



Aérodynamique, Aérostatique

2-3 L'aérostation

Concerne les plus légers que l'air :

- ballons à air chaud
- ballons gonflés au gaz
- dirigeables



In «Portail de l'aviation »



Le principe de base de la sustentation d'un aérostat :

le principe d'Archimède

« Un corps plongé dans un fluide subit une force verticale F_A égale au poids du volume de fluide déplacé »

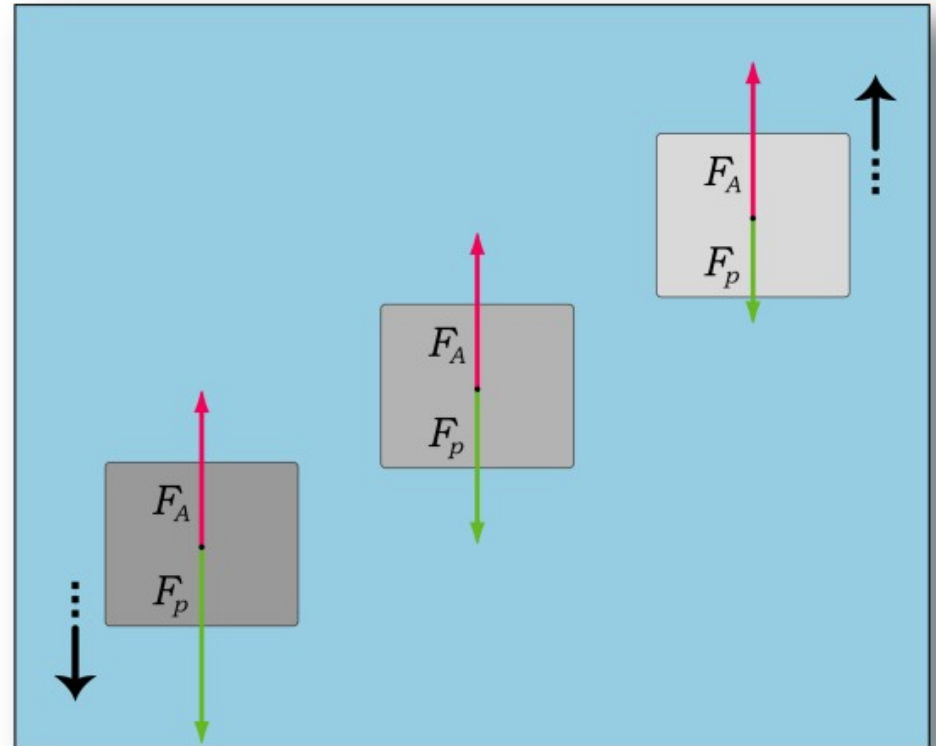
F_A = poussée d'Archimède

$$F_A = - \rho \cdot V \cdot g$$

F_A = poussée dirigée vers le haut

ρ et V = masse volumique et volume du fluide déplacé

F_p = poids du corps immergé



si $F_A > F_p$: sustentation, le corps monte

si $F_A < F_p$: le corps coule

Principe d'Archimède appliqué à la montgolfière

L'air chaud est moins dense que l'air froid. Si on chauffe l'air contenu dans la montgolfière :

→ poids du ballon < poids de l'air extérieur déplacé

→ poussée dirigée vers le haut

Si on arrête de chauffer l'air, il refroidit, la montgolfière va descendre

Exemple :

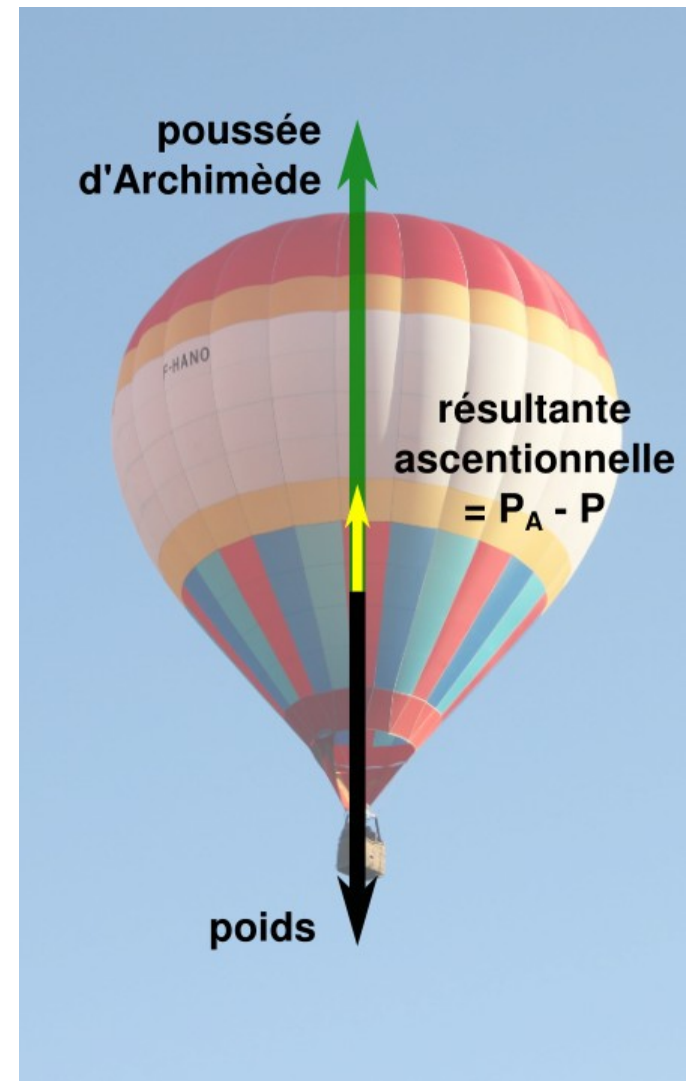
volume de la montgolfière = 2200 m^3

T_p air dans la montgolfière = $80^\circ\text{C} \rightarrow 0,9 \text{ Kg/m}^3$

T_p air extérieur = $10^\circ\text{C} \rightarrow 1,24 \text{ kg/m}^3$

Masse d'air contenu dans la montgolfière : 1980 kg

Masse d'air déplacée (2200 m^3) = 2728 kg



Valeur de la poussée :

$$F_A = (2728 - 1980) * 9,81 = 7300 \text{ N}$$

emport possible : 748 kg

(dont nacelle + enveloppe \rightarrow env. 100 kg)

Principe d'Archimède appliqué au ballon à gaz

- Le ballon à gaz contient un gaz moins dense que l'air (à température identique)
- Ce gaz est en général de l'hélium, ininflammable.
- Le ballon est fermé hermétiquement pour ne pas laisser échapper le gaz se trouvant à l'intérieur.
- Pour monter le ballon à gaz doit lâcher du lest (sable) et pour descendre il évacue un peu de gaz.
- He : un sous produit de l'exploitation gazière
- Masse volumique de He : $0,1785 \text{ g/dm}^3$ (Kg/m^3)

Exemple :

volume du ballon = 2200 m^3

Masse volumique He $\rightarrow 0,1785 \text{ Kg/m}^3$

Tp air extérieur = $10^\circ\text{C} \rightarrow 1,24 \text{ kg/m}^3$

Masse He contenu dans le ballon : 393 kg

Masse d'air déplacée = 2728 kg



**emport possible : 2335 kg
(dont nacelle et enveloppe,
env. 100 kg)**

La rozière, un aérostat à gaz + air chaud

2 compartiments

- Une partie étanche remplie d'hélium → assure la sustentation principale
- Une partie ouverte remplie d'air chauffé par un brûleur → pour faire varier l'altitude en chauffant plus ou moins l'air

en bleu : ballon rempli à l'hélium

en rouge : partie remplie à l'air chaud

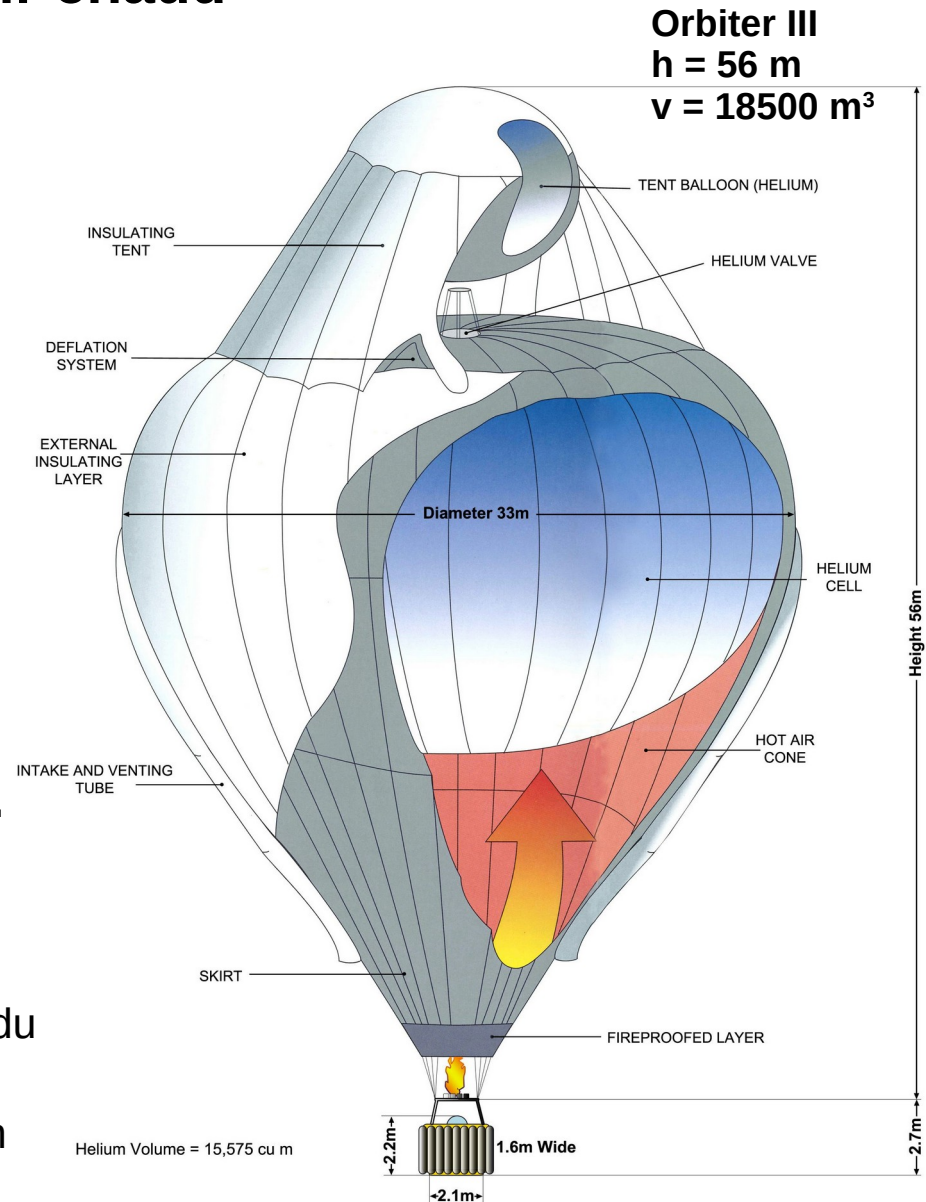
→ grande autonomie (plusieurs jours).

De jour, air et gaz chauffés par le soleil,

De nuit air chauffé au propane

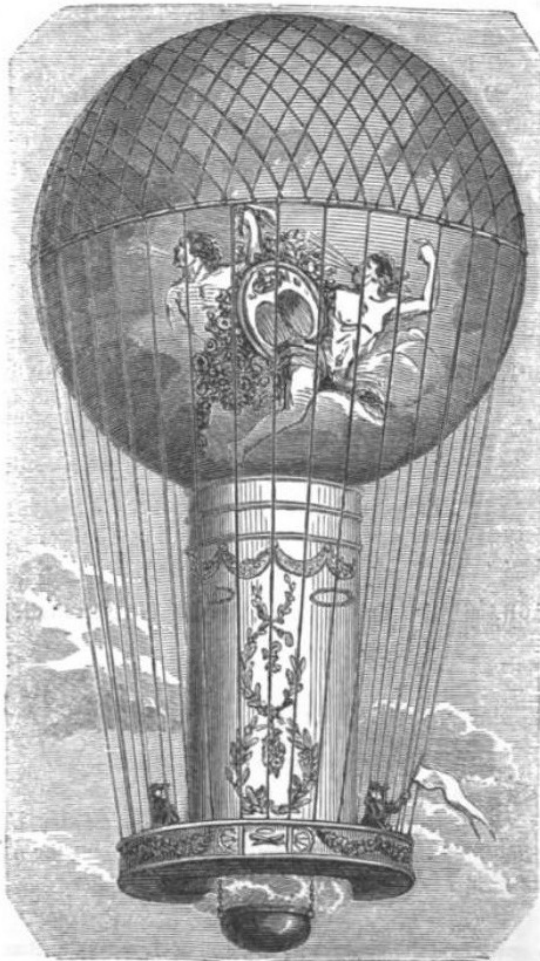
1999 - B. Picard et B. Jones (Orbiter III), tour du monde sans escale de près de 20 jours.

2010 – J.L. Etienne, traversée de l'Arctique en 121 h



La rosière, une très vieille idée !

1784 – L'aéro-montgolfière à hydrogène (très inflammable) + air chaud de Pilâtre de Rozier. Il y trouve la mort en 1785



Mars 1999 – Orbiter 3 à hélium (inflammable) + air chaud. Tour du monde sans escale (C. Picard et B. Jones), près de 20 jours en l'air, souvent très haut (11 000 m) pour profiter des jet-streams

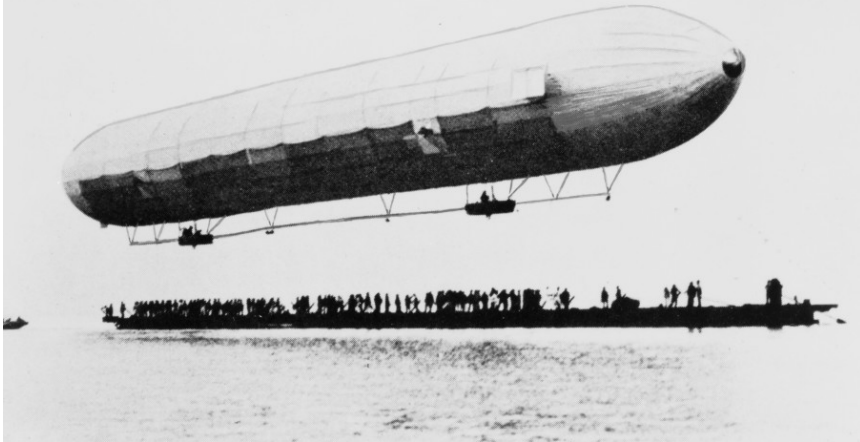


Manœuvrer un plus léger que l'air ? Le dirigeable

Un **ballon** ne bouge pas par rapport à l'air qui l'entoure (**il n'est manœuvrable que verticalement**), il doit utiliser le vent pour se déplacer

Un **dirigeable** est un aérostat (un ballon) muni d'un dispositif de propulsion et d'orientation qui lui apporte de la **manœuvrabilité**

le premier Zeppelin en 1900



aujourd'hui

Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

| | |
|--|-------------------------|
| La sustentation d'un aérostat est basée sur le principe : | |
| a) | d'Archimède. |
| b) | de Bernouilli. |
| c) | des vases communicants. |
| d) | de l'effet Venturi. |

| | |
|--|-------------------------------|
| En cas d'élévation de température extérieure, la force ascensionnelle d'un aérostat : | |
| a) | n'évolue pas. |
| b) | augmente. |
| c) | diminue. |
| d) | dépend exclusivement du vent. |

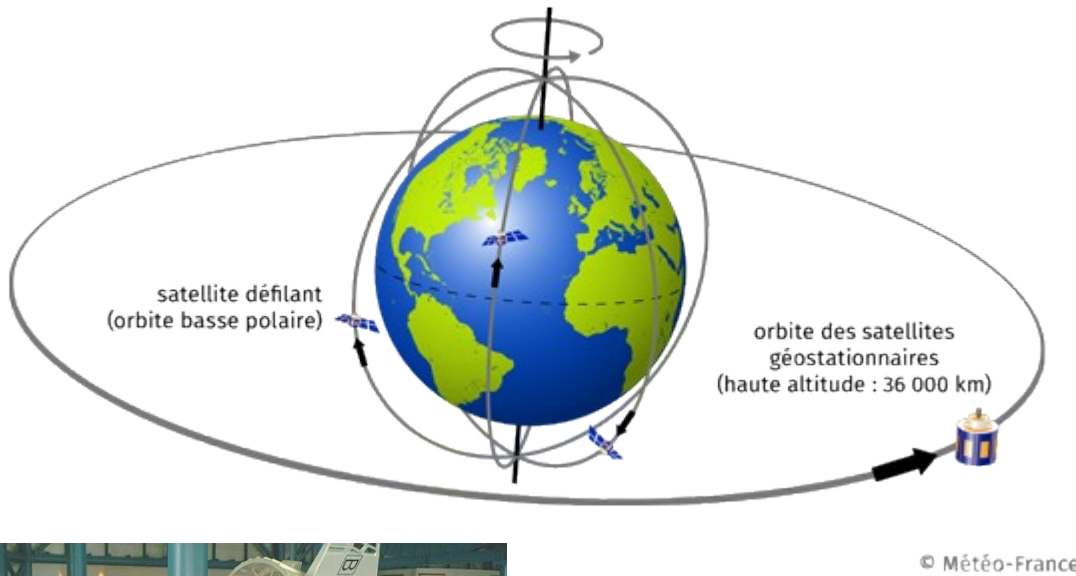
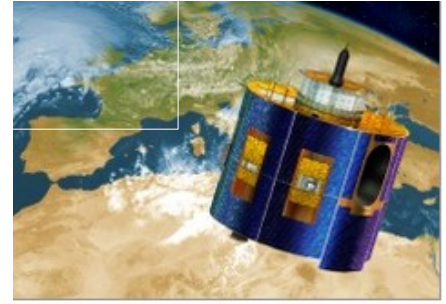
| | |
|-------------|---|
| 2.17 | Lorsque la somme des forces qui s'appliquent à un ballon libre est nulle : |
| a) | le ballon est en situation d'équilibre. |
| b) | le ballon est en montée. |
| c) | le ballon est en descente. |
| d) | le ballon se dégonfle. |



Aérodynamique, Aérostatique

Principes du vol

2.4 Le vol spatial



Quand parle t'on de vol spatial ?

Vol spatial : vol d'un astronef qui dépasse l'altitude à partir de laquelle l'atmosphère est trop peu dense pour permettre le vol d'un aéronef standard (avion, hélicoptère ou ballon). Cette limite se situe vers 100 km d'altitude. Au dessus, on parle de « vol dans l'espace », ou « vol spatial »

Dans l'espace, un engin spatial n'est plus freiné par la résistance de l'air

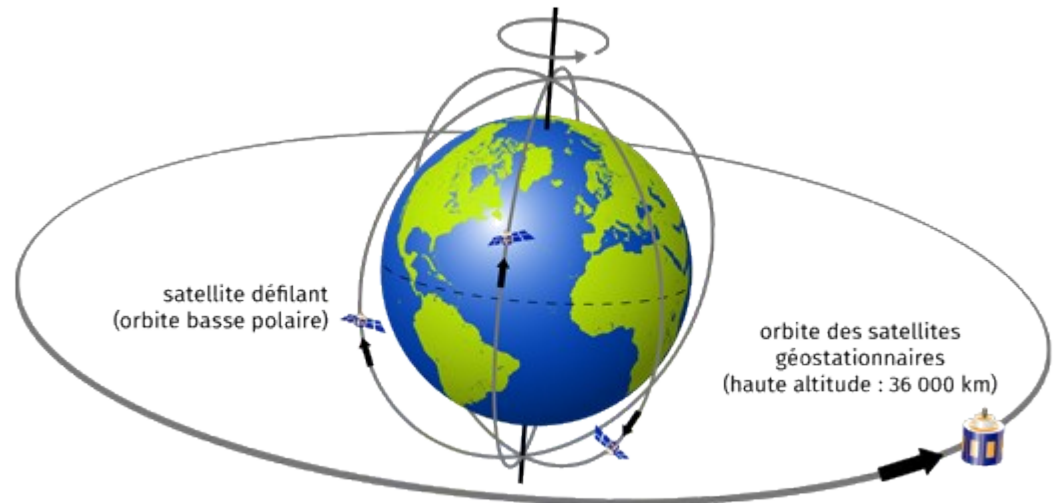
Plusieurs types de vols spatiaux :

- **Vols balistiques ou suborbital**, où l'engin retombe sur terre
- **Vols orbitaux**, où l'engin se met en orbite autour de la Terre
- **Vols interplanétaires**, où l'engin atteint une autre planète
- **Vols interspaciaux**, où l'engin sort du système solaire

Pour les vols interplanétaires ou interspaciaux, l'engin doit échapper à « l'attraction terrestre »

Principes généraux de la mécanique spatiale

- L'attraction terrestre
- Trajectoire de lancement
- Mise en orbite
- Vols orbital et spatial



L'attraction terrestre

Toute masse attire une autre masse : **c'est la gravitation**

En particulier, tout objet sur Terre est attiré par **la gravité terrestre g , orientée vers le centre de la Terre**

Sur Terre, **le poids d'un objet résulte de la gravité terrestre**

$$P = m.g$$

- P : le poids en Newton. C'est **une force dirigée vers le centre de la Terre**
- m : la masse du corps en Kg
- g : gravité terrestre, ou « accélération de la pesanteur », en m/s^2 . **Elle vaut $9,81 m/s^2$ à la surface de la Terre**

g diminue avec l'altitude, selon la loi de Kepler :

$$g_h = g \cdot R^2 / (R+h)^2$$

- h : l'altitude
- g_h : l'accélération de la pesanteur à l'altitude h
- R : le rayon de la Terre = 6371 km

Un spationaute a une masse de 100kg. Combien pèse t'il à 15000 km ?

$$g_h = 9,81 \times ((6371/(6371 + 15000))^2 = 9,81 \times 0,0089 = \mathbf{0,87 \text{ m/s}^2}$$

Sur Terre, la spationaute pèse $100 \times 9,81 = 981 \text{ N}$

A 15000 km, il ne pèse plus que $100 \times 0,87 = 87 \text{ N}$

Son poids a varié, sa masse n'a pas varié

L'accélération de la pesanteur au sol dépend de la masse de la planète et de son rayon

Sur Terre : $M = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$ et $R = 6371 \text{ km} \rightarrow g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Sur la Lune: $M = 7,36 \times 10^{22} \text{ kg}$ et $R = 1737 \text{ km} \rightarrow g = 0,17 \text{ m/s}^2$

Sur Mars : $M = 6,39 \times 10^{23} \text{ kg}$ et $R = 3390 \text{ km} \rightarrow g = 3,71 \text{ m/s}^2$

Un spationaute de 100 kg pèsera

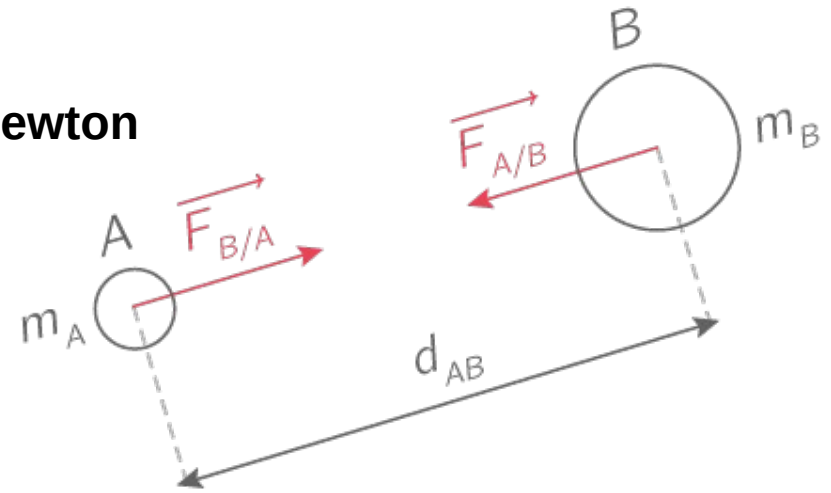
| |
|------------------|
| 981 N sur Terre |
| 17 N sur la Lune |
| 371 N sur Mars |

La gravité sur Terre

Loi de la gravitation universelle de Newton

2 corps de masse m_A et m_B s'attirent mutuellement, avec une force F qui dépend du carré de la distance d_{AB}

$$F = G \times (m_A \times m_B) / d_{AB}^2$$



$G =$ constante gravitationnelle universelle = $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

Sur la Terre, pour un corps de poids $P = m \cdot g$, attiré par la Terre de masse M

$$P = m \cdot g = G \cdot (m \cdot M) / R^2 \rightarrow g = G \cdot M / R^2 \rightarrow g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

avec $R = 6372 \text{ km}$ et $M = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$

Variation avec l'altitude h

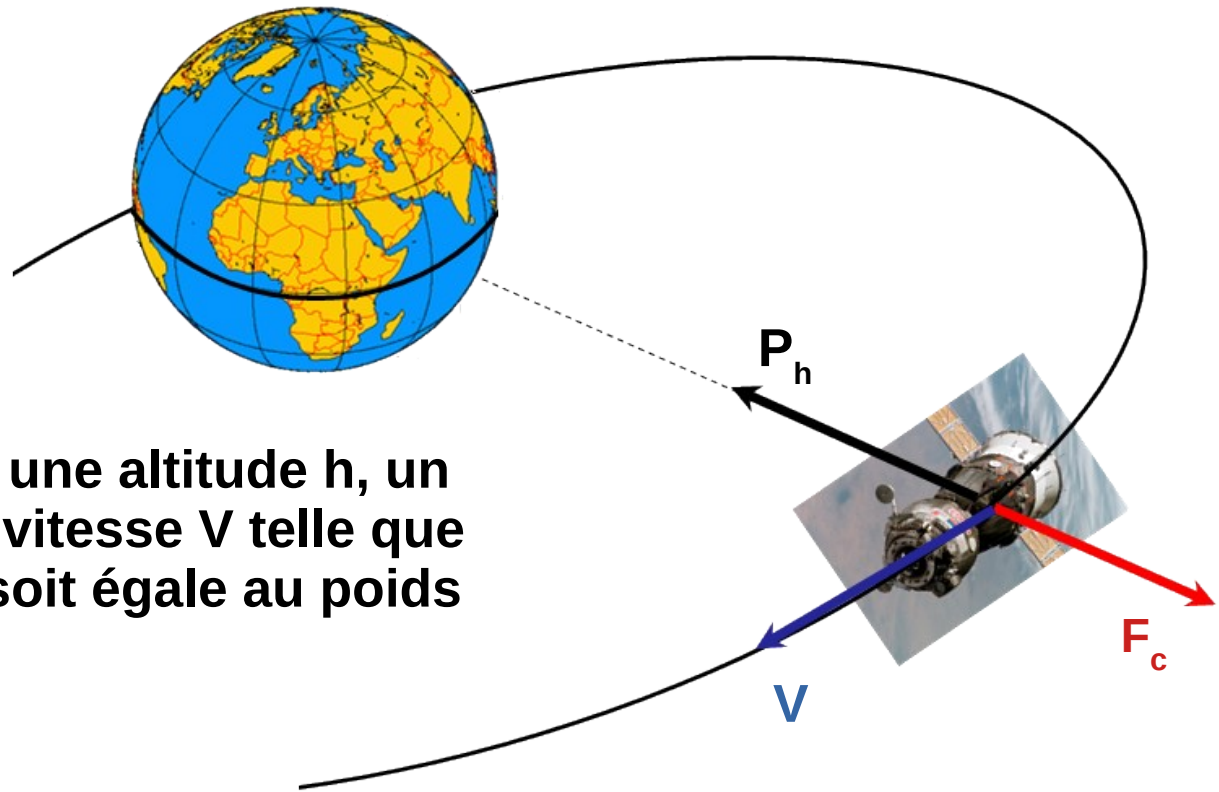
À l'altitude 0 (à 6372 km du centre de la Terre) : $P = G \cdot M_T \cdot m / R^2$

À l'altitude h (à 6372 km + h du centre de la Terre) : $P' = G \cdot M_T \cdot m / (R+h)^2$

$$m \cdot g_h / m \cdot g = P' / P = R^2 / (R + h)^2 \rightarrow g_h = g \cdot R^2 / (R+h)^2$$

(loi de Kepler)

Mise en orbite d'un satellite artificiel



Pour rester en orbite à une altitude h , un satellite doit avoir une vitesse V telle que la force centrifuge F_c soit égale au poids

$$P_h = m \cdot g_h \text{ à l'altitude } h$$

Rappel : force centrifuge $F_c = m \cdot V^2/R$

V = vitesse du satellite

m = masse du satellite

R = rayon du cercle parcouru = $R_T + h_s$

Mise en orbite d'un satellite artificiel

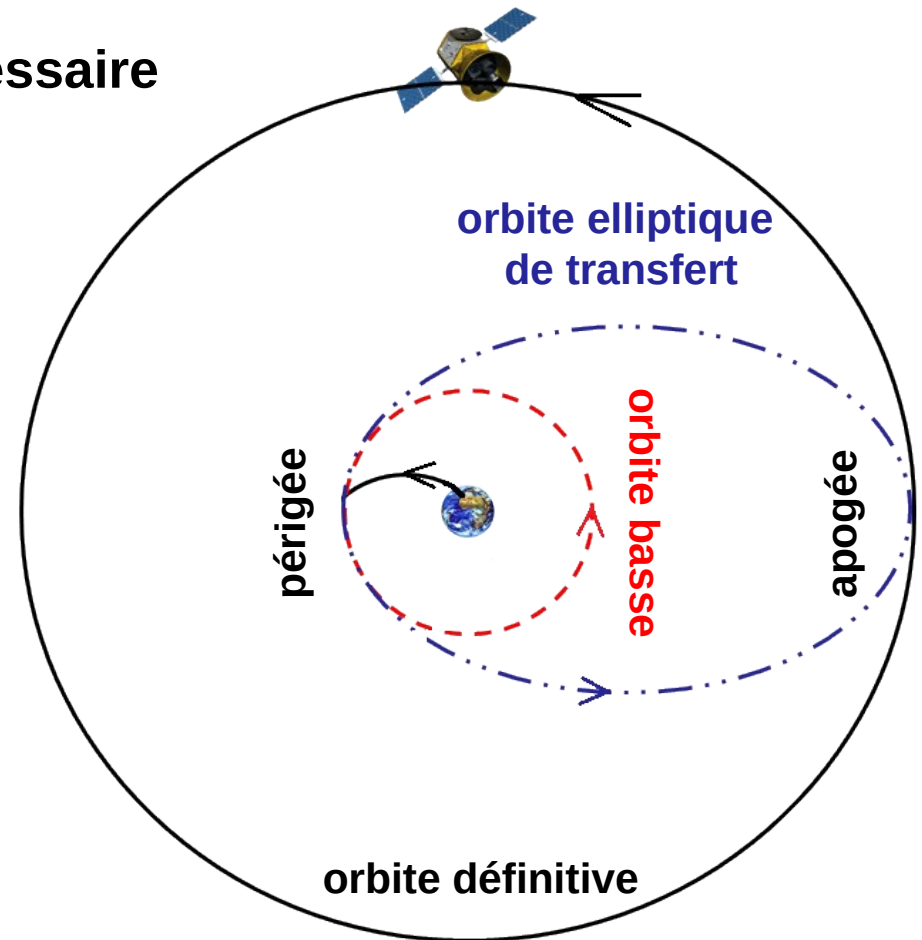
- **Altitude h et vitesse V sont liées entre elles**
- **Une fois l'altitude désirée atteinte, le lanceur donne au satellite une vitesse initiale qui lui permet de maintenir cette altitude.**
- **Si le satellite est hors de l'atmosphère, pas de freinage par l'air → il conserve sans poussée cette vitesse initiale**
- **L'orbite prise dépend uniquement de la vitesse initiale.**
- **Si on augmente cette vitesse, le satellite va se placer sur une orbite plus haute, voire disparaîtra dans l'espace, si la vitesse augmente fortement.**

Et si on diminue fortement cette vitesse (en freinant le satellite à l'aide de rétrofusées), que se passe t il?

Mise en orbite d'un satellite artificiel

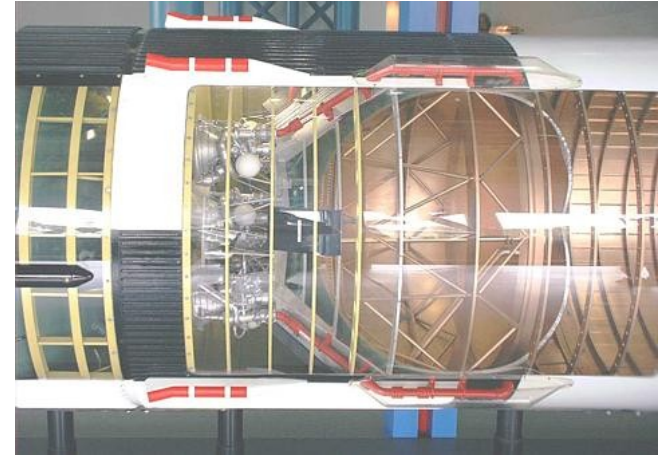
Pour minimiser la puissance nécessaire

- Une fusée met en orbite le satellite sur une **orbite basse**.
La puissance de la fusée sert avant tout à la traversée de l'atmosphère dense
- Le satellite, avec un moteur d'appoint décrit une ellipse. C'est une **orbite de transfert**
- A l'altitude désirée (apogée de la trajectoire elliptique), le satellite est lancé à la bonne vitesse sur son **orbite définitive**



La mise sur orbite d'un satellite consomme de l'énergie/carburant

Un lanceur de satellite : la fusée Saturn 5 (USA)



- Le lanceur Saturn 5 complet avec au sommet le vaisseau Apollo a une masse de 3 038 tonnes au lancement (soit 12 Boeing 747).
$$P=mg = 3\,038\,000 * 9,81 = 29\,807\,780 \text{ N}$$
- Le lanceur est capable de placer 118 000 kg sur orbite terrestre ou d'envoyer 47 000 kg vers la lune.
- Ses cinq moteurs du premier étage développent 3 750 tonnes de poussée.
- Le second étage est propulsé par cinq moteurs totalisant 500 tonnes de poussée.

Deux formes d'orbites: circulaire et elliptique

Les orbites **circulaires**

Elles ont une altitude constante, leur trajectoire est un cercle.

En fonction de l'altitude, l'orbite est dite :

- **basse : < 2000 km d'altitude**
- **moyenne : de 2000 à 20 000 km d'altitude**
- **haute : > 20 000 km d'altitude**

Deux formes d'orbites: circulaire ou elliptique

Les orbites **elliptiques** (ou excentriques)

Leur trajectoire est une ellipse dont l'altitude varie entre une valeur minimum appelée **périgée** et une valeur maximum appelée **apogée**

- Le périgée ne peut pas être inférieur à 200 km, sinon le satellite serait freiné par l'atmosphère
- L'apogée peut aller jusqu'à un million de km, distance où l'attraction de la Terre est supplantée par l'attraction du Soleil

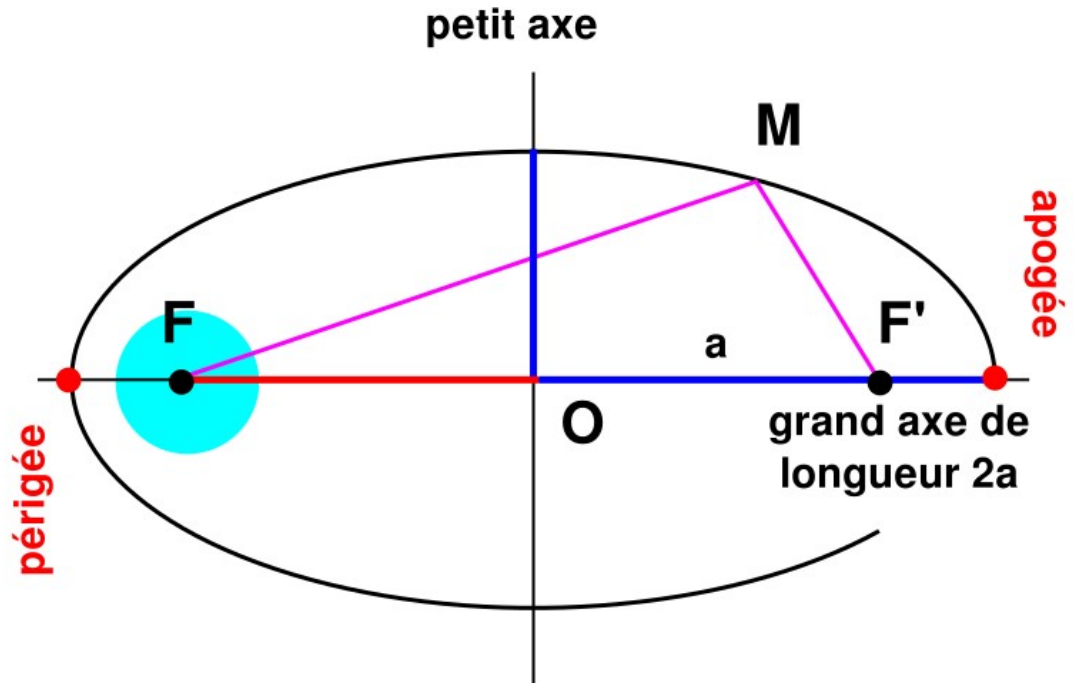
Définition d'une ellipse

Ellipse : courbe fermée décrite par l'ensemble des points tels que

- $FM + F'M = \text{constante} = 2a$
- F et F' sont les « foyers de l'ellipse »

Quand un satellite est placé sur une trajectoire elliptique :

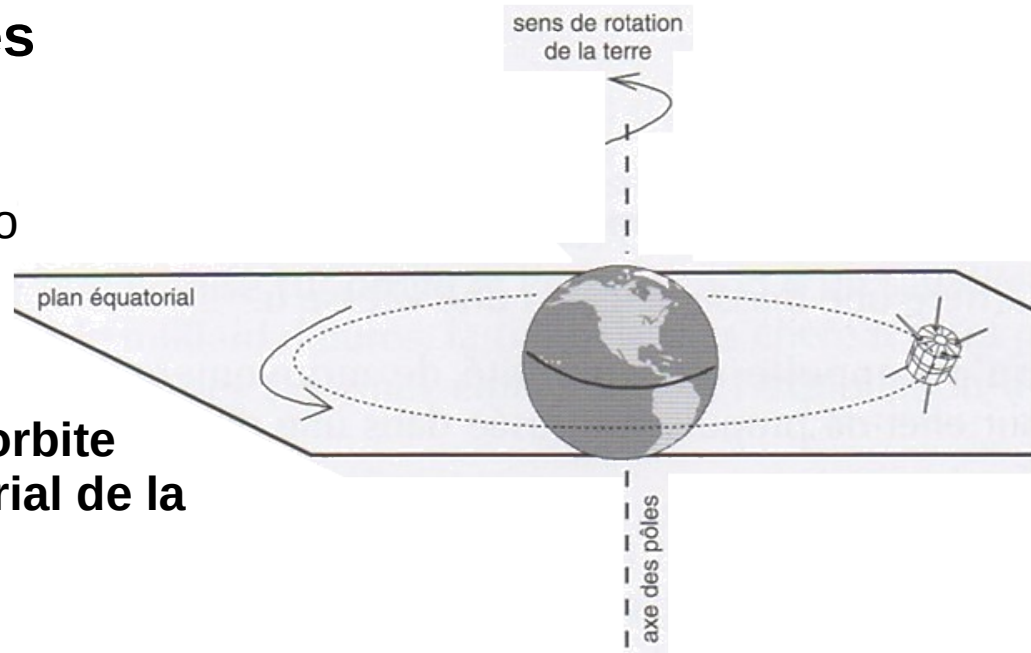
- le centre de la Terre est l'un des foyers de l'ellipse
- La vitesse du satellite varie en fonction de sa position sur l'ellipse. Il va d'autant plus vite qu'il est plus proche de la terre



Des orbites particulières

Orbite **géostationnaire**

pour communications et météo



Le satellite est placé sur une orbite circulaire dans le plan équatorial de la Terre.

Sa période de rotation est d'1 jour

→ **il reste en permanence à la verticale du même point de l'équateur. Pour l'observateur au sol, sa position est fixe**

Son altitude doit être ~ 36 000 km (35 784 km)

Sa vitesse :

Distance parcourue en 1 jour (24h) = $2\pi R$ ($R = 6400 \text{ km} + 35\,784 \text{ km}$)

$$V = 265050 \text{ km/j} = 11\,044 \text{ km/h}$$

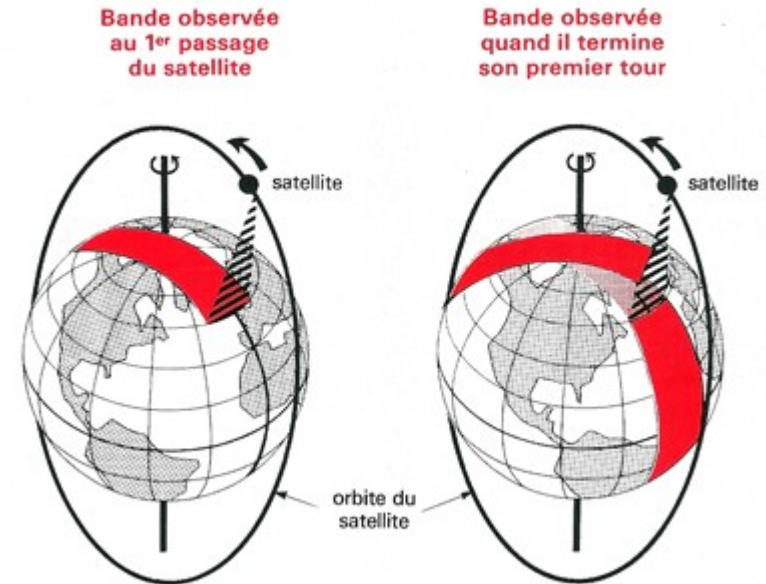
Calcul de h hors programme.
Raisonnement : la force centrifuge, qui dépend de sa masse, du rayon de la trajectoire et de g à cette altitude, doit équilibrer le poids P du satellite à cette altitude

Des orbites particulières

Orbite **héliosynchrone**

pour imagerie satellite dans différentes longueurs d'onde

- Il s'agit d'orbites polaires à environ 850 km d'altitude, dont le plan tourne par rapport à la Terre de 1 degré par jour autour de l'axe N-S (360° en un an)
- **Un satellite évoluant sur cette orbite passera toute l'année au-dessus des mêmes points à la même heure solaire.**
- Permet de relever régulièrement des données de façon consistante ainsi que de faire des comparaisons. Voit 2 fois par jour une même zone et couvre une bande d'environ 2900 km de large.



Sens de lancement et localisation optimale pour le **lancement d'un satellite géostationnaire**



- Le tir de lancement d'un satellite géostationnaire s'effectue vers l'Est.
- Pourquoi?

Pour profiter de la vitesse de déplacement du pas de tir due à la rotation de la Terre (environ 450 m.s-1 à la latitude de Kourou)

La vitesse d'un satellite ne se mesure pas dans un repère attaché à la Terre, mais par rapport à un repère plus vaste, externe. Dans ce repère, vue de l'extérieur, la Terre tourne et tout point de sa surface se déplace à une vitesse tangentielle non nulle (sauf aux pôles).

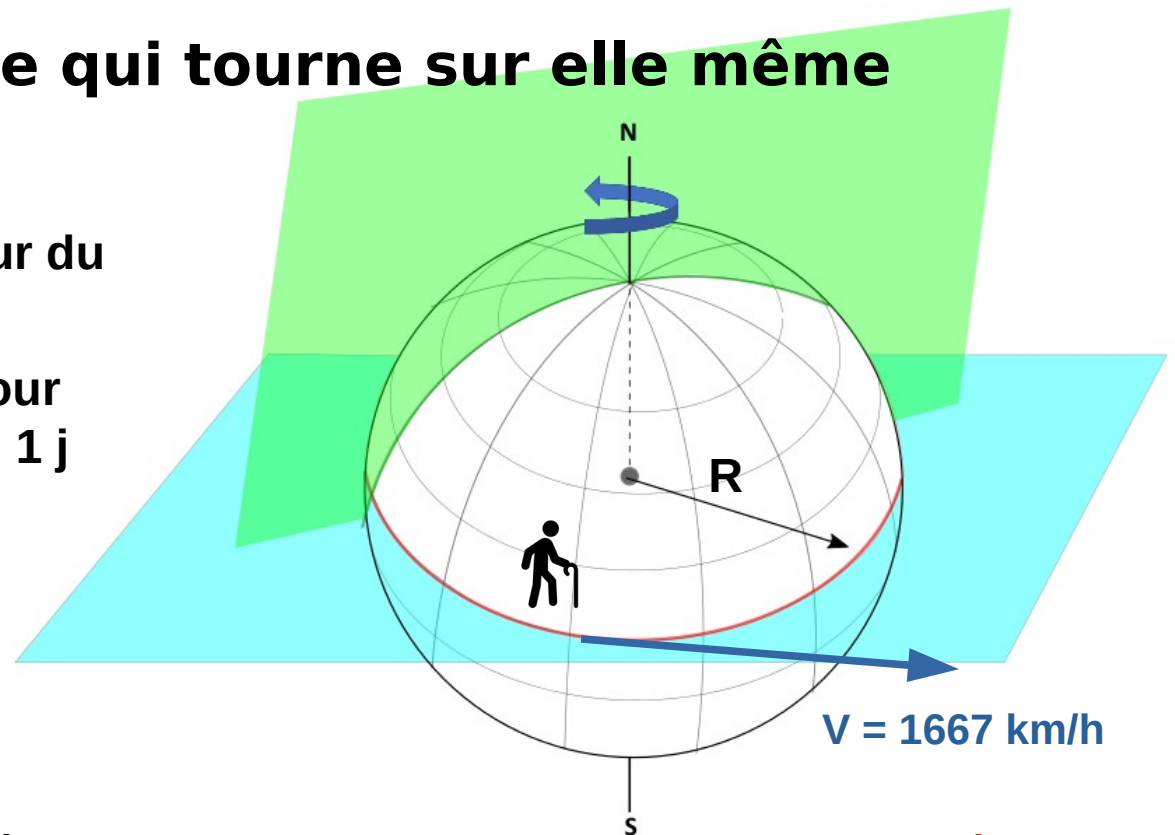
Par contre, si on se place dans notre repère terrestre, cette vitesse est nulle.

La Terre, une boule qui tourne sur elle même



La Terre fait le tour du Soleil en 1 an

La Terre fait un tour sur elle-même en 1 j



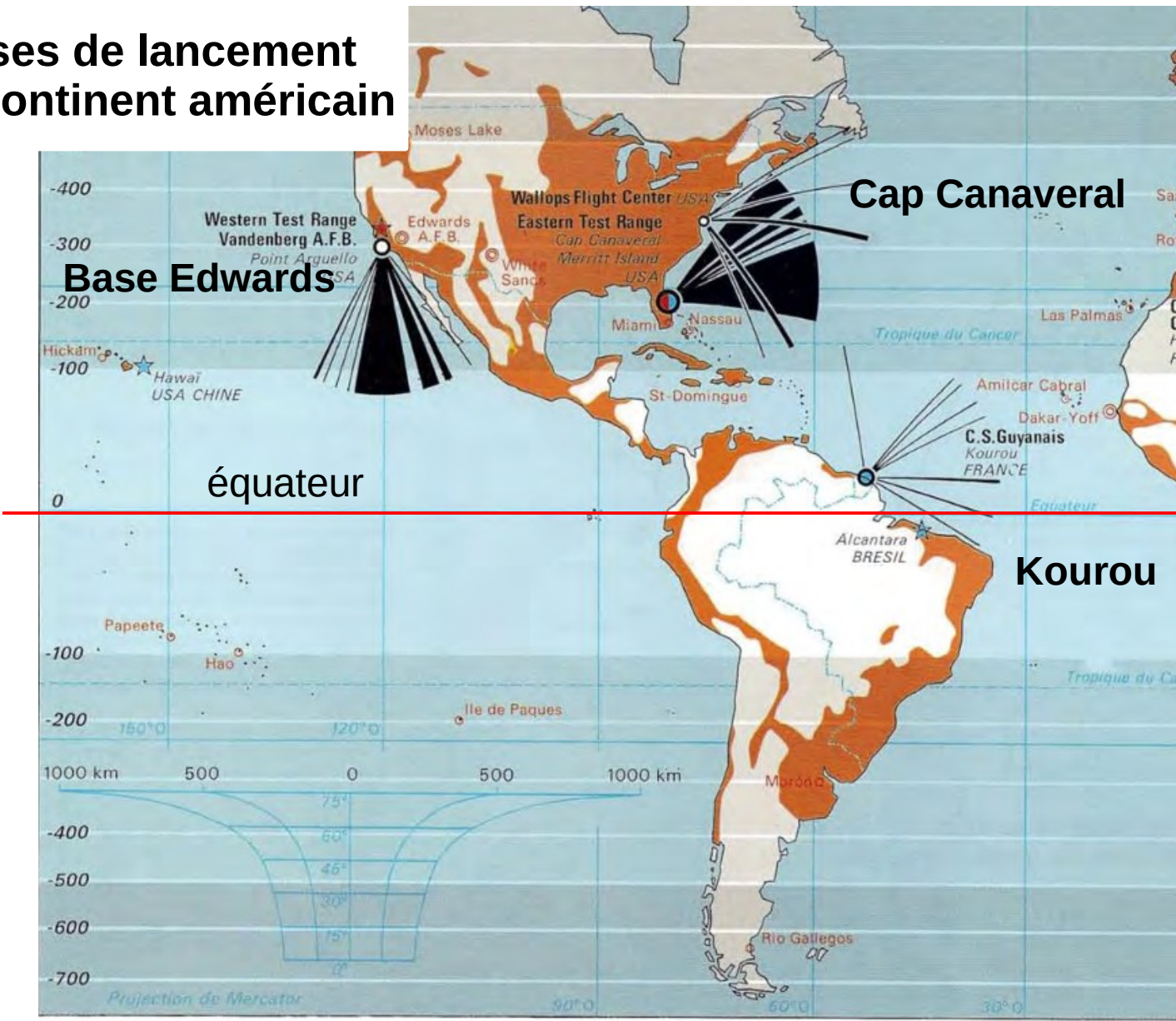
Comme la longueur de l'équateur est 40 000 km, **une personne immobile à l'équateur se déplace en réalité de 40 000 km en 1 journée (24h)**

$$\text{Sa vitesse} = 40\,000 / 24 = 1667 \text{ km/h} = 463 \text{ m/s}$$

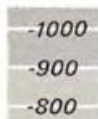
Aux latitudes plus élevées, cette vitesse est plus faible : **un bon site de lancement doit donc se situer le plus près possible de l'équateur**

- Pour mettre un satellite en orbite basse, il faut une vitesse minimale de l'ordre de 8000 m/s → à l'équateur, on a gagné env. 6 % de cette vitesse !
- En plus, pour un satellite géostationnaire, à l'équateur on est directement sur la bonne orbite

Les bases de lancement sur le continent américain



CONDITIONS DÉFAVORABLES À LA LOCALISATION



Diminution (en km-h) de la vitesse d'entraînement de part et d'autre de l'équateur



Peuplement continu rendant dangereuses les chutes d'objets

Sous d'autres latitudes

Quelle est la vitesse d'une personne
au 45^{ème} parallèle?

Rayon du cercle à parcourir = $R_T \cos(45) = 4501 \text{ km}$

Distance à parcourir $D = 2\pi R_T = 28281 \text{ km}$

Vitesse = $28281 \text{ km/j} = 327 \text{ m/s}$

La base de Baïkonour, au Kazakhstan, utilisée
par les Russes, est à une latitude d'environ 45°

Quelle est la vitesse à Cap Canaveral (USA)

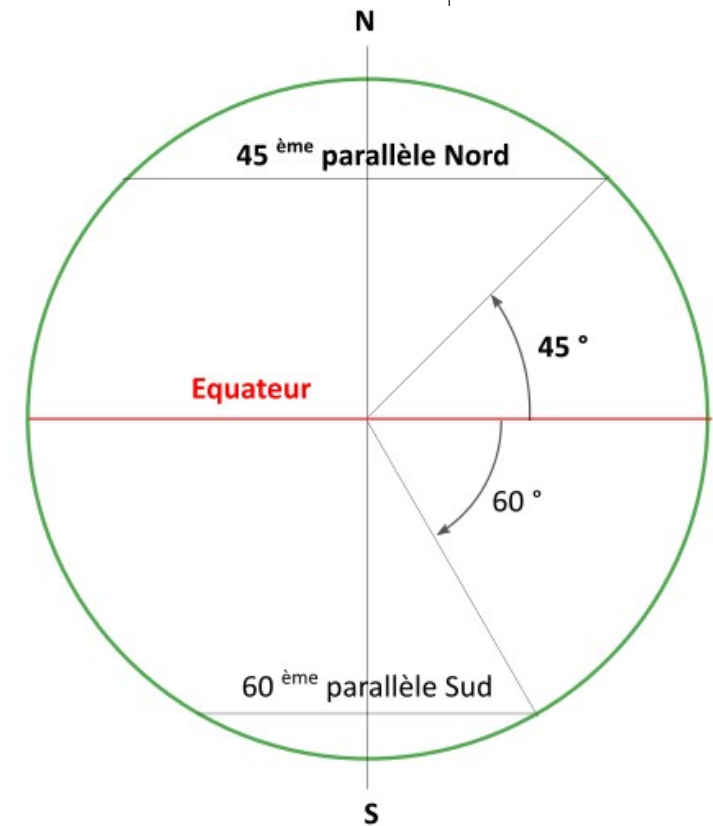
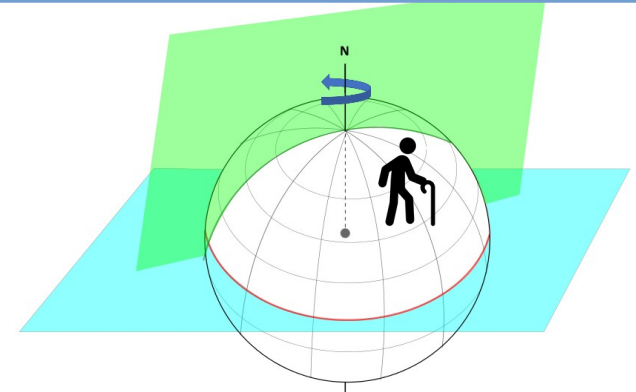
Latitude = $28^\circ 28' = 28,47^\circ$

Rayon du cercle à parcourir = $R_T \cos(28,47) =$

5636 km

Distance à parcourir $D = 2\pi R_T = 35412 \text{ km}$

Vitesse = $35412 \text{ km/j} = 410 \text{ m/s}$



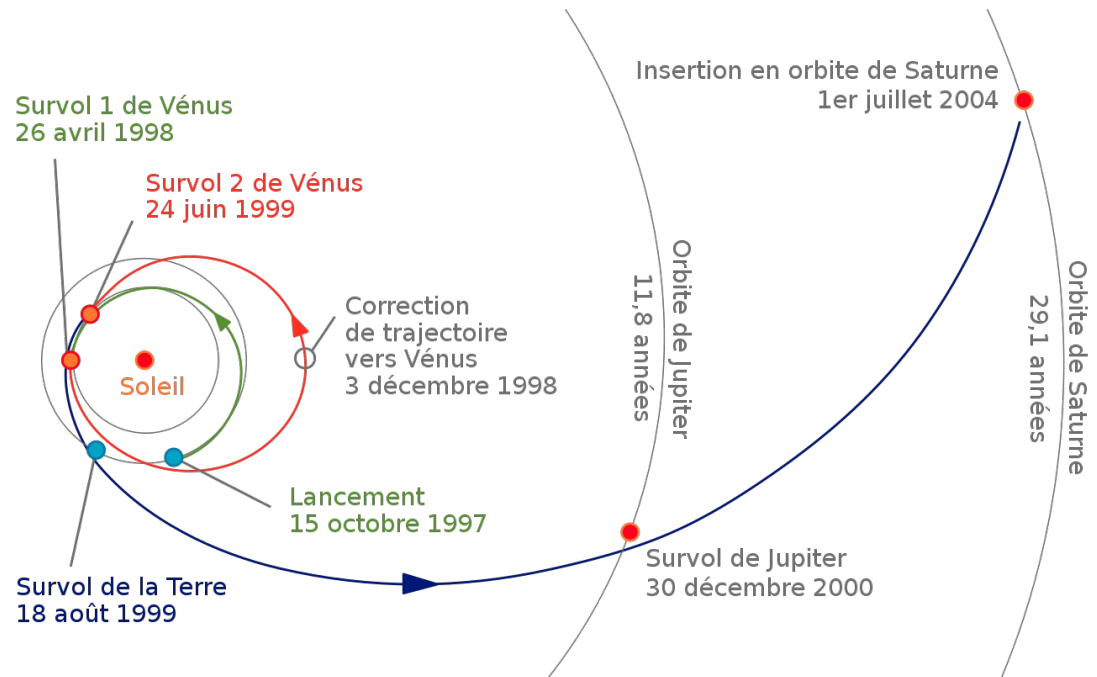
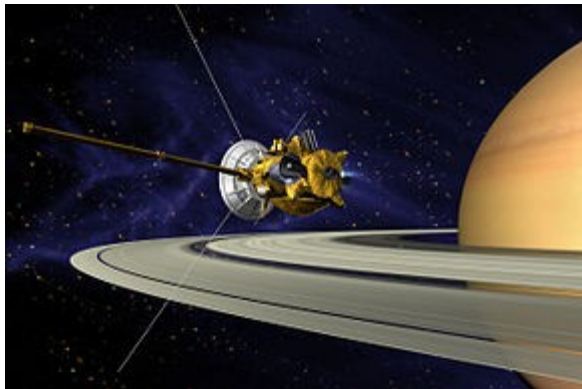
Envoyer une sonde dans l'espace : l'assistance gravitationnelle

Assistance gravitationnelle : **utilisation de l'attraction d'un corps céleste (une autre planète) pour modifier la trajectoire d'un engin spatial.**

Permet d'économiser le carburant transporté par l'engin.

En arrivant dans le champ d'attraction d'une planète, la sonde accélère, la dépasse, puis repart avec une direction différente et retrouve sa vitesse initiale. Près de la planète, sa trajectoire a décrit un tronçon de parabole.

Exemple : la sonde Cassini envoyée vers Saturne a utilisé à plusieurs reprises Vénus, puis la Terre, puis Jupiter pour optimiser sa trajectoire en préservant son carburant



Sonde Rosetta vers la comète Churyumov-Gerasimenko

Un voyage de 6,5 milliards de km qui a duré 10 ans. La sonde a utilisé un moteur pour certaines phases du vol, mais surtout l'assistance gravitationnelle de la Terre et de Mars

2004 LE DÉCOLLAGE

Le 2 mars 2004, Rosetta s'envole depuis la Guyane au sommet d'une Ariane 5G+.

2004-2008 L'ACCELERATION

Cinq ans durant, elle accélère, s'aidant de l'attraction gravitationnelle de la Terre et de Mars, jusqu'à atteindre 43 000 km/h.

2015-2016 LA FIN

La comète s'approchant du Soleil, Philae sera neutralisé. Rosetta s'éteindra elle aussi, fin 2016, faute de carburant.

11 NOV. 2014 L'ATERRISSAGE

Le module Philae se pose sur Churyumov-Gerasimenko.

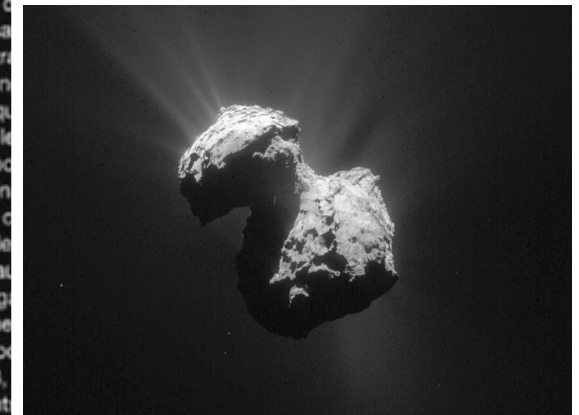
10 SEPT. 2014 ENFIN, LA COMÈTE

La sonde entre en orbite autour de la comète.

Churyumov-Gerasimenko, une cible parfaite

Il fallait une comète qui tourne autour du Soleil suivant une orbite peu inclinée, afin d'utiliser l'assistance gravitationnelle de la

Terre et d'être suffisamment proche du Soleil pour être rattrapée par la sonde. C'est ce qui a permis à la sonde de s'approcher à 5 km, sans trop de risques. Les scientifiques ont d'abord envisagé la comète Wirtanen, mais elle était à l'époque à l'opposé du Soleil. C'est pourquoi Rosetta a été lancée en 2003, pour être rabattue vers 67P/Churyumov-Gerasimenko. Cette comète, baptisée en l'hon-



2008-2011 DEUX ESSAIS TECHNIQUES

En septembre 2008 et en juillet 2010, la sonde survole les astéroïdes Steins et Lutetia, et les mitraille de clichés afin de vérifier le bon fonctionnement des instruments de bord.

4 JUIN 2011 L'HIBERNATION

La sonde poursuit sa route, tous instruments éteints.

15 JANVIER 2014 LE DÉCOLLAGE

Rosetta poursuit sa route, tous instruments éteints.

La comète 67P/Churyumov-Gerasimenko : un corps de 6 x 3 km, à env. 185 millions de km (quand elle est au plus près de la Terre, tous les 7 ans)

Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

Pour profiter de la vitesse d'entraînement de la base spatiale de Kourou, la direction du tir de lancement d'un satellite géostationnaire doit se faire :

- a) vers le nord.
- b) vers l'est.
- c) vers le sud.
- d) vers l'ouest.

En orbite circulaire à 36000 km, la durée d'une révolution (tour complet) d'un satellite est de :

- a) 90 mn.
- b) 120 mn.
- c) 12 heures.
- d) 24 heures.

Le poids d'un satellite tournant autour d'un astre est :

- a) compensé par sa force de portance.
- b) compensé par sa force centrifuge.
- c) compensé uniquement par ses moteurs fusées.
- d) nul car il est en apesanteur.

Quelque sources qui nous ont aidées dans ce travail.

- <http://www.air-pegasus.com/types-ballons/>
- <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/home/index.html>
- Magazine Air et Cosmos
- Info Pilote
- <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=11949>
- Météo France.
<http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/moyens/les-satellites-meteorologiques>
- <https://www.nirgal.net/orbite.html>. Comprendre les orbites