anneaux:

- la ceinture principale située entre Mars et Jupiter;
- la ceinture de Kuiper au-delà de Pluton.

LES COMETES

sont des objets encore plus petits, formés de glace et de roches.
Leurs passages et observations sont cités dans les textes très anciens et leur aspect spectaculaire a toujours exercé une forte impression sur l'humanité qui les a longtemps associées à des catastrophes.
Des myriades d'entre elles occupent, très loin aux confins du système solaire, l'immense nuage sphérique de Oort. (du nom de l'astronome néerlandais Jan Hendrick Oort). Ces astéroîdes, dont la taille varie de quelques km à quelques centaines de km, peuvent sortir du nuage sous l'effet de perturbations crées par le passage proche d'une étoile ou d'un nuage moléculaire. S'ils viennent à passer près du Soleil, ils deviennent des comètes.
Certaines disparaissent comme Biela, soit parce qu'elles se désagrègent, en constituant les pluies d'étoiles filantes, soit parce que leur trajectoire est hyperbolique.
Les autres réaparaissent périodiquement telle la comète de Halley (de période de 76 ans), ou celle de Encke (3,33 abs).
On en découvre 8 à 10 par an; 2 000 ont été déjà répertoriées.

1.2. LES SATELLITES NATURELS.

A l'exception de Mercure et de Vénus, les planètes principales du système solaire possèdent un ou plusieurs satellites. Il est possible de les classer, en fonction de la taille, en trois grandes familles:

les gros satellites (diamètres moyens compris entre 2 000 et 6 000 km), comme la Lune, les quatre satellites principaux de Jupiter (Io, Europe, Ganymède et Callisto) et Triton, principal satellite de Neptune;

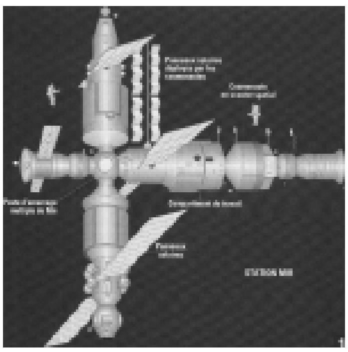
les petits satellites (diamètres moyens compris entre 200 et 2 000 km), tels Rhéa, Dioné, Téthys, Encelade, Mimas et Japet (satellites de Saturne), Miranda, Ariel, Umbriel, Titania et Obéron (satellites d'Uranus), Néréide (satellite de Neptune) et Charon (satellite de Pluton).

les petits corps (diamètres moyens inférieurs à 200 km), qui, contrairement aux satellites précédents, qui sont sphériques, ont souvent des formes irrégulières.

La Lune tourne sur elle-même à 17 km/h, mais cette rotation s'accomplit exactement dans le même temps et le même sens que la révolution sidérale, ce qui vaut à la Lune tourner toujoursla même face vers la Terre

1.3. A QUOI SERVENT LES SATELLITES ARTIFICIELS ?

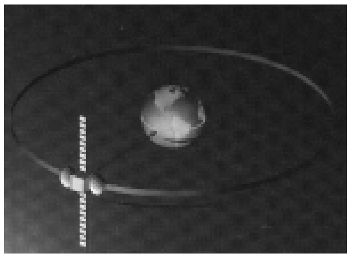
Il existe un grand nombre de satellites artificiels autour de la Terre. Ils sont envoyés à l'aide de fusées comme la fusée Ariane ou avec les navette américaines comme Endeavour:



La ***station russe MIR*** est le satellite artificiel le plus connu. Un laboratoire où des hommes se rendaient pour des séjours scientifiques plus ou moins longs. Cette station tournait autour de la Terre. Des récepteurs de lumière géneret des courants électriques permettant le fonctionnement des appareils de survie et des expériences particulières réalisées par les spationautes.

Les Américains ont préféré utiliser un orbiteur, comme les ***navettes spatiales*** Discovery et Endeavour. Ces navettes sont mises en orbite pour quelques jours, tournent autour de la Terre et peuvent ensuite revenir sur Terre.

Les ***satellites géostationnaires*** tournent autour de la Terre en une journée, à 36 000 km au-dessus de l'équateur. Comme la Terre tourne également sur elle-même en une journée, ils restent toujours au même endroit dans le ciel par rapport à la Terre. Ces satellites servent:



- à recevoir et à retransmettre les communications téléphoniques, les émissions de radio et de télévision (tdf1, Eutelstat, etc..);
- certains satellites «photographient» toute l'atmosphère fournissant ainsi des précieuses informations pour la météorologie de la planète (Météostat);
- d'autres servent à localiser des bateaux, etc..

Les antennes paraboliques captent sur Terre les émissions que renvoient les satellites.

Le ***satellite SPOT*** tourne autour de la Terre à des altitudes inférieures à 1 000 km sur des orbites différentes de celles des géostationnaires.
Ce satellite a une curieuse propriété. Il passe au même endroit au-dessus de la Terre à la même heure. Par exemple, il survole toujours la France vers 10 heures et 22 heures. SPOT gravite en passant au-dessus des pôles. Comme la Terre tourne sur elle-même, le satellite peut ainsi explorer toute la Terre.

2. LOI DE GRAVITATIONNELLE UNIVERSELLE DE NEWTON.

"*Deux corps ponctuels A et B, de masse m_A et m_B, séparés par une distance d, exercent l'un sur l'autre des forces attractives, de même valeur:*

$$\mathbf{F_{A/B} = F_{B/A} = G.\frac{m_A m_B}{d^2}}$$

avec

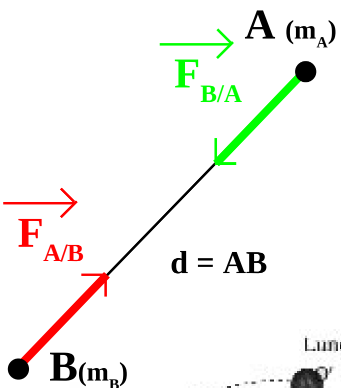
G est appelée constante de gravitation universelle

$\mathbf{G = 6{,}67.10^{-11} m^3.kg^{-1}.s^{-2}}$

F en newton

m_A et m_B en kilogrammes

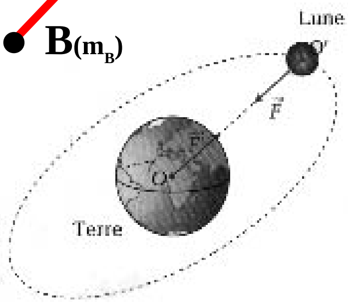
d en mètre



*Les forces attractives $F_{A/B}$ et $F_{B/A}$ sont appelées **forces d'interaction gravitationnelle**.*"

Une pomme exerce donc sur la Terre une force de valeur égale à celle que la Terre exerce sur elle !!!!

L'idée de génie consiste à lier pour la première fois dans l'histoire des sciences, les phénomènes se déroulant sur Terre (la chute du boulet de Galilée) et dans l'Univers (rotation des corps autour du Soleil). Une même force attire le boulet et la Lune, l'attraction de la Terre



Cette loi de gravitation s'écrit donc de la même façon pour des corps volumineux présentant une répartition sphérique de masse . Un ***corps à répartition sphérique de masse*** est un corps homogène ou formé de couches concentriques homogènes de matière.

C'est le cas des planètes et des étoile.

$$\mathbf{F_{T/L} = F_{L/T} = G.\frac{m_T . m_L}{d^2}}$$

C'est la force gravitationnelle exercée par la Terre qui attire la Lune et la maintient en orbite autour de la Terre. A l'inverse, la Lune exerce donc sur la Terre une force de valeur égale à celle que la Terre exerce sur elle !!!!

Imaginons un instant que cette force gravitationnelle disparaisse. La Lune partirait comme la pierre d'une fronde

après que le lanceur l'ait libérée. Cette force est considérable. Pour retenir notre satellite, il serait alors nécessaire de l'attacher à la Terre par un câble. Même avec le plus résistant des aciers, le diamètre d'un tel câble devrait dépasser 500 km !!

Nous ne pouvons pas percevoir directement l'effet de l'attraction lunaire sur notre corps mais une de ses manifestations spectaculaires est le phénomène des marées.
De manière très générale, on désigne par effet de marée la réponse d'un corps placé dans un champ gravitationnel inhomogène (variant d'un point à l'autre). Les diverses parties du corps subissent alors des attractions différentes dont résultent des tensions internes qui les déforment. Les marées terrestres sont provoquées par les variations du champ gravitationnel lunaire d'un bout à l'autre de la Terre. Le Soleil, plus lointain, mais beaucoup plus massif, contribue aussi aux marées et produit un effet qui équivaut à 40% de celui de la Lune. Les régions tournées vers la Lune subissent une attraction plus forte que celles situées dans la direction opposée. Il en résulte une tension longitudinale à laquelle l'ensemble de la Terre répond, mais l'effet est particulièrement sensible sur les masses fluides océaniques. Dans certaines conditions, les effets de la marée prennent des proportions cataclysmiques. Ainsi, un passage à faible distance d'un corps très massif peut briser un astre plus petit.
Les astronomes ont été les témoins privilégiés d'un tel événement lors du passage de la comète Shoemaker-Levy au voisinage de Jupiter, en 1992. Un premier passage, le 7 juillet, à 71 400 km de la surface de Jupiter, conduisit à une rupture du noyau de la comète en 21 morceaux dont les tailles s'échelonnaient entre 1 et 5 km. Ces fragments entrèrent directement en collision avec la planète lors de leur second passage, du 16 au 22 juillet 1994. Les impacts successifs provoquèrent de violentes perturbations dans l'atmosphère de Jupiter dont les effets furent observées de la Terre.
La gigantesque planète Jupiter impose aussi une force de marée considérable à son satellite Io. Celui-ci, qui orbite à 422 000 km, est littéralement mâché par la gravitation de Jupiter: son noyau est maintenu liquide est sa surface est couverte des plus grands volcans actifs du système solaire.

A quoi tient la découverte des planètes extrasolaires ?

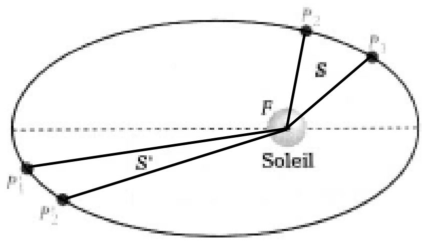
Réfléchissant trop peu de lumière pour être “vues”, les planètes extrasolaires (tournant autour d’autres étoiles que le Soleil) ne peuvent être découvertes qu’en analysant la vitesse d’éloignement des étoiles par rapport à la Terre. Un système planétaire tourne autour d’un centre de gravité décalé par rapport à l’axe de l’étoile en son centre. Cela induit des variations infimes de la vitesse radiale des étoiles qui suffisent à signaler la présence d eplanètes ! Depuis 1995, et la première découverte à l’observatoire de Haute-Provence, près de 110 exoplanètes ont ainsi été débusquées. Mais pour repérer des planètes peu massives, telles que la Terre, il faudra persévérer sur d’autres voies prometteuses, comme la photométrie, qui mesure la baisse d’intensité lumineuse résultant du passage d’une planète devant son étoile.

La Lune a brassé la soupe primitive.

Il y a trois milliards d’années, la rotation accélérée de la Lune autour de la Terre multipliait les marées. L’intense brassage aurait favorisé l’émergence de la vie.

Sans Lune, nulle vie sur Terre n’aurait été possible. Quatre milliards d’années plus tôt, alors que la vie peine à émerger, un coup de pouce salvateur est venu de notre satellite. Des marées, beaucoup plus violentes et fréquentes qu’aujourd’hui, ont bouleversé la salinité des côtes, favorisant l’apparition des premières biomolécules (ADN ou ARN).
A cette époque, la Lune est encore toute jeune. Selon l’hypothèse la plus répandue, cela ne fait qu’un milliard d’années qu’elle est née des débris engendrés par la collision de la Terre avec un énorme astéroïde. Elle n’a pas encore pris ses distances avec la planète bleue et ne se trouve qu’à 200 000 km d’elle, moitié moins loin qu’aujourd’hui. La Terre tourne également beaucoup plus vite et accomplit sa révolution en moins de cinq heures.
Le cycle des marées, dans ces conditions, ne devait pas excéder une poignée d’heures, entre deux et six, fournissant les conditions idéales pour brasser la soupe primitive qui se mijote alors. L’alternance rapide des marées a agi à la manière d’une PCR géante, la machine de labo utilisée pour amplifier à vitesse grand V l’ADN: au fil des cycles, le smolécules précurseurs sont arrangées en double brin, trouvant par là un moyen parfait de se mulitplier. Faute d’un système de marées aussi performant, Europe et Mars n’auraient pu fournir de berceau assez confortable pour voir émerger la vie.

3. LES LOIS DE KEPLER.



Le mouvement des planètes est étudié dans le référentiel héliocentrique. Il obéit aux lois de Kepler.

Exploitant les résultats des observations de son maître Tycho Brahe (1546 - 1601), astronome danois, Johannes Kepler formule les trois lois décrivant le mouvement des planètes autour du Soleil:

Première loi: loi des trajectoires.
Les centres d’inertie des planètes décrivent des ellipses dont le Soleil occupe l’un des foyers;

Deuxième loi: loi des aires.
Les aires balayées, pendant des durées égales, par le segment reliant le centre d’une planète à celui du Soleil, sont égales;

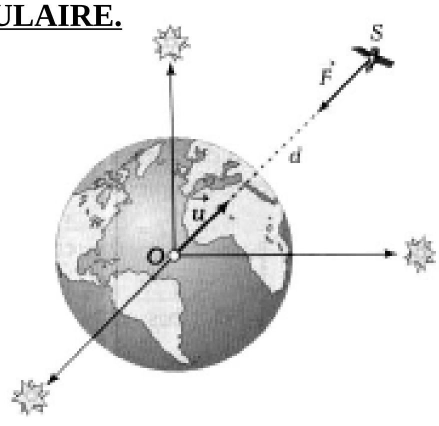
Troisième loi: loi des périodes.
Le carré de la période de révolution T d’une planète est proportionnel au cube du demi-grand axe a de l’ellipse. $\frac{T^2}{a^3} = Cste$

planète	T (10^7 s)	a (10^8 km)	$\frac{T^2}{a^3}$ ($s^2 \cdot m^{-3}$)
Vénus	1,94	1,08	$2,99 \times 10^{-19}$
Terre	3,16	1,50	$2,96 \times 10^{-19}$
Mars	5,94	2,28	$2,98 \times 10^{-19}$
Jupiter	37,4	7,78	$2,98 \times 10^{-19}$

4. MOUVEMENT D’UN SATELLITE TERRESTRE A ORBITE CIRCULAIRE.

Le mouvement des satellites est étudié dans le référentiel géocentrique.

4.1. UNE ACCELERATION CENTRIPETE.



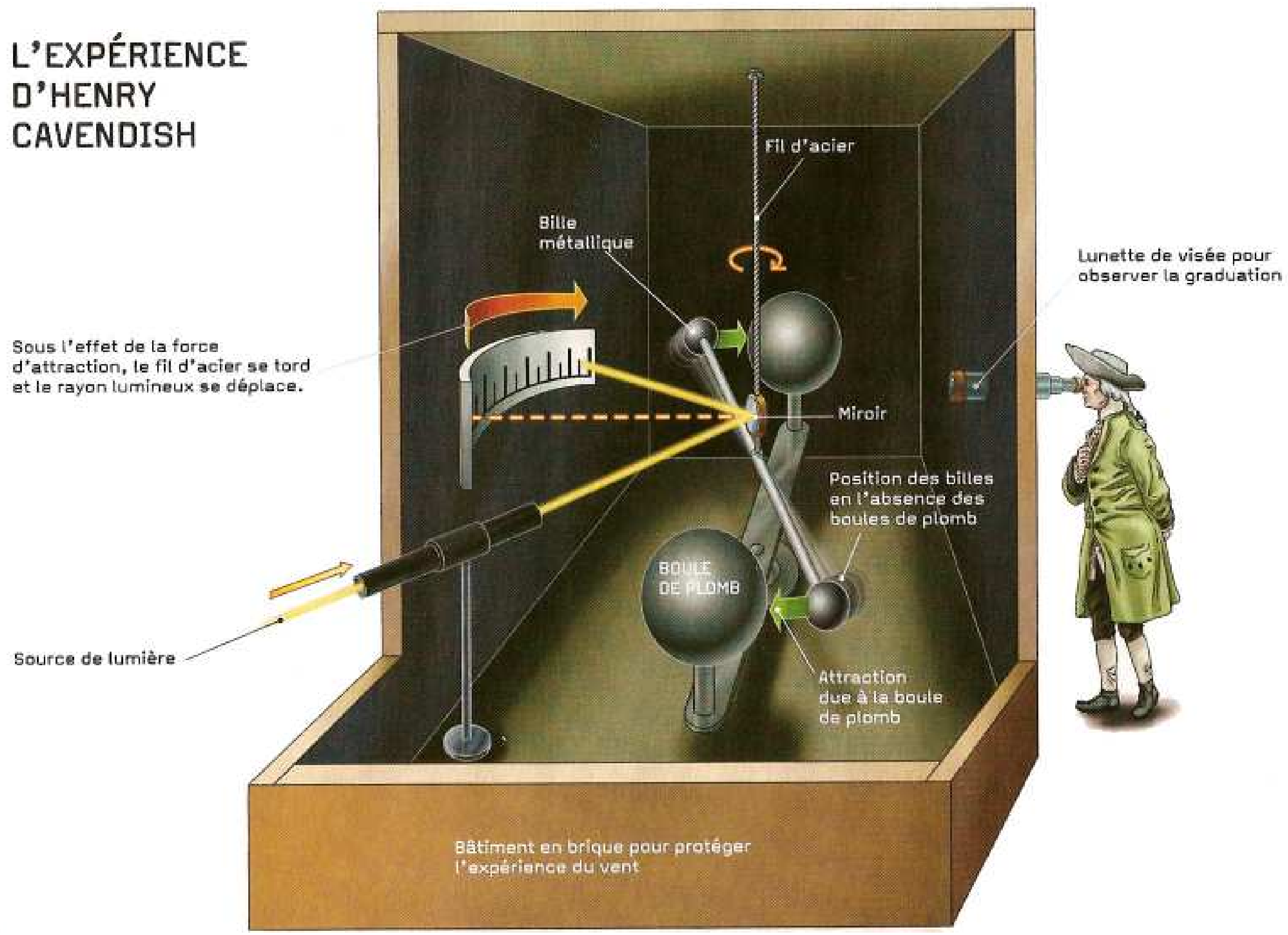
Les satellites terrestres obéissent aux lois de Kepler: la plupart d’entre eux ont un mouvement elliptique autour de la Terre. Mais nous allons étudier le cas particulier où me centre d’inertie d’un satellite S, de masse m, décrit une ***orbite circulaire*** autour de la Terre, de masse M. Il est situé à la distance de la Terre. La seule force s’exerçant sur le satellite est la force de gravitation.

La deuxième loi de Newton permet d’écrire: $\Sigma\overrightarrow{F}_{Ext} = \overrightarrow{F}_{Terre/Satellite} = m.\overrightarrow{a}$

On en déduit $\overrightarrow{a} = - G \frac{M_{Terre}}{d^2} \overrightarrow{u}$ (1) avec $\overrightarrow{u}$ le vecteur unitaire.

Dans le référentiel géocentrique, le vecteur accélération a du centre d’inertie du satellite est:
- constamment orienté vers le centre de la Terre: il est centripète;
- garde une valeur constante lorsque la trajectoire est circulaire;
- indépendante de la masse du satellite.

COMMENT SAIT-ON CE QUE PESE LA TERRE ?



L'idée vient d'un Anglais, John Michell. Tous les objets dans l'Univers, songe-t-il, s'attirent les uns les autres, d'autant plus fort que leur masse est grande et que la distance qui les sépare est petite… ou, plus exactement, le carré de cette distance.

Ainsi, nous sommes attirés par l'énorme masse de la Terre vers son centre, situé à 6,4 millions de mètres sous nos pieds. Si on comprime la Terre de moitié, elle aura toujours la même masse alors qu'on sera deux fois plus près du centre et la pesanteur sera donc multipliée par quatre. Si, au contraire, la Terre est deux fois plus grande mais garde toujours la même masse, l'attraction sera quatre fois plus faible. Vous suivez ?

Bon. Est-ce que ça marche aussi avec une miniplanète de la taille d'un gros ballon de plage et qui serait faite, mettons, en plomb ? Quelle serait son attraction ? Aussitôt, Michell invente un appareil destiné à la mesurer.

Deux petites balles métalliques suspendues à un fil d'acier sont attirées par deux grosses boules de plomb pesant chacune environ 40 tonnes, de sorte que le fil d'acier se tord un peu (voir schéma). Michell avait testé son fil d'acier avant de l'installer et savait que telle force appliquée sur les deux balles donnait tel angle de torsion.

C'est Henry Cavendish qui hérite de l'appareil à la mort de Michell. En mesurant la torsion du fil d'acier, il découvre que l'attraction que l'on ressent à 1 m du centre de chacune des boules de plomb est 3,6 millions de fois plus faible que l'attraction terrestre.

D'où vient une telle différence ? C'est que nos miniplanètes de plomb sont vraiment très, très petites direz-vous ! Sauf que ce n'est pas tant une question de taille que de masse. Si on gonfle une des boules de plomb sans changer sa masse jusqu'à ce qu'elle soit aussi grande que la Terre (6,4 millions de mètres de rayon), on sera 6,4 millions de fois plus loin de son centre et son attraction sera donc encore (6,4 millions au carré) 41 millions de millions de fois plus faible que dans l'expérience de Cavendish !

Autrement dit, comparée à la Terre, cette boule de plomb surgonflée aurait une attraction environ 148 millions de millions de millions de fois (3,6 millions fois 41 millions de millions) plus faible que l'attraction terrestre ! On tient là le cœur du raisonnement : comparer l'attraction de la Terre à celle d'un objet dont on connaît la masse. Résumons-nous : grâce à la mesure de Cavendish, on sait maintenant qu'une planète de la même taille que la Terre, mais dont la masse ne ferait que 40 tonnes aurait une attraction 148 millions de millions de millions de fois plus faible que l'attraction terrestre. Il n'y a plus qu'à répondre à la question qui tue : pourquoi cette différence d'attraction entre notre vraie Terre, et la planète ultralégère de même taille ? Parce que la masse de la Terre est 148 millions de millions de millions de fois plus grande que les 40 tonnes de la boule de plomb, pardi ! D'où le résultat de la multiplication de 148 millions de millions de millions par 40 tonnes : environ 6000 millions de millions de millions de tonnes (ou 6.10^{21} tonnes), le poids de notre chère vieille Terre. ●

Remarque importante: ***état d'impesanteur***.

Un corps de masse m_A qui se trouve dans un satellite en orbite autour de la Terre est soumis à la force d'attraction gravitationnelle qu'exerce la Terre sur lui.

Si ce corps n'est pas en contact avec les parois du satellite, cette force gravitationnelle est la seule force qui s'exerce sur lui.

La deuxième loi de Newton permet d'écrire: $\Sigma\vec{F}_{Ext} = \vec{F}_{Terre/Corps\ A} = m_A.\vec{a}$

On en déduit l'expression du vecteur accélération $\vec{a}_A$ de ce corps:

- par rapport au référentiel géocentrique

$$\vec{a}_A = - G \frac{M_{Terre}}{d^2} \vec{u}$$

C'est le même vecteur accélération que celui du centre d'inertie du satellite. Le corps de masse m_A a donc le même mouvement que la station spatiale dans le référentiel géocentrique.

- par rapport à un référentiel lié à la station spatiale, le corps de masse m_A, immobile, a donc une accélération nulle $\vec{a}_{Corps/Sat} = \vec{0}$; dans ce référentiel, il semble donc n'être soumis à aucune force extérieure et «flotte». Ce corps «ne tombe pas» par rapport au satellite: tout se passe comme s'il n'avait plus de poids. Il est en ***état d'impesanteur***.

Remarque. Le corps de masse m_A est toujours soumis à la force d'attraction gravitationnelle $\vec{F}_{T/Corps}$ exercée par la Terre, mais la deuxième loi de Newton ne s'applique pas dans le référentiel non Galiléen lié à la station. On a:

$$\vec{a}_{Corps/RéfSat} = \vec{0}, \text{ alors que } \Sigma\vec{F}_{Ext} \neq \vec{0}$$

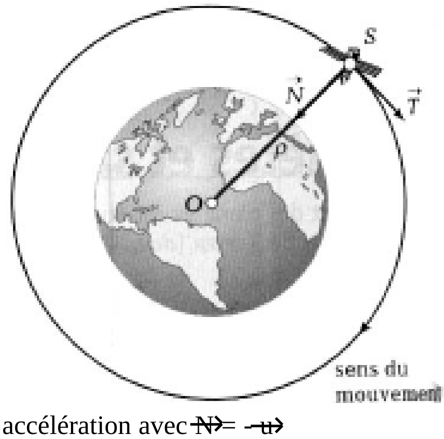
Pourquoi un liquide en apesanteur se met-il en boule ?

Au sol, l'eau reste sagement au fond du verre car elle subit la gravitation de la Terre: elle épouse alors la forme du récipient et sa surface libre est horizontale. On note toutefois, une légère remontée du liquide au contact de la paroi du verre. Ce discret écart par rapport à l'horizontalité parfaite est la conséquence de la «tension superficielle» de l'eau dont la surface se comporte comme une membrane élastique. Sur la Terre, cette tension ne peut s'exprimer que sur de petites quantités de liquide (une goutte d'eau par exemple) où elle peut l'emporter sur la gravité. En revanche, l'apesanteur permet à la tension superficielle de s'exprimer pleinement. Dans ces conditions, un liquide, adopte la forme sphérique, laquelle minimise sa surface pour un volume donné. C'est ce qui se passe aussi sur la Terre avec des bulles de savon dont la légéreté permet à la tension superficielle de dominer.

4.2. LE REPERE DE FRENET.

On définit le repère de Frenet $(S; \vec{N}; \vec{T})$ un repère mobile lié au satellite et défini par:

- $\vec{T}$ un vecteur unitaire porté par la tangente à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement;
- $\vec{N}$ un vecteur unitaire perpendiculaire à $\vec{T}$ et dirigé vers le centre de la Terre.



Dans le repère de Frenet il est démontré que le vecteur accélération $\vec{a}$ a pour expression:

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{T} + \frac{v^2}{R}\vec{N} \quad (2)$$

avec R le rayon de la trajectoire circulaire du satellite.

4.3. UNE VITESSE CONSTANTE.

Dans le cas du mouvement circulaire du satellite, on a donc deux expressions (1) et (2) de l'accélération avec $\vec{N} = -\vec{u}$

On en déduit $\vec{a} = G \frac{M_{Terre}}{d^2}\vec{N} = \frac{dv}{dt}\vec{T} + \frac{v^2}{R}\vec{N}$

Pour que cette égalité soit juste, on en déduit que

- $\frac{dv}{dt} = 0$ soit la valeur de la vitesse v est constante.
  Dans le référentiel géocentrique, le mouvement du centre d'inertie du satellite en orbite circulaire est uniforme.
- Puisque $d = R = R_{Terre} + h$, avec h l'altitude du satellite $G \frac{M_{Terre}}{d^2} = \frac{v^2}{R}$ soit $v = \sqrt{\frac{G.M_{Terre}}{R_{Terre} + h}}$

La vitesse du satellite en orbite circulaire autour de la Terre n'est fonction que de son altitude:

- elle diminue lorsque l'altitude augmente;
- elle est indépendante de la masse m du satellite.

4.4. UNE PERIODE DE REVOLUTION.

La durée T d'un tour complet d'un satellite autour de la Terre, ou période de révolution, se calcule par la relation

$$T = \frac{2.\pi}{v} \quad \text{soit} \quad T = 2.\pi\sqrt{\frac{d^3}{G.M_{Terre}}}$$

La période d'un saellite augmente avec l'altitude du satellite.

Remarque.

Nous pouvons remarquer que $\frac{T^2}{d^3} = \frac{4.\pi^2}{G.M_{Terre}}$ = Cste.

La valeur de cette constante est la même pour tous les satellites de la Terre.

Les lois de Kepler sont également valables pour les planètes: il faut alors considérer le Soleil à la place de la Terre et le référentiel héliocentrique à la place du référentiel géocentrique.

Ainsi, pour toutes les planètes du Soleil, dont la masse est M_{Soleil}, nous avons $\frac{T^2}{d^3} = \frac{4.\pi^2}{G.M_{Soleil}}$ = Cste.

Remarque.

La relation $\frac{T^2}{d^3}$ = Cste est valable pour les planètes selon la troisième loi de Kepler.

Mais la valeur de cette constante, dans le cas des planètes, est une extrapolation de l'étude du cas particulier des satellites en rotation circulaire autour de la Terre. Or, la première loi de Kepler affirme que les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers. Rigoureusement, dans le cas des planètes, le rapport $\frac{T^2}{d^3}$ n'est pas égal à $\frac{4.\pi^2}{G.M_{Soleil}}$

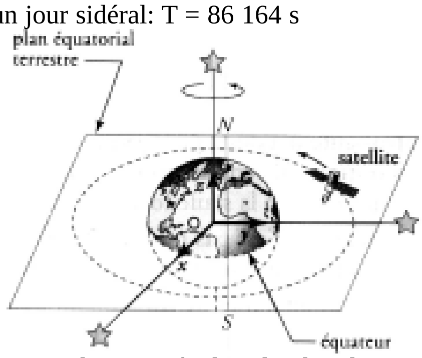
Mais les observations montrent que, bien que les trajectoires des planètes soient elliptiques, l'excentricité des ellipses est tellement faible pour la plupart d'entre elles que l'on peut considérer, avec une assez bonne précision, que leur moouvement est pratiquement circulaire uniforme. Il est donc possible d'extrapoler le cas particulier du satellite en rotation autour de la Terre au cas des planètes en rotation autour du Soleil.

4.5. CAS PARTICULIER DES SATELLITES GEOSTATIONNAIRES.

Dans le référentiel géostationnaire, un satellite, dont la révolution s'effectue à une certaine altitude dans le plan de l'équateur terrestre et dans le même sens que celui de la rotation de la Terre, peut avoir une vitesse angulaire de révolution égale à celle de la rotation de la Terre. Il reste alors continuellement à la verticale d'un même point de l'Equateur terrestre. Ce satellite, immobile par rapport à la Terre, est dit géostationnaire.

La période de révolution du satellite doit être égale à la période de rotation de la Terre, soit un jour sidéral: T = 86 164 s

On peut alors calculer l'altitude h du satellite à partir de la relation: $\frac{T^2}{d^3} = \frac{4.\pi^2}{G.M_{Soleil}}$



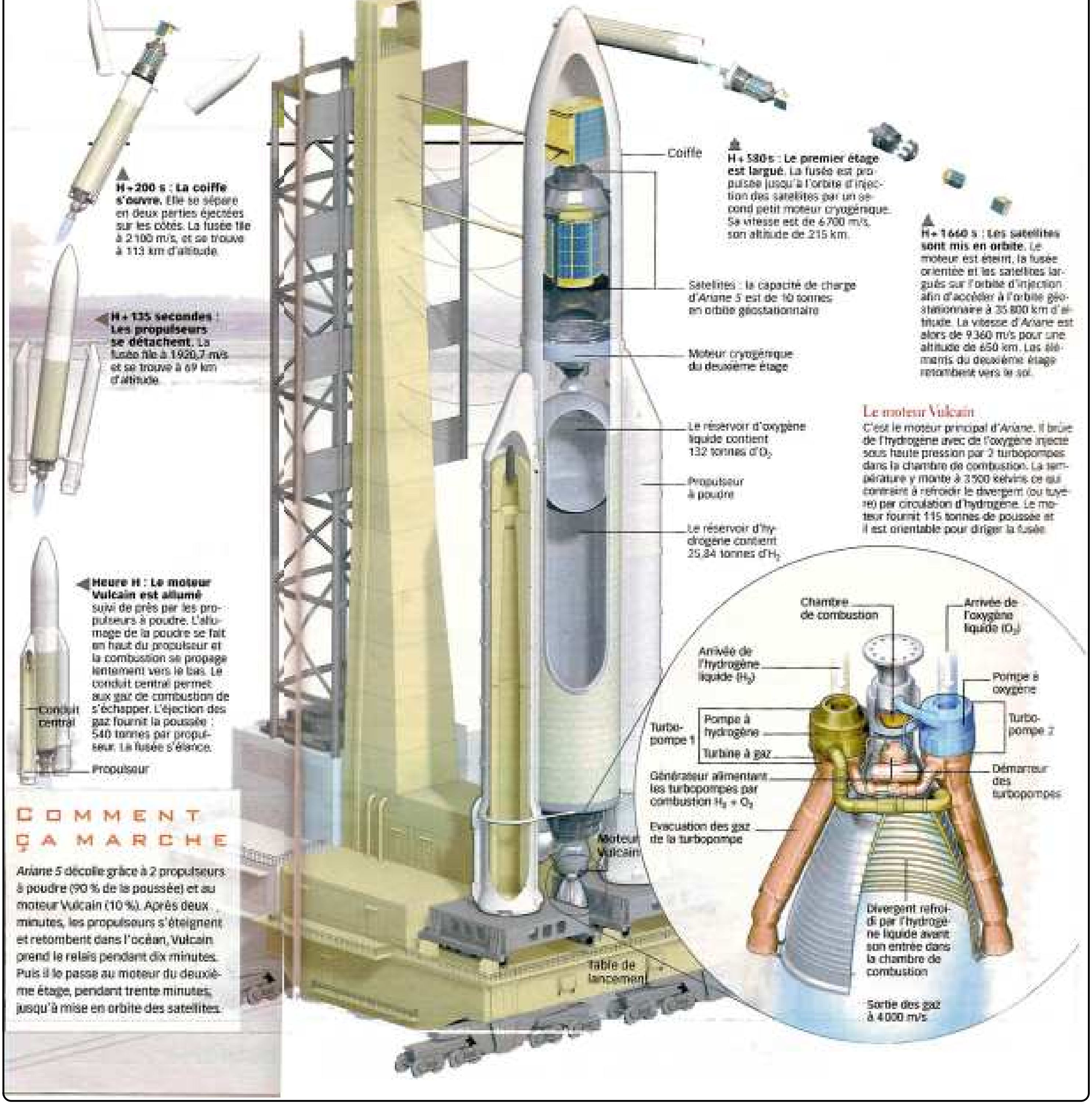
Soit $d = \sqrt[3]{\frac{T^2.G.M_{Terre}}{4.\pi^2}}$ = 42 200 km

Or $d = R_{Terre} + h$ avec R_{Terre} = 6 400 km soit h = 35 800 km

Dans le référentiel géocentrique, les satellites géostationnaires évoluent suivant une trajectoire circulaire située dans le plan de l'équateur, à une altitude de 35 800 km.

Ils ont une période de révolution d'un jour sidéral, soit 86 164 s.

ARIANE 5


H + 200 s : La coiffe s'ouvre. Elle se sépare en deux parties éjectées sur les côtés. La fusée file à 2 100 m/s, et se trouve à 113 km d'altitude.
H + 135 secondes : Les propulseurs se détachent. La fusée file à 1920,7 m/s et se trouve à 69 km d'altitude.
Heure H : Le moteur Vulcain est allumé suivi de près par les propulseurs à poudre. L'allumage de la poudre se fait en haut du propulseur et la combustion se propage lentement vers le bas. Le conduit central permet aux gaz de combustion de s'échapper. L'éjection des gaz fournit la poussée : 540 tonnes par propulseur. La fusée s'élance.
Conduit central
Propulseur
COMMENT ÇA MARCHE
Ariane 5 décolle grâce à 2 propulseurs à poudre (90 % de la poussée) et au moteur Vulcain (10 %). Après deux minutes, les propulseurs s'éteignent et retombent dans l'océan, Vulcain prend le relais pendant dix minutes. Puis il le passe au moteur du deuxième étage, pendant trente minutes, jusqu'à mise en orbite des satellites.
Coiffe
H + 580 s : Le premier étage est largué. La fusée est propulsée jusqu'à l'orbite d'injection des satellites par un second petit moteur cryogénique. Sa vitesse est de 6 700 m/s, son altitude de 215 km.
H + 1660 s : Les satellites sont mis en orbite. Le moteur est éteint, la fusée orientée et les satellites largués sur l'orbite d'injection afin d'accéder à l'orbite géostationnaire à 35 800 km d'altitude. La vitesse d'Ariane est alors de 9 360 m/s pour une altitude de 650 km. Les éléments du deuxième étage retombent vers le sol.
Satellites : la capacité de charge d'Ariane 5 est de 10 tonnes en orbite géostationnaire
Moteur cryogénique du deuxième étage
Le réservoir d'oxygène liquide contient 132 tonnes d'O_2
Propulseur à poudre
Le réservoir d'hydrogène contient 25,84 tonnes d'H_2
Moteur Vulcain
Table de lancement
Le moteur Vulcain
C'est le moteur principal d'Ariane. Il brûle de l'hydrogène avec de l'oxygène injecté sous haute pression par 2 turbopompes dans la chambre de combustion. La température y monte à 3 500 kelvins ce qui contraint à refroidir le divergent (ou tuyère) par circulation d'hydrogène. Le moteur fournit 115 tonnes de poussée et il est orientable pour diriger la fusée.
Chambre de combustion
Arrivée de l'oxygène liquide (O_2)
Arrivée de l'hydrogène liquide (H_2)
Pompe à oxygène
Turbo-pompe 1
Pompe à hydrogène
Turbine à gaz
Turbo-pompe 2
Générateur alimentant les turbopompes par combustion H_2 + O_2
Démarreur des turbopompes
Evacuation des gaz de la turbopompe
Divergent refroidi par l'hydrogène liquide avant son entrée dans la chambre de combustion
Sortie des gaz à 4 000 m/s