

## **I. Introduction**

Mars... qui n'en a jamais entendu parler ? Personne bien sûr ! Car, bien qu'on en parle depuis de nombreuses années, notre voisine rouge est particulièrement à la une ces derniers temps : « glace, vie martienne, eau, sondes, satellites, ... » tous ces termes sont venus chatouiller nos oreilles au cours de ces derniers mois. Mais en plus, non content d'avoir d'abord exploré notre propre planète, ensuite la Lune il n'y a pas si longtemps que ça, on parle maintenant de plus en plus d'envoyer l'homme poser ses pieds sur le sol martien !

Un projet astronomique fou mais réalisable qui fait rêver pas mal de gens, mais ce n'est malheureusement pas encore pour tout de suite...

### **Mais pourquoi veut-on aller sur Mars ?**

A part peut-être un coup de pub électoral pour le président américain George W. Bush qui a décidé d'octroyer plus de moyen pour la NASA, il semblerait que le profit financier ou le nationalisme en soit ne justifie pas l'exploration martienne quand on connaît le montant de telles missions. En effet, le coût est à ce point élevé qu'une coopération internationale se révèle nécessaire...Et donc seule la science s'avérerait motiver un projet d'une telle ampleur.

La science a donc pris le dessus sur les montants exorbitants en envoyant pas mal de satellites, sondes, robots... ayant pour objectif principal la découverte d'eau mais surtout trouver sous une forme quelconque une trace de vie. Il faut savoir que Mars est la planète du système solaire qui ressemble le plus à la Terre, surtout dans le passé où les températures étaient semblables à celles qu'on connaît actuellement avec en plus de l'eau qui y coulait, l'une des composantes primordiales pour l'apparition de la vie. Nous n'avons jamais réussi à recréer la vie en laboratoire, nous ne comprenons pas encore les mécanismes qui président à l'apparition de la vie. Les différentes expéditions pourront peut-être apporter des morceaux de réponse à des questions telles que « d'où vient la vie, comment est-elle apparue, ... ». Au fond, la question de la vie sur Mars nous renvoie à la question de nos propres origines.

L'homme est à la recherche de la vie extra-terrestre espérant n'être le seul dans ce gigantesque Univers qu'il ne peut voir qu'à travers une minuscule fenêtre. C'est pourquoi il s'obstine à explorer la planète voisine de la belle Planète Bleue.

### **Mars justifie-t-elle l'envoi d'humains ?**

Bien que les robots se plaignent beaucoup moins que les humains de l'atmosphère martienne ou de la durée du voyage, l'exploration complète de Mars à l'aide de robots demanderait plusieurs dizaines voire centaines d'années avec pas mal de robots différents, ce qui exigerait de nombreuses missions et donc de lancements or comme nous allons le voir plus loin, on ne peut envoyer des engins vers Mars que tous les 26 mois, les temps d'exploration de Mars serait donc trop long et finirait pas décourager.

De plus, même si les robots ont de grandes capacités, elles sont loin d'atteindre celles des hommes. En effet, l'homme peut réaliser des centaines de tâches différentes et complexes alors que les robots ne s'adonnent qu'à un petit nombre de tâches. Mais c'est sans compter les progrès de la science ! Qui peut dire ce dont seront capables les robots dans 10ans ? Et puis rappelons que certaines mission on fait perdre la vie de plusieurs personnes et malgré les progrès scientifiques, le risque zéro ne sera jamais atteint.

Il y a donc du pour et du contre mais ce débat ne constitue pas l'une des priorités de notre travail. Par contre, ce qui nous préoccupe ici, c'est... comment y aller ?

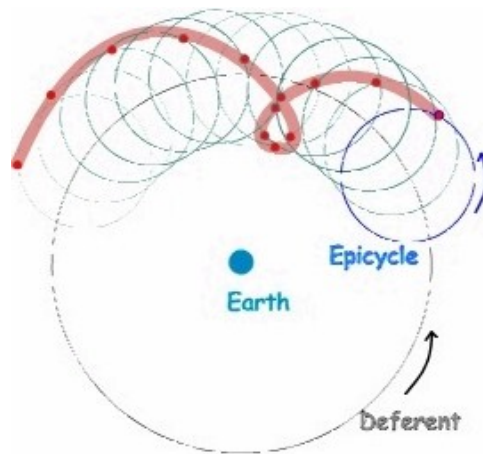
## II. Préliminaires

Ca fait déjà un bon bout de temps que l'homme a tourné les yeux vers le ciel, tous ces objets de couleurs différentes de la forme d'un disque, d'un croissant... Et après le Soleil et la Lune, ce fut Mars que l'on observa le plus. Parmi les astres fixes que nous appelons « étoiles » de nos jours, les Grecs avaient déjà remarqué des *planetoi* (en grec, des « errants ») voyageant le plus souvent de manière régulière mais s'autorisant parfois des petits pas de danse : des rétrogradations.

### A) Le mouvement rétrograde et épicycles

Si on observe Mars au moyen d'un simple télescope et qu'on relève sa position tous les jours, elle va se déplacer vers l'Ouest dans la majeure partie des cas sauf pendant plus ou moins 73 jours consécutifs, ce phénomène se produisant tous les 26 mois.

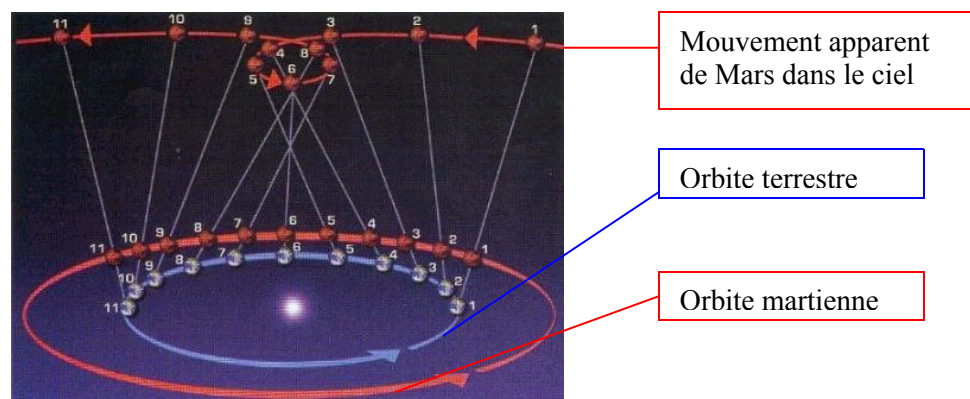
Les Grecs, en 200 av. J.-C., dans une perspective géocentrique et dans une optique divine du monde céleste où les astres ne se déplacent que selon des trajectoires parfaitement circulaires, avaient tenté, avec Ptolémée, de donner une explication à ce phénomène grâce à la théorie des épicycles qui consiste en un jeu de deux cercles et de rotations. La planète tourne d'une fraction de tour à chaque fois que le petit cercle sur lequel elle se trouve avance d'une fraction de rayon. Le centre de ce petit cercle décrivant un plus grand cercle appelé déferent. Cette théorie était fort jolie et se perpétua jusqu'au 15<sup>ème</sup>, mais était hélas sans fondement...



Lors de l'apparition de la vision héliocentrique grâce au Polonais Copernic conforté par Kepler surnommé le législateur des Cieux, on a enfin pu expliquer ce phénomène de rétrogradation par la différence de vitesse angulaire de la Terre et celle de Mars que nous calculons de la manière suivante

$$\omega = 2\pi/T$$

où T est le temps mis pour effectuer un tour complet.



Par ces simples observations on peut aisément calculer la période de révolution de Mars et la distance qui sépare notre planète bleue de la planète rouge.

## B) Détermination de la période de révolution martienne

Via l'observation télescopique, nous avons donc pu observer qu'il s'écoulait environ 780 jours entre deux rétrogradations, c'est-à-dire qu'il faut attendre 780 jours pour que la Terre se retrouve sur une même droite entre le Soleil et Mars, cet intervalle de 2ans et 50jours est appelé révolution synodique. Pendant ces deux ans et 50 jours, la Terre à effectuer 2 tours complets plus un certain angle, que nous appellerons ici, " $\alpha$ ", ce qui nous donne au total :

$$360 + 360 + \alpha = 720 + \alpha$$

En ce qui concerne Mars, elle a réaliser plus d'un tour :  $360^\circ$  plus le même angle  $\alpha$

On obtient donc que (1)

$$(720 + \alpha) / T = 360 / T_T$$

et que (2)

$$(360 + \alpha) / T = 360 / T_M$$

Où T est la période mesurée ;  $T_T$  la période de la Terre et  $T_M$  la période de Mars

Par (1) et (2) on affirme que

$$[(720 + \alpha) / T] - [360 / T_T] = [(360 + \alpha) / T] - [360 / T_M]$$

En regroupant les termes en  $T^{-1}$  à gauche et les autres à droite on obtient :

$$[(720 - \alpha - 360 + \alpha) / T] = [360 / T_T] - [360 / T_M]$$

Si on simplifie par 360,

$$(1/T) = (1/T_M) - (1/T_T)$$

Connaissant  $T_T = 365$  jours et  $T = 780$  jours on trouve ainsi  $T_M = 687$  jours

Maintenant que nous connaissons la période révolution de Mars, nous allons pouvoir comparer les vitesses angulaires de Mars et de la Terre dont on avait parler dans le point précédent (rétrogradation)

$$\omega = 2\pi/T$$

$$\omega_T = 2\pi / 365 = 360^\circ/365 \approx 1^\circ \text{ par jour} > \omega_M = 2\pi / 687 = 360/687 \approx 0.5^\circ \text{ par jour}$$

## C) Distance Terre – Mars

Pour atteindre Mars il est important de connaître la distance qui nous en sépare, notamment pour savoir le temps que durera le vol, la quantité de carburant nécessaire, etc. Il existe pas mal de manières de trouver cette distance : notamment par calculs géométriques avec deux points d'observation de Mars, ou bien par utilisation des lasers mais ces mesures nous procurent uniquement des mesures instantanées.

Nous préférons ici passer par l'intermédiaire de la distance qui sépare Mars du Soleil. Pour cela, on peut se servir des lois établies tout début du 17<sup>ème</sup> siècle par l'astronome allemand Johannes Kepler. En effet, sa troisième loi nous affirme que :

$$T^2 / a^3 = \text{une constante}$$

où T est la période de révolution sidérale de l'astre et a, le demi-grand axe de son orbite elliptique.

Si on considère l'orbite terrestre et martienne comme étant parfaitement circulaire (le demi grand axe devient alors le rayon de l'orbite), ce qui n'est pas un si grosse approximation étant donné l'excentricité très faible de chacune des deux (voir fiche de valeurs annexe) et en sachant que cette formule est valable pour tout astre tournant autour du Soleil donc pour la Terre et pour Mars, on peut l'appliquer au cas de la Terre, avec comme unités : « T » en années et « a » en U(nités) A(stronomiques), on obtient alors:

$$1^2/1^3 = \text{constante} = 1$$

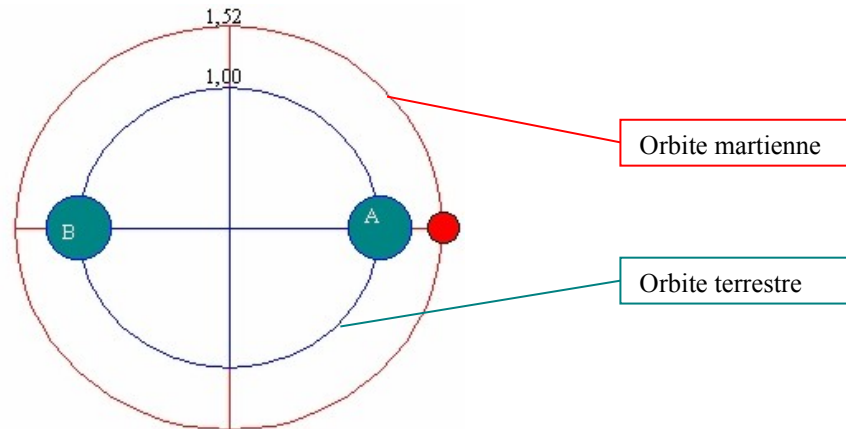
ou encore que (\*)

$$T^2 = a^3$$

Précédemment on a trouver que la période de révolution de Mars était de 687 jours soit

$$687 / 365 = 1,882 \text{ an}$$

en utilisant l'égalité (\*), on trouve  $a = 1.52$  UA, a étant ici le rayon moyen de l'orbite de Mars.



La distance séparant la Terre de Mars varierait donc de 0,52 UA à 2,52. Cependant, ni l'orbite de Mars ni celle de la Terre ne sont parfaitement circulaires mais bien elliptiques et donc la distance entre notre planète bleue et la rouge varie de 55,76 millions à quelques 400 millions de km.

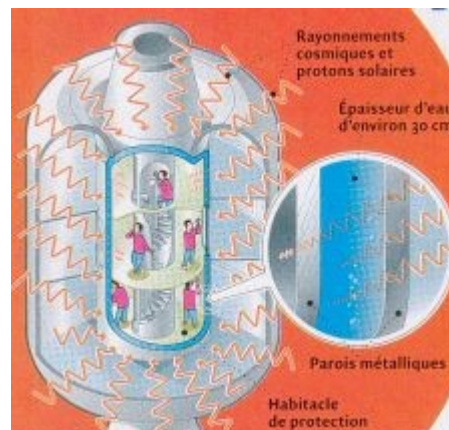
### Sécurité et confort des cosmonautes

La distance qui nous sépare de Mars est réellement un problème, c'est d'ailleurs la raison pour la quelle nous n'avons pas encore poser nos pieds dessus ! En effet, plus la distance est grande, plus la quantité de carburant sera importante, plus la communication entre la planète et la Terre s'avèrera difficile, moins on connaît de choses sur l'astre en question, etc.

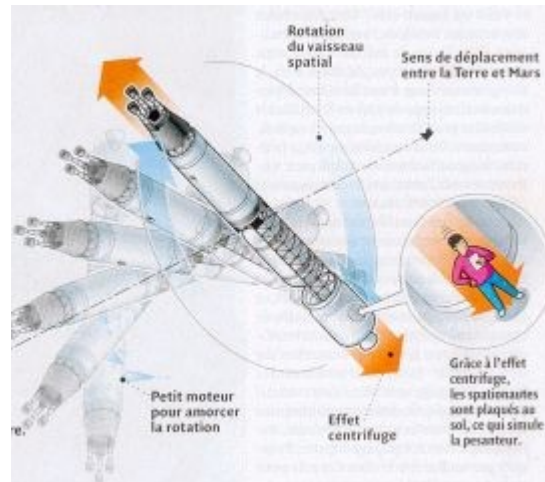
Mais, bien que la distance nous séparant de la planète rouge s'avère énorme, le problème majeur est avant tout le temps nécessaire pour parcourir cette distance, plus que la distance en elle-même... Effectivement, un voyage de plusieurs mois comporte de nombreux risques tels que le dysfonctionnement du matériel, même avec les technologies actuelles, l'usure des matériaux est aussi bien d'application dans l'espace que sur Terre, mais le risque plus grave que peut risquer l'équipage est de rencontrer de la matière interstellaire pouvant endommager voire complètement détruire certains appareils.

Pendant leur long périple, les cosmonautes seront également soumis à de nombreuses radiations. Si on ne fait rien celles-ci modifieraient les cellules de l'ADN dont l'effet se ferait ressentir à long terme. La paroi de la fusée arrêterait déjà 20% de ce rayonnement, et les risques de mort par cancer seraient augmentés, selon les radiobiologistes, que de quelques pour cents et de pilules d'antioxydants diminueraient ce risque.

Par contre, il existe un rayonnement plus dangereux, celui émis par les éruptions solaires. Ces rayonnements sont mortelles et sont imprévisibles. On sait qu'ils ont lieu au moins une fois tous les onze ans et que des petites éruptions dont le rayonnement est quelque peu moins dangereux ont lieu environ tous les deux ans. Heureusement, ces rayonnements peuvent être absorbés par des matériaux riches en hydrogènes comme l'eau tout simplement, voilà pourquoi les modules d'habitation est protégé par une couche d'eau de 30cm. (Quant à nous nous en somme protégés à la fois par l'hydrogène contenu dans l'atmosphère mais surtout par le champ magnétique terrestre.



L'absence de pesanteur est également problématique : les muscles s'atrophient, les os se décalcifient, la circulation sanguine s'effectue mal, ce qui cause des tensions artérielles, et irriguant moins bien le cerveau, d'où l'utilité de créer une gravitation artificielle par rotation. Celle-ci fera apparaître une force centrifuge qui recréera une gravité semblable à celle de Mars. D'autres solutions comme la prise de médicaments, des chaises centrifugeuses et une activité physique spécifique diminueraient encore ces effets non-désirables.



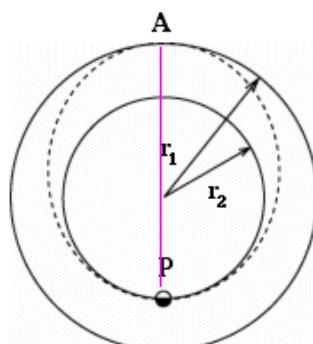
Et enfin, il y a la solitude, longue de plusieurs mois. Enfermés dans leur fusée, les cosmonautes verront petit à petit disparaître leur chère planète. Livrés à eux mêmes, il ne pourront pas revenir aussi vite qu'à l'époque de la conquête de la Lune où le voyage pouvait encore s'exprimer en jours. Ils leur faudra donc de nerfs d'acier pour supporter leur solitude par rapport à la Terre et les différences culturelles qui règneront au sein de l'équipage.

### III. Quel trajet choisir ?

Après une sélection de l'équipage, il est temps de les envoyer, mais par où ?

Le meilleur moyen pour ne pas aller sur Mars est d'attendre que les planètes soient les plus proches possible et de viser Mars lors du départ de la fusée... Cela ne peut fonctionner à cause de la force de gravitation terrestre, à cause de la rotation de la Terre sur elle-même, de la rotation de la Terre autour du Soleil mais aussi de la différence de vitesse angulaire entre les deux planètes et enfin également du fait de l'attraction du Soleil.

Le coût d'une mission sur Mars dépend essentiellement de la masse du véhicule qui est composée à plus de 50% de la masse du carburant, d'où l'intérêt de trouver de nouveaux carburants (voir plus loin) mais aussi de trouver un trajet minimal en énergie. Les trajets se font selon une orbite elliptique imaginée en 1925 par Walter Hohmann. Ce trajet consiste à s'éloigner le moins possible du Soleil pour que la composante de sa force d'attraction selon la trajectoire du vaisseau soit minimale et en même temps de profiter de l'attraction du Soleil pour la mise en orbite du vaisseau. L'orbite de transfert de Hohmann doit bien évidemment coïncider en un point avec l'orbite terrestre et en un autre avec l'orbite de Mars. On peut même aller plus loin en disant que l'ellipse de Hohmann doit être tangente à celle de Mars et de la Terre, cette orbite utilise au maximum les orbites des planètes pour accélérer le vaisseau spatial. Mais de là, plusieurs trajets sont possibles, ayant chacun leur pour et leur contre.



#### Légende :

$r_1$  : rayon de l'orbite de Mars

$r_2$  : rayon de l'orbite de la Terre

---- : orbite de transfert de Hohmann

### A) Trajectoire de type conjonction :

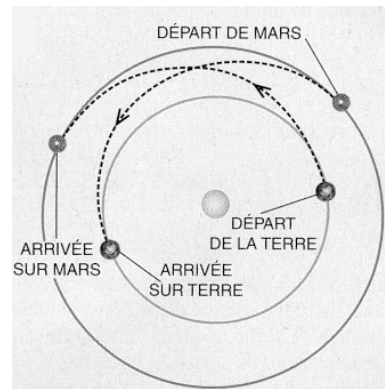
Lorsque Mars est en avant de la Terre de  $45^\circ$ , le véhicule spatial démarre et rejoindrait Mars de l'autre côté du Soleil par rapport à la position initiale de la Terre.

Pour revenir, les astronautes devront attendre que Mars soit en avant de la Terre avec un angle de  $75^\circ$  et se lancer correctement sur l'orbite de sorte que la Terre rattrape le vaisseau.

Le voyage durerait alors un peu plus deux ans et demi : 260 jours pour le trajet interplanétaire et 460 d'exploration sur la planète Mars.

Cette trajectoire est celle privilégiée par la NASA pour le moment, car cette orbite est également pensée de telle manière qu'en cas de défaillance des moteurs, le vaisseau retourne naturellement vers la Terre. Remarquons aussi que le temps de vol entre les deux planètes peut être diminué si on fournit des accélérations supplémentaires à l'astronef mais cela réclame alors plus de carburant.

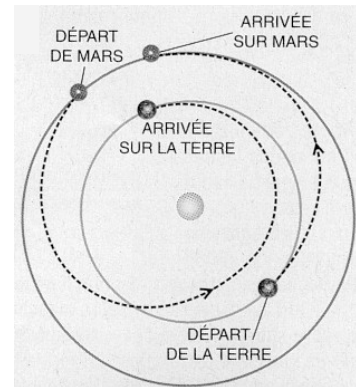
Ce type de trajectoire est assez économique mais s'étale sur une période assez longue. C'est pourquoi les ingénieurs sont à la recherche de trajet moins long au point de vue temporel.



### B) La trajectoire de type opposition :

Ce trajet doit son nom au fait que la Terre se rapproche au plus près de Mars à un moment donnée de la mission. Le temps du voyage est alors beaucoup plus court mais requiert un accélération au cours du périple et dès lors, plus de carburant. Cette trajectoire s'appuie également sur la gravitation du Soleil pour raccourcir la durée.

Le voyage durerait alors un an et demi : 220 jours pour l'allée, seulement 30 jours sur l'astre rouge, et 290 pour le retour. On peut également inverser les durée pour l'aller et le retour mais toujours selon le même principe. Ce voyage dure nettement moins longtemps la période d'exploration de Mars est trop courte par rapport à la durée totale du trajet (à peine 5,5 %)



### Justifications des valeurs :

On peut justifier la durée de vol et le moment du lancement de la fusée en orbite classique (c'est-à-dire en trajectoire de type conjonction). En effet, on a vu que la troisième loi de Kepler affirme que :

$$T^2 / a^3 = \text{constante}$$

Cette constante étant égale à 1 si on utilise comme unités des années et des unités astronomiques, comme on l'a fait précédemment. On a également vu qu'elle pouvait s'appliquer à n'importe quelle orbite autour du Soleil donc également celle du vaisseau. Il ne nous reste donc plus qu'à calculer le demi-grand axe de l'ellipse pour connaître la durée total de vol.

Le grand axe (—) de l'orbite de Hohmann est de longueur

$$2a = r_1 + r_2 = 1 + 1,52 = 2,524 \text{ UA}$$

et donc le demi grand est égale à

$$a = 2,524 / 2 = 1,262 \text{ UA}$$

Maintenant qu'on a trouvé  $a$ , on n'a plus qu'à élever sa valeur au cube pour obtenir l'égalité avec la période de révolution au carré :

$$a^3 = 2,009 = T^2$$

On trouve enfin

$$T = 1,417 \text{ ans} = 517,2 \text{ jours}$$

Seulement le vaisseau ne parcourt pas toute l'orbite mais seulement la moitié pour aller d'une planète à l'autre, on a alors

$$T \approx 0,708 \text{ ans} \approx 260 \text{ jours}$$

Nous venons donc de trouver le temps nécessaire pour aller sur Mars, ce temps va alors nous permettre de justifier le moment du lancement de la fusée.

En 0,708 ans, Mars parcourt un angle de

$$360^\circ \times (0,708 / 1,88) = 135^\circ$$

Rappelons que le nombre « 1,88 » est le temps mis par Mars pour faire un tour complet autour du Soleil. Cet angle de  $135^\circ$  justifie bien le fait que Mars doit être en avant de  $45^\circ$  au moment du départ de la fusée qui va rejoindre Mars de l'autre côté du Soleil par rapport à la position initiale de la Terre. En effet,

$$135^\circ + 45^\circ = 180^\circ$$

### C) Problèmes de la gravitation

On a beau connaître le chemin, encore faut-il se propulser mais comment et à quelle vitesse ?

Le premier problème rencontré est la gravité terrestre, pas moyen d'y échapper, il faut « simplement » être plus fort qu'elle. Si on considère uniquement la Terre, plus on s'en éloigne moins la force de gravité se fait ressentir en vertu de

$$F_G = (GMm) / r^2$$

La force de gravitation est une force attractive, son énergie potentielle ne peut donc qu'être négative ou nulle. Elle sera nulle seulement si le rayon tend vers l'infini et on aura alors échappé à l'attraction terrestre. Dans ce cas, un véhicule spatiale ne possèdera plus qu'une énergie cinétique et celle-ci ne peut être que nulle ou positive.

Rappelons que l'énergie potentielle d'un corps est l'énergie qu'il faut fournir pour l'amener de l'infini à la position qu'il occupe :

$$E_p = \int (GMm \, dr) / r^2 = - GMm / r$$

G, M, m et r étant positifs, l'énergie potentielle ne peut donc qu'être négative.

La mécanique nous dit que l'énergie mécanique totale est égale à la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle et le résultat est une constante qu'on déclarera nulle, soit

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{cin}} + E_p = \text{constante} = 0$$

$$E_{\text{tot}} = [(mv^2) / 2] - [(GMm) / r] = 0$$

Ici, m est la masse du vaisseau, v la vitesse de libération du vaisseau, G la constante de gravitation universelle, M la masse de la Terre et r le rayon par rapport au centre de la Terre

$$v_{\text{lib}} = [(2GM_T) / R]^{(1/2)}$$

On remarque alors que la vitesse de libération ne dépend pas de la masse de la fusée.

En remplaçant les expressions par leur valeur on obtient

$$v_{\text{lib}} = [(2 \times 6,67 \cdot 10^{-11} \times 5,97 \cdot 10^{24}) / 6,37 \cdot 10^6]^{(1/2)}$$

$$v_{\text{lib}} = 11,18 \text{ km/s}$$

En annexe se trouve un graphique représentant la variation de la valeur de la force de gravité.

### D) Vitesses additionnelles

#### a) Notion de vitesse à l'infini

La vitesse de libération est donc fixée mais on peut bien sûr fournir plus d'énergie et ainsi obtenir une vitesse supérieure. Cette vitesse additionnelle v, se fera encore ressentir à l'infini selon :

$$[\frac{1}{2} (V_0)^2 - (GM / r)] = \frac{1}{2} (V_\infty)^2$$

Par exemple, une vitesse de 320 km/s procurera une vitesse à l'infini de

$$[\frac{1}{2} (11500)^2] - [(6,6710^{-11} \times 5,97 \cdot 10^{24}) / 6,37 \cdot 10^6] = \frac{1}{2} (V_\infty)^2$$

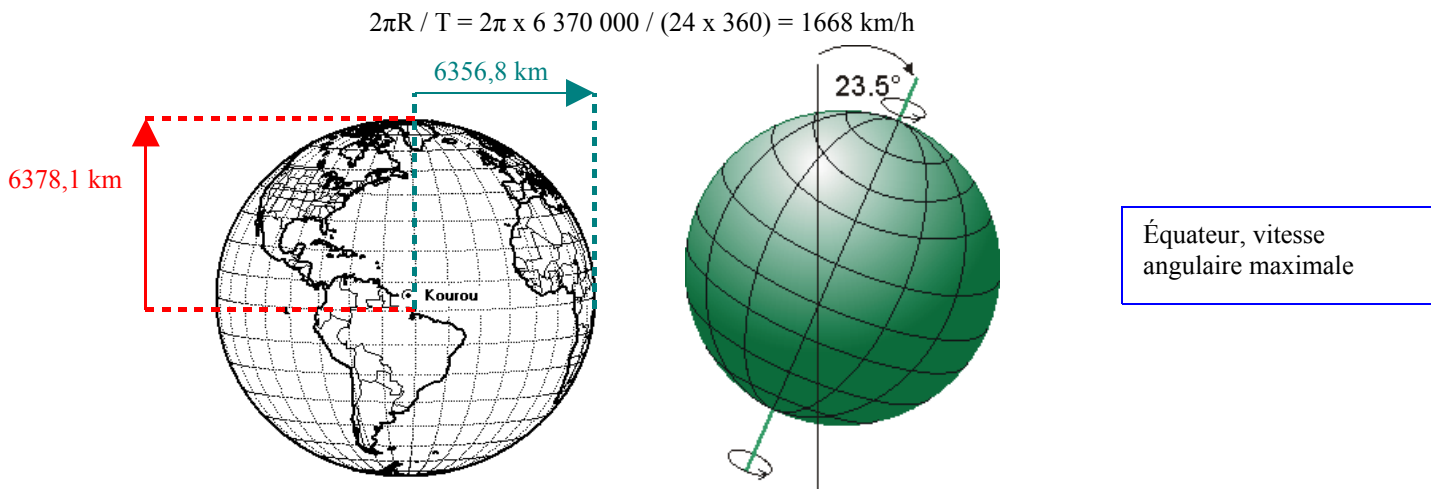
$$V_\infty = 2688 \text{ m/s}$$

Cette notion de vitesse à l'infini semble assez abstraite à première vue mais elle permet en fait de donner une bonne approximation de la vitesse minimale de croisière du vaisseau. En effet, déjà après 6 millions de km (ce

qui est peu comparé au voyage total), la vitesse réelle du vaisseau n'est supérieure que de 10m/s à peu près. Donc, en bonne approximation, on peut dire que tout se passait comme si le satellite possédait une vitesse moyenne de croisière égale à  $V_{\infty}$

### b) Vitesse équatoriale

On peut encore ajouter une autre composante à ces vitesses si l'on choisit judicieusement l'endroit. Lancer une fusée au pôle n'apportera rien tandis que la propulser à partir de l'équateur permettra d'obtenir une vitesses additionnelle de



Cette vitesse supplémentaire autorisera l'augmentation de 10 à 20% de la masse du satellite. Lancer des fusées ou des satellites à partir de l'équateur permet en plus d'obtenir toutes les valeurs d'inclinaisons possibles de l'orbite. En effet, il est possible de montrer qu'à une certaine altitude « L », il n'est pas possible d'obtenir une orbite inclinée de moins de  $L^\circ$  sur l'équateur. Il y a cependant des solutions des changements de plan d'orbite mais ce sont des opérations pour le moins délicates et qui se font au détriment de la masse satellisable. De plus, la gravité à l'équateur est moins importante qu'ailleurs. Cela s'explique par la force centrifuge que subit la Terre en tournant sur son axe qui entraîne l'aplatissement de la Terre, c'est-à-dire que le rayon joignant un point de l'équateur au centre de la Terre sera plus long que celui reliant le centre de la Terre à l'un des pôles. Selon les chiffres de la NASA, le rayon équatorial serait de 6378,1 km alors que le rayon polaire ne serait que de 6356,8km soit une différence de 21,3 km.

Ce qui donne comme accélération :

$$9,78 \text{ m/s}^2 \text{ à l'équateur et } 9,84 \text{ m/s}^2 \text{ aux pôles}$$

Néanmoins, envoyer des fusées à partir de l'équateur n'est pas si simple que ça car il y a un aspect sécurité qui doit primer : pendant sa mise en orbite, la fusée va laisser retomber certains de ces étages qui ne lui seront plus utiles, et ces débris retombent parfois dans un rayon pouvant s'étendre jusqu'à 2000 km autour du point de lancement d'où l'impératif de se situer dans une zone non habitée.

Trois points de lancement sont alors privilégiés : Kourou en Guyane française à une latitude de  $5^\circ$  Nord et le Cap Canaveral (en Floride) à une latitude de  $28^\circ$ . Les Russes, quant à eux, possèdent une base de lancement à Baïkonour à une latitude de  $46^\circ$ , ce qui représente 55% d'énergie en plus nécessaire par rapport à l'équateur.

Kourou est certainement, du point de vue géographique, le lieu de lancement privilégié, il nécessite à peine 0,9% d'énergie en plus par rapport à l'équateur.



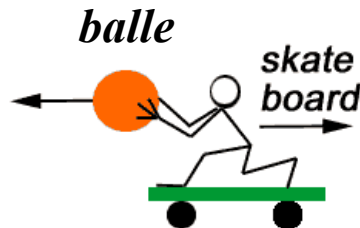
#### IV. Matériel : les moteurs

Nous voilà donc renseigné sur le trajet et le lieu de lancement. Maintenant il nous faut savoir quel moyen de propulsion utiliser autrement dit, quel type de moteur est le mieux adapter et avec quel carburant... Mais pour cela il nous faut certaines bases théoriques.

##### A) Modèle :

Imaginons un enfant sur une planche à roulette (skate-board) avec très peu de frottements lançant une grosse balle massive. Le skate-board sur lequel il se trouve se déplacera alors dans la direction du lancement de la balle mais dans le sens contraire

Le raisonnement qu'on peut appliquer à la fusée est fort semblable mais il faut de plus tenir compte de la variation de masse de la fusée.



##### B) Relation entre vitesse d'expulsion, masse et accroissement de la vitesse

A l'instant  $t_0$  du décollage, la fusée possède une vitesse nulle et grâce au gaz qu'elle propulse à grande vitesse, une accélération va être fournie à la fusée. A première vue, on imagine que la vitesse des gaz doit être élevée et que la fusée doit être légère pour que l'accélération soit maximale. C'est ce qu'on va effectivement confirmer par calculs.

Au départ, la fusée possède une masse  $M$  comprenant également une masse  $m$  de carburant qu'elle va éliminer petit à petit à une vitesse constante que nous appellerons vitesse d'expulsion et qu'on notera  $V_{exp}$ . Alors qu'à un certain moment la fusée aura une masse  $M$  animée d'une vitesse  $V$ , quelques instants plus tard elle n'aura plus qu'une masse de  $M - \Delta m$  mais animée d'une vitesse  $V + \Delta v$ .

Selon la loi de conservation de la quantité de mouvement, on écrit :

$$MV = (M - \Delta m)(V + \Delta v) + \Delta m(V + \Delta v - V_{exp})$$

$$\underline{MV} = \underline{MV} + M\Delta v - \underline{\Delta mV} - \underline{\Delta m\Delta v} + \underline{\Delta mV} + \underline{\Delta m\Delta v} - \Delta mV_{exp}$$

$$0 = M\Delta v - \Delta mV_{exp}$$

$$\Delta v = (\Delta mV_{exp}) / M$$

Étant donné qu'une augmentation  $\Delta m$  de gaz expulsé correspond à une diminution  $\Delta M$  de  $M$ , on peut remplacer  $\Delta m$  par  $-\Delta M$  dans l'équation, et on obtient :

$$\Delta v = (-\Delta M/M) V_{exp}$$

Si on considère une variation infinitésimale de  $M$ ,  $\Delta m$  devient  $dM$

$$dv = (-dM/M) V_{exp}$$

On peut maintenant intégrer, ce qui nous donne :

$$\int dv = \int - (dM/M) V_{exp}$$

ce qui nous donne en résolvant l'intégration

$$v_f - v_i = V_{exp} \ln (M_i/M_f)$$

Une autre démonstration se trouve également en annexe.

Ce résultat nous permet de nous rendre compte de la proportionnalité directe qui existe entre la variation de vitesse et la vitesse d'expulsion des gaz.

Pour obtenir une meilleure variation de vitesse, il faut que  $M_i$  sur  $M_f$  soit maximum, cependant, augmenter  $M_i$  n'est pas une bonne solution car la force poids serait plus importante, il vaut mieux diminuer au maximum  $M_f$ , d'où l'utilisation de fusées à étages qui se débarrassent de leurs réservoirs à carburants une fois vides.

### C) Description des moteurs

Depuis plusieurs années les ingénieurs se sont penchés sur différents types de moteurs, certains ont été abandonnés et d'autres, inventés il y a déjà quelques années, sont toujours d'application alors que de tous nouveaux modèles ont fait leur apparition. En fait, ils ont chacun leurs avantages et leurs défauts. Le tout étant de trouver un compromis entre la poussée, la durée de la poussée et la masse du carburant

En effet, la poussée, est une force égale à vitesse d'éjection multipliée par la masse de gaz éjectée en une seconde (D).

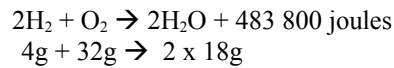
$$F(N) = V_{\text{exp}} \cdot D \text{ [m] [s}^{-1}\text{] [kg] [s}^{-1}\text{]} = m \cdot a \text{ (N)}$$

La force est donc proportionnelle à la vitesse d'expulsion des gaz. Et pour une même poussée, plus la masse est faible plus l'accélération est importante.

#### a) Le moteur à propulsion par réaction chimique

Ce moteur comprend essentiellement la chambre de combustion où a lieu la réaction chimique et la tuyère qui règle l'écoulement des gaz.

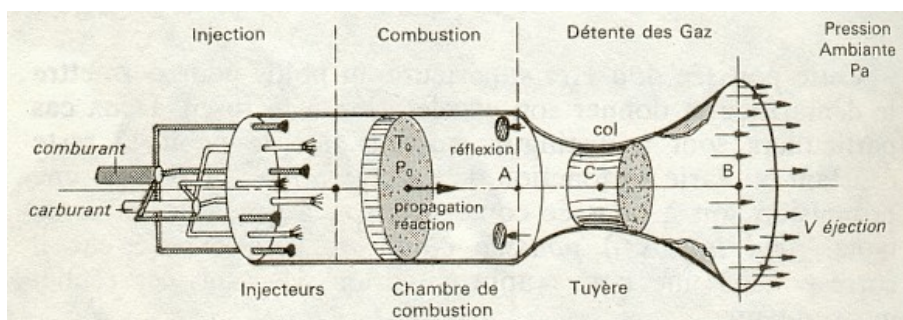
La réaction qui a lieu est celle de la formation de deux molécules d'eau à partir de deux molécules de dihydrogène et d'une molécule de dioxygène



Cette réaction est déclenchée par une étincelle est très énergétique et produit de la chaleur. L' $\text{H}_2$  (le carburant) et l' $\text{O}_2$  (le comburant) sont en fait stockés sous forme liquide à une température de  $-150^\circ\text{C}$ . Les deux composants ne trouvent pas tout à fait dans le rapport stœchiométrique parfait étant donné que le mélange du carburant et du comburant n'est pas parfaite, on va alors augmenter la richesse du mélange via un accroissement de 10 à 20% du carburant.

Le comburant est en fait stocké soit sous forme d'oxygène liquide ou sous forme de composés oxygénés de l'azote ( $\text{NO}_3\text{H}$  ou  $\text{N}_2\text{O}_4$ ...) soit sous forme d'un composé du fluor : le trifluorure de chlore.

Pour être certain du bon mélange des composants, la réaction doit être rapide et complète. Pour ce faire on entrelace les injecteurs. La pression aux extrémités des injecteurs est très élevée mais diminue fort rapidement, ce qui fait que les composants passent de l'état liquide à gazeux de manière spontanée. Ensuite, il y a allumage du mélange par une étincelle. Les corps sont alors dits hypergoliques. La réaction se propage maintenant dans la chambre de combustion. La température y est élevée : généralement entre  $2500$  et  $4000^\circ\text{C}$  mais pour des raisons évidentes, on s'astreint à ne pas dépasser les  $1000^\circ\text{C}$  sur les parois. La pression quant à elle s'élève à environ  $115\text{atm}$ . A ces contraintes s'ajoutent les vibrations dues aux turbulences mais surtout à un retour de gaz qui auraient du passer dans la tuyère mais qui vont plutôt se réfléchir à cause d'une mauvaise expansion des gaz. Il peut parfois s'en suivre une oscillation entre les parois de la chambre, ce qui pourrait compromettre le fonctionnement des moteurs.



Moteur de propulsion à réaction chimique

### Fiche : Principe des moteurs à propulsion

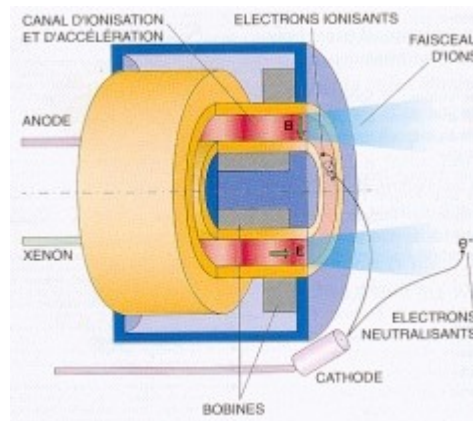
En fait, la valeur de la force propulsive  $F = V_{\text{exp}} \cdot D$ , incite à augmenter la vitesse d'expulsion des gaz. Or, à l'extrémité de la chambre de combustion, les gaz n'ont une vitesse que de quelques dizaines de mètres par seconde. Si on rétrécit progressivement le tuyau de la chambre de combustion, on remarque que cette vitesse augmente jusqu'à une certaine valeur qui correspond à la vitesse du son à la température des gaz. Si on rétrécit encore le diamètre du tuyau, la vitesse rediminue. Par contre, si à cet instant on élargit le tuyau, la vitesse du son peut-être dépassée et la vitesse des gaz continue à croître. D'où la présence d'un convergent (A-C sur le schéma) et d'un divergent (C-B sur le schéma) cette partie est appelée la tuyère (A-B sur le schéma). Ces explications restent bien sûr valables pour les autres moteur à propulsion.

On obtient comme valeurs numériques d'expulsion des gaz pour le moteur à propulsion chimique : 20m/s à l'entrée du convergent, 1500m/s au col de la tuyère et à la sortie du divergent quelques 4500m/s. Il faut noter que ces chiffres sont approximatifs : ils dépendent d'un moteur à l'autre et évoluent au cours des années. Les chiffres cités ci dessus correspondent principalement à ceux du moteur Vulcain élaboré pour Ariane 5<sup>1</sup>.

Ce type de moteur à donc une très forte poussée (de l'ordre de 110 000 newtons) grâce à une vitesse d'éjection des gaz de 4,5 km/s. Cependant, le temps de combustion n'est que de 21minutes et le système de propulsion occupe 55% de la masse totale.

### b) Le moteur ionique :

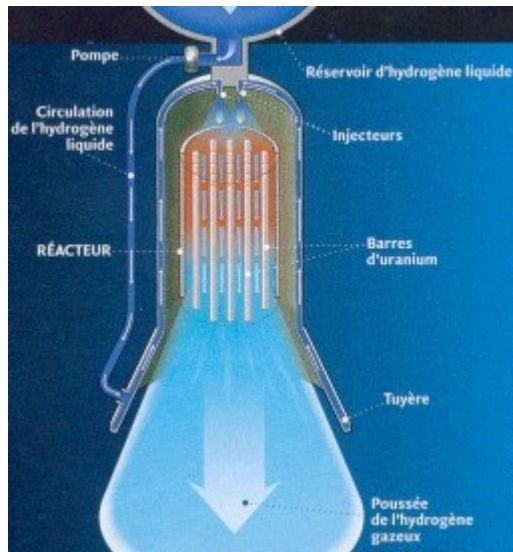
Le principe général consiste à ioniser des atomes de xénon en les dépouillant de leurs électrons. Les cations sont alors accélérés via un champ électrique.



Le gaz xénon pénètre en fait dans un canal torique où il est ionisé par un flux d'électrons provenant de la cathode. Pour augmenter le pourcentage d'ionisation, on utilise un champ magnétique (B conf. schéma) perpendiculaire à l'axe du tore. De plus, ce champ magnétique va permettre de réduire le courant d'électrons vers l'anode, créant ainsi le champ magnétique E, responsable de l'accélération des ions. Factuellement, l'ionisation du xénon, l'accélération de ses cations et la focalisation du faisceau de cations ont lieu dans les dix derniers millimètres du canal torique. A l'extérieure, une partie des électrons émis par la cathode sont attirés par l'anode et pénètrent dans le canal d'ionisation, c'est là qu'ils interagissent avec le champ magnétique B et qu'ils dépouillent les atomes de xénon de leurs électrons périphériques tandis qu'une autre partie des électrons sont envoyés dans l'espace pour neutraliser les cations sortant afin de ne pas transférer de charges électriques au satellite. Avec une poussée de seulement 30 newtons, le moteur à propulsion ionique ne peut fonctionner seul. Mais il permet de conserver cette poussée pendant environ 80 jours et n'occupe qu'une vingtaine de pour cents de la masse totale de la fusée.

<sup>1</sup> Chiffres basés essentiellement sur le Dossier POUR LA SCIENCE, La science des transports, 1998

### c) Le moteur nucléaire :



Dans le moteur nucléaire, la fission du combustible (uranium ou plutonium) dégage de très grandes quantités d'énergie servant à chauffer l'hydrogène stocké dans un vaste réservoir d'où il est pompé pour être injecté dans le réacteur. En passant entre les barres d'uranium il passe d'une température de  $-250^{\circ}\text{C}$  à  $2500^{\circ}\text{C}$  et d'un état liquide, il se retrouve rapidement en gaz augmentant ainsi considérablement son volume et la pression devient énorme en vertu de la loi des gaz parfaits :

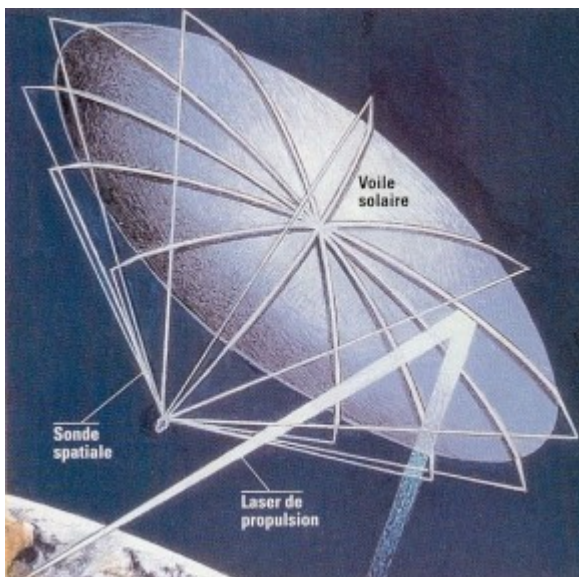
$$P.V = n R.T$$

où  $P$  est la pression,  $V$  le volume,  $n$  le nombre de moles,  $R$  une constante en fonction des unités choisies et  $T$  la température en  $^{\circ}\text{K}$

Il s'en suit une échappée des gaz par la tuyère avec une vitesse d'éjection nettement supérieure à celles obtenues par les autres moteurs. De plus, cette propulsion consomme de faibles quantités d'hydrogène qui, par ailleurs, est léger à transporter.

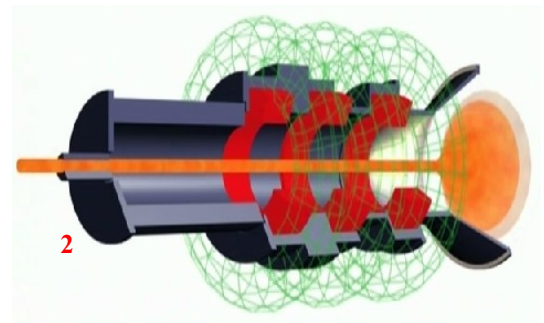
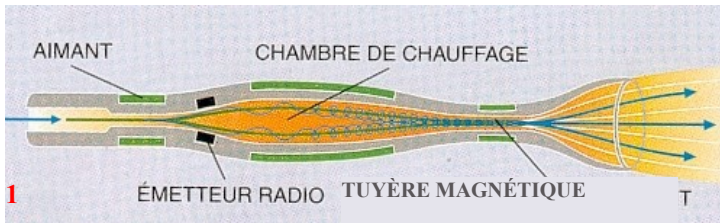
La poussée de ce type de moteur est de l'ordre de 67 000 newtons pendant environ une demi-heure. Tout cela pour 30% de la masse totale de la fusée. Ce moyen est donc bien plus rapide. Et en plus, les réacteurs produisent de l'électricité pouvant alimenter le vaisseau. Toutefois beaucoup s'opposent à ce moteur nucléaire pour des raisons de sécurité (radioactivité du combustible, risques d'explosion). Voilà pourquoi ils ont, pour le moment, été écartés.

### d) La voile solaire ou à photons



Nul besoin de carburant, ni de moteur, seulement une grande voile solaire. Celle-ci est frappée par les rayonnements solaires qui lui fournissent une certaine énergie certes très faible mais qui serait fournie pendant aussi longtemps qu'il le faudra. Si on ne considère que les rayons solaires, il faudrait un an pour transporter 25 tonnes de la Terre à Mars avec une toile de  $4\text{km}^2$  de densité  $1\text{g}/\text{m}^2$  ! Notons qu'on pourrait augmenter l'énergie fournie par des rayons lasers en provenance de la Terre. De nos jours, on fabrique des fibres de carbones fines telles un cheveu et donc très légères mais la toile doit être à ce point grande que les risques d'emmêlement sont grands (c'est d'ailleurs ce qu'il s'est passé avec Znamya en 1993). Un projet plus réaliste conçoit de capter, non plus la lumière du Soleil, mais les particules chargées émises par vents solaires avec une voile magnétique.

e) Le moteur Vasimir

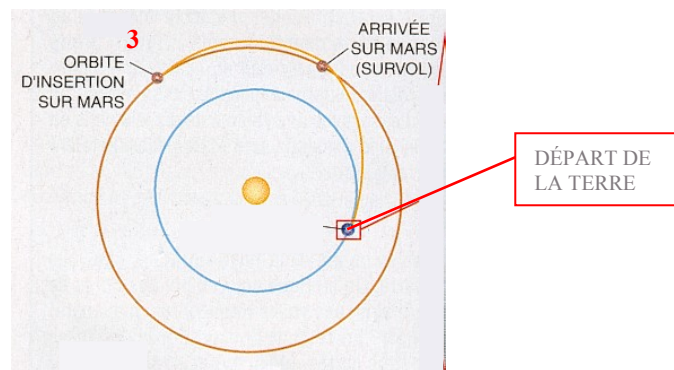


Le Vasimir (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket), en français : « fusée magnétoplasmique à impulsion spécifique variable » possède un système à plusieurs vitesses permet d'obtenir différents rendements pour différentes poussées.

Tout d'abord, de l'hydrogène entre dans le moteur et est aussitôt ionisé par des ondes radio avant d'être emmené dans la chambre de chauffage (conf. schéma 1) où règne un fort champ magnétique (conf. schéma 2). Ce champ magnétique a pour but d'éviter le contact entre le plasma et les parois du moteur. En effet, le bombardement par onde radio élève la température du plasma à quelques dix millions de degrés. A cette température, on conçoit donc mal l'utilisation d'une tuyère habituelle, celle-ci est alors remplacée par une tuyère magnétique. En réglant le chauffage et la puissance de la tuyère, le pilote peut modifier la vitesse d'éjection et donc la poussée.

Une forte ouverture pourrait être comparée avec la première vitesse d'une voiture : poussée forte, mais un rendement faible. Tandis qu'en fermant l'étranglement de sortie, on réduit le nombre de particules excitées mais, en même temps, on augmente la température qui entraîne une augmentation de pression et donc, la vitesse d'expulsion est accélérée (on serait dans ce cas-là en cinquième).

Ce nouveau type de moteur offrirait une nouvelle possibilité de voyage interplanétaire. Après une orbite en spirale de plus en plus grande autour de la terre pendant trente jour, le pilote enclencherait successivement la première jusqu'à la cinquième à mis parcours entre la Terre et Mars, et effectuerait la seconde moitié du voyage en rétrogradant. Le vaisseau croiserait à deux reprise l'orbite martienne : une première fois pour lâcher une partie de ses composantes et la seconde fois pour atterrir (voir schéma trois)



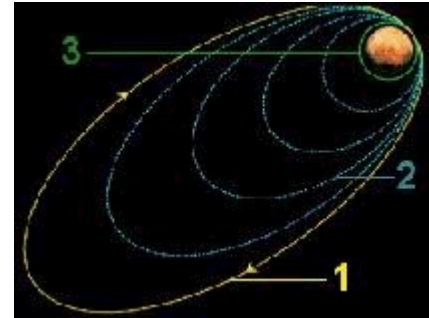
Il existe encore d'autre types de moteurs comme le propulseur à effet hall, la propulsion magnétohydrodynamique, les moteurs à induction pulsée,... mais ceux-ci sont généralement des moteurs supplémentaires, ou pour des petits satellites et sont beaucoup moins courants.

## V L'aérofreinage

Voilà donc notre navette lancée à une vitesse de plusieurs kilomètres par secondes dans l'espace interplanétaire, là où la présence de gaz est très faible. La navette animée de sa grande vitesse va passer frôler Mars selon l'orbite de Hohmann, mais si rien n'est fait, le vaisseau va continuer sa course, certes modifiée par l'attraction de Mars mais pas assez pour que la sonde soit en orbite autour de la planète.

Il faut donc en tout premier lieu se placer en orbite de la planète Mars (1), par allumage des moteurs, afin de pouvoir profiter de la gravitation martienne. Une fois en orbite, la navette effectue quelques tours, laissant le temps à la vérifications des paramètres.

Ensuite, il faut progressivement diminuer l'excentricité de l'orbite (2). En effet, l'orbite initiale de capture possède son apoapse<sup>2</sup> à quelques 54 000 km et son périapse<sup>3</sup> à 300km de la surface martienne. Pour ce faire, on peut soit allumer les moteurs à l'apoapse pour diminuer le périapse (si celui-ci est trop haut) de sorte que la sonde se trouve dans la haute atmosphère de la planète et puisse diminuer sa vitesse par aérofreinage, également appelé freinage atmosphérique.



Le principe de cette technique est simple : déployer au maximum les panneaux solaires prolongés de plaques (les aérofreins) pour que les gaz de l'atmosphère ralentissent la fusée par frottements. Malheureusement, les frictions vont engendrer une augmentation de la température à la surface de la navette, voilà pourquoi le périapse ne peut se trouver en deçà de 120km, limite sous laquelle la densité de gaz est trop importante, ce qui engendrerait une chaleur trop importante pour la navette. Ce freinage au périapse va abaisser l'altitude du prochain passage à l'apoapse. En répétant ainsi plusieurs fois l'opération, on va circulariser peu à peu l'orbite en diminuant l'apoapse mais en gardant le périapse plus ou moins constant. En même temps, la période de révolution va diminuer.

En fait, on ne va pas garder l'apoapse constante, on va augmenter sa distance de sorte à obtenir un orbite circulaire à environ 450km de hauteur autour de Mars, sinon la descente verticale vers le sol serait trop rapide et la chaleur due au frottements augmenterait excessivement.

On arrive enfin à la phase finale, le « end game », avec une descente qui se fait par allumage des moteurs puis par ouverture des parachutes à 5km de haut lorsque la navette à une vitesse de 1500km/h.

Ce système, relativement simple sur papier, ne l'est évidemment pas en pratique. Les conditions météorologique venant perturber la trajectoire, de plus en cas de problème, la navette devra se passer des ingénieurs au sol car le contact est impossible lorsque la fusée est derrière Mars, et le temps de communication, ne pouvant pas dépasser la vitesse de la lumière, est bien trop long.

## VI. Voyage retour

Une fois la mission terminée sur la planète, l'heure du retour est là. Après toutes les difficultés rencontrées, les astronautes ont une certaine appréhension quant au retour. Heureusement pour eux, la gravité martienne est nettement plus faible que celle de Mars, ce qui facilitera le décollage. Et comme la gravité est plus forte aux alentours de la Terre, l'atterrissage sera alors plus aisé étant donné que le vaisseau sera plus facilement pris dans les griffes de la gravité terrestre. Enfin, l'ambiance terrienne sera beaucoup plus accueillante, plus chaleureuse pour accueillir les cosmonautes en héros.

<sup>2</sup> Point de l'orbite le plus éloigné de la planète

<sup>3</sup> Point de l'orbite de plus proche de la planète

## **Annexe**

### Autre démonstration :

$$F = V_{\text{exp}} \cdot D = V_{\text{exp}} \cdot (-dm/dt)$$

La présence du signe moins se justifiant par le fait que la quantité de matière de gaz expulsée est la quantité de masse perdue par la fusée.

Par Newton, on sait également que

$$F = m \cdot a = m (dv/dt)$$

En égalant ces deux équations, on obtient :

$$\begin{aligned} V_{\text{exp}} \cdot (-dm/dt) &= m (dv/dt) \\ -V_{\text{exp}} \cdot dm &= m \cdot dv \\ -(1/m) V_{\text{exp}} \cdot dm &= dv \end{aligned}$$

Par intégration,  $V_{\text{exp}}$  étant une constante,

$$\begin{aligned} V_{\text{exp}} \int (-1/m) \cdot dm &= \int dv \\ V_{\text{exp}} \ln(M_i/M_f) &= v_i - v_f \end{aligned}$$

### Table de la constante des gaz parfaits (R) :

$$8,314510 \text{ J K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$0,0831451 \text{ L} \cdot \text{bar K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$0,08206 \text{ L} \cdot \text{atm K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$62,36 \text{ L} \cdot \text{Torr K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

### Fiche de Valeur :

Dans la suite du travail nous aurons besoin de plusieurs données et ceci pas mal de fois d'où l'établissement d'une fiche rappelant les valeurs nécessaires.

Remarquons que les chiffres sont acceptables mais comportent cependant une approximation plus ou moins légère (par exemple la période de révolution de la terre n'est pas 365 jours mais 365 jours 5heures 57 minutes...). Le but de ce travail réside plus dans la conception physique et sa rigueur que dans la précision mathématique