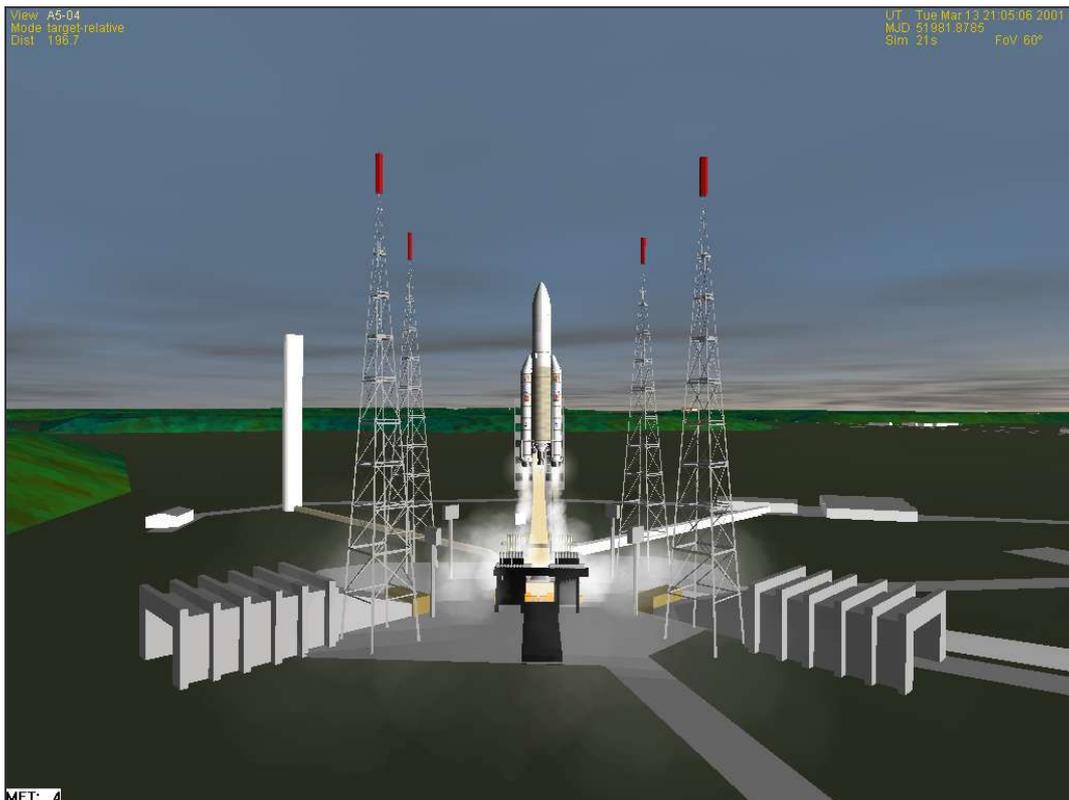


NAVIGUER DANS L'ESPACE MAIS C'EST TRES SIMPLE ! (OU PRESQUE ...)

Par PAPYREF



Mise à jour le 15/02/2005

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	Page 03
2. DEFINITIONS	Page 03
3. PRINCIPES FONDAMENTAUX POUR LA NAVIGATION	Page 05
4. THEORIE DE LA RENCONTRE	Page 10
5. PERMIS DE CONDUIRE	Page 14
6. EXERCICES DE MODIFICATION D'ORBITE	Page 24
7. ESSAIS DE MANIABILITE	Page 33
8. CONCLUSION	Page 36

1 - INTRODUCTION

J'ai toujours été passionné par l'astronautique et tout petit je rêvait de partir dans l'espace. Grâce à Martin et son Orbiter et à tous les autres contributeurs dont Dan Steph nous avons maintenant un outil qui nous permet tous les exploits interplanétaires mais qui peut paraître difficile à utiliser.

J'ai écrit cette note pour essayer d'expliquer simplement les termes et règles de base qui permettront je l'espère aux débutants de comprendre ce qu'il faut faire pour pouvoir naviguer dans l'espace.

J'ai essayé d'être compréhensible et j'ai simplifié mes explications pour donner les idées fondamentales. La théorie mathématique des mouvements dans l'espace est complexe et il n'était pas question de la développer ici.

Les exercices supposent que vous savez utiliser Orbiter suffisamment pour allumer les moteurs, positionner votre vaisseau et ouvrir un MFD pour pouvoir faire les quelques exercices que je vous propose pour mieux comprendre la théorie.

Alors bon voyage et rendez-vous sur la Lune ou plus loin un de ces jours !

2 - DEFINITIONS

2.1 – Le système solaire

Il comprend actuellement 9 planètes connues qui tournent suivant des orbites elliptiques autour du soleil dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (sens anti-horaire) pour un observateur qui serait placé au pôle nord du soleil.

De même les planètes ont une rotation anti-horaire sur leur axe par rapport à leur pôle nord à l'exception de Vénus qui effectue une rotation horaire (anomalie peut être due à une collision).

2.2 - L'écliptique

On appelle écliptique d'un astre (planète ou satellite) le plan de son orbite autour de l'astre auquel il est assujéti (Terre par rapport au Soleil ou Lune par rapport à la Terre par exemple)

En astronomie amateur on prend comme **plan écliptique de base** celui de la terre et l'on peut définir les inclinaisons des plans écliptiques des autres planètes par rapport à cette référence.

Il est remarquable de constater qu'à l'exception de Pluton dont le plan écliptique est incliné de $17^{\circ}17'$ par rapport à la Terre, toutes les autres ont un plan incliné à moins de 10° . Les planètes tournent donc dans une tranche relativement fine autour du Soleil et pour passer de l'une à l'autre on aura intérêt à voyager dans un plan proche du plan écliptique de la Terre

Les planètes tournent sur elle-même sur un axe qui est plus ou moins incliné par rapport à leur plan écliptique. En général l'angle est inférieur à 30° sauf pour Uranus qui a son axe pratiquement dans son plan orbital.

L'axe de la Terre est incliné à $23^{\circ}17'$.

2.3 - Les orbites

Il y a trois sortes d'orbites qui sont des courbes mathématiques appelées coniques : ellipse, parabole et hyperbole. Ces courbes sont définies dans leur plan à partir de deux points appelés foyers.

Le corps de référence pour une trajectoire occupe un foyer de l'orbite. Par exemple, le soleil est un foyer pour les orbites elliptiques de toutes les planètes du système solaires ou pour les orbites paraboliques ou hyperboliques des comètes.

L'ellipse est une orbite fermée qui est décrit avec une durée de révolution fixe (en un temps fixe) Les planètes ou satellites décrivent une ellipse autour du corps de référence autour duquel elles gravitent.

La parabole ou l'hyperbole sont des orbites ouvertes dont le point le plus éloigné se situe à l'infini. Les comètes et astéroïdes décrivent en général des orbites paraboliques ou hyperboliques. Certaines ont toutefois des orbites elliptiques très allongées comme la comète de Halley qui revient tous les 75 ans.

Voici quelques définitions de base que nous utiliserons par la suite (en français entre parenthèses)

Periapsis (Périhélie)

C'est par rapport au corps de référence le point le plus proche de l'orbite et c'est là que la vitesse sur l'orbite est maximum.

Apoapsis (Aphélie)

C'est par rapport au corps de référence le point le plus éloigné de l'orbite et c'est là que la vitesse sur l'orbite est minimum (pour une orbite hyperbolique ce point se situe à l'infini)

Eccentricity (Excentricité)

Ce coefficient définit la nature de l'orbite. Pour un cercle, il est égal à 0 pour une ellipse il est compris entre 0 et 1 et pour une hyperbole il est supérieur à 1

Plus il se rapproche de 1 et plus l'ellipse s'allonge

On peut calculer l'excentricité à partir des valeurs de l'Aphélie et de la Périhélie suivant la formule :

$$\text{Excentricité} = \frac{\text{Aphélie} - \text{Périhélie}}{\text{Aphélie} + \text{Périhélie}}$$

Pour la Terre par exemple Ap=157 millions de Km et Pe=142 millions de Km ce qui donne :

$$E = \frac{(157 - 142)}{(157 + 142)} = 0,0167$$

Dans l'ensemble, les orbites des planètes sont assez proches de cercles.

Prograde

On s'oriente dans le sens de parcours de l'orbite

Retrograde

On s'oriente dans le sens opposé au sens de parcours de l'orbite (pour freiner par exemple on retourne le vaisseau avec le derrière en avant pour avoir le propulseur principal vers l'avant)

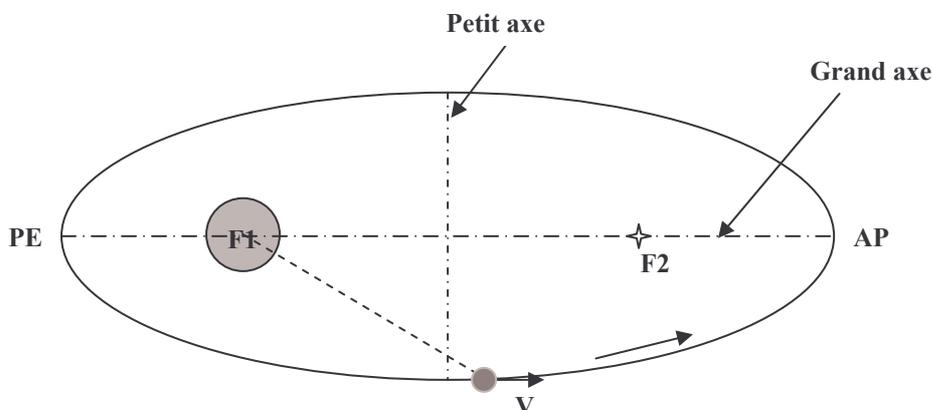
Velocity (Vitesse)

C'est la vitesse tangentielle du corps sur son orbite à un instant donné.

Orbite elliptique

L'ellipse possède deux axes de symétrie et deux foyers dont un foyer F1 est occupé par le corps de référence autour duquel gravite le satellite à la vitesse V (vitesse tangentielle sur son orbite)

L'Apoapsis et le Periapsis sont les extrémités du grand axe



Pour une parabole ou une hyperbole le foyer F2 et l'Apoapsis sont reportés à l'infini.

La parabole et l'hyperbole sont des courbes ouvertes et après son passage au Périapsis le satellite s'éloigne vers l'infini et ne reviendra jamais.

2.4 - Données utiles

Nous avons résumé quelques données utiles pour les planètes et la Lune dans le tableau suivant :

Nom	Diamètre Km	Inclinaison orbitale	Inclinaison axe	Excentricité orbitale	Distance au soleil 10 ⁶ Km	Durée de révolution
Mercuré	4.845	7°	2°	0,206	0059,14	88j
Venus	12.249	3°26'	13°	0,0068	0108,20	224j 7h
Terre	12.756	Base	23°27'	0,01674	0149,60	365j 6h
<i>Lune</i>	<i>3474</i>	<i>5°14</i>	<i>1°54'</i>	<i>0.0549</i>		
Mars	6.710	1°51'	25,2°	0,093	0228,90	688j
Jupiter	142.739	1°22'	3°	0,048	0779,20	11ans316j
Saturne	120.670	2°29'	26,7°	0,056	1432,00	29ans174j
Uranus	50.769	0°46'	98°	0,046	2878,00	84ans 28j
Neptune	48.600	1°46'	1°51'	0,009	4505,00	164ans321j
Pluton	2.200	17°17'	?	0,248	6084,00	247ans314j

3 - PRINCIPES FONDAMENTAUX POUR LA NAVIGATION

Nous voilà dans notre vaisseau pour affronter l'univers. Il est bon de rappeler quelques règles utiles pour réussir notre promenade.

Nous voulons nous déplacer dans l'espace mais la principale difficulté est que notre point de départ et notre point d'arrivée sont en mouvements. De plus les corps se déplacent dans des plans différents et ils s'attirent réciproquement.

Tout ceci complique notre tâche.

3.1 Altitude

Si nous sommes posés sur une planète il est préférable d'opérer d'abord une mise en orbite autour d'elle en tenant compte de quelques principes pour économiser l'énergie:

Plus la masse du corps à placer en orbite est importante, plus il faut dépenser d'énergie pour le placer sur une orbite donnée.

La vitesse de mise en orbite ne dépend pas de la masse. (Spoutnik ou Atlas ont la même vitesse sur une orbite identique, ça paraît drôle mais c'est vrai !)

Pour des corps sans atmosphère on aura donc intérêt à se placer sur une orbite la plus basse possible par exemple à une altitude de 50 Km. Par contre pour un corps possédant une atmosphère comme la Terre il faudra une altitude supérieure à 200 Km pour pouvoir se stabiliser sans être freiné par l'atmosphère et sans risquer de brûler (essayez de descendre en dessous de 70 Km !)

Pour la Terre on considère comme basses des altitudes comprises entre 200 et 1600 Km. C'est dans cette zone que se situent la majorité des satellites.

Les satellites de télécommunications en général géostationnaires se situent à environ 36000 Km à la vitesse de 3100 m/s pour avoir un temps de révolution de 24 heures leur permettant de rester au dessus d'un point donné de la terre.

3.2 - Vitesse

Un peu de calcul simple autour d'une orbite circulaire:

Si un corps de masse M tourne en orbite circulaire autour d'une planète de rayon R à une altitude H et à une vitesse V il est soumis à 2 forces qui s'équilibrent :

- la force centrifuge due à sa vitesse et qui tend à l'éloigner de la planète
- la force d'attraction de la planète qui tend à l'en rapprocher.

Si les deux forces sont égales il tourne sur une orbite fixe.

Le corps est à une distance R+H du centre de la planète et la force centrifuge est égale à $M \cdot V^2 / (R+H)$

La force d'attraction est inversement proportionnelle au carré de la distance du corps au centre de la terre et pour un champ d'intensité G à l'altitude H elle est égale à $M \cdot G (R/R+H)^2$

Si les deux forces sont égales à l'équilibre on obtient :

$$V^2 = G \cdot R^2 / (R+ H)$$

Le temps de révolution est égal à :

$$T = 2 \cdot \text{PI} \cdot (R+H) / V$$

Si l'on applique les formules pour un satellite tournant autour de la terre de rayon

R = 6378000 m a une hauteur H = 500000 m dans le champ de gravité de la terre G = 9,81 m/s² on obtient

V = 7546 m/s et un temps de révolution de 5724 s soit 1h 35' 24s

On peut retenir qu'en orbite basse circulaire autour de la terre la vitesse sera de 7,5 Km/s à 7,9 Km/s Pour échapper à l'attraction de la terre il faut une vitesse initiale de 11 Km/s et la trajectoire sera hyperbolique

Pour échapper au système solaire il faut une vitesse initiale de 16.4 Km/s

On voit donc que l'énergie à communiquer au corps lancé est importante et on a intérêt à faire le tir le plus possible vers l'est en partant d'une base située le plus près possible de l'équateur de la planète d'où l'on part. On bénéficie dans ce cas de la vitesse de rotation de la planète pour économiser de l'énergie (donc du carburant)

La terre par exemple tourne sur elle-même en 24 heures et comme sa circonférence à l'équateur est environ 40000 Km, la vitesse est de 1660 Km/h (très nettement supersonique!)

En France la vitesse n'est plus que de l'ordre de 1150 Km/h

Cet appoint de vitesse est loin d'être négligeable et il est économique de partir vers l'est et à la latitude la plus près possible de 0°

Retenons ces règles souhaitables pour une mise en orbite économique :

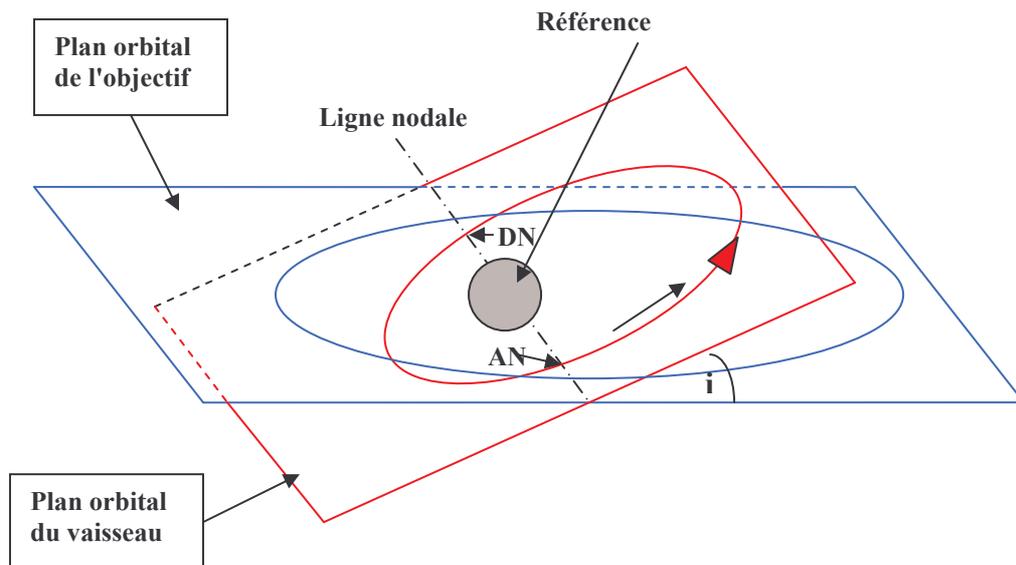
Tir vers l'est d'un point situé le plus près possible de l'équateur (bravo Kourou !)
Mise en orbite basse si possible

3.3 – Plan de l'orbite

Si tout s'est bien passé nous tournons plus ou moins rond autour de notre planète de départ.

Si nous désirons aller plus loin vers un autre corps céleste un petit problème se pose car il n'y a aucune raison pour que notre orbite se situe exactement dans le même plan que celle du corps que nous voulons atteindre.

Pour faciliter notre rencontre il est préférable que les deux orbites soient dans le même plan ou en tout cas dans des plans dont la différence d'inclinaison soit inférieure à 1 degré



L'orbite du vaisseau coupe le plan de l'objectif en deux points appelés points nodaux situés sur la ligne nodale.

AN est le point nodal ascendant puisqu'à partir de là l'orbite du vaisseau passe au dessus du plan orbital de l'objectif

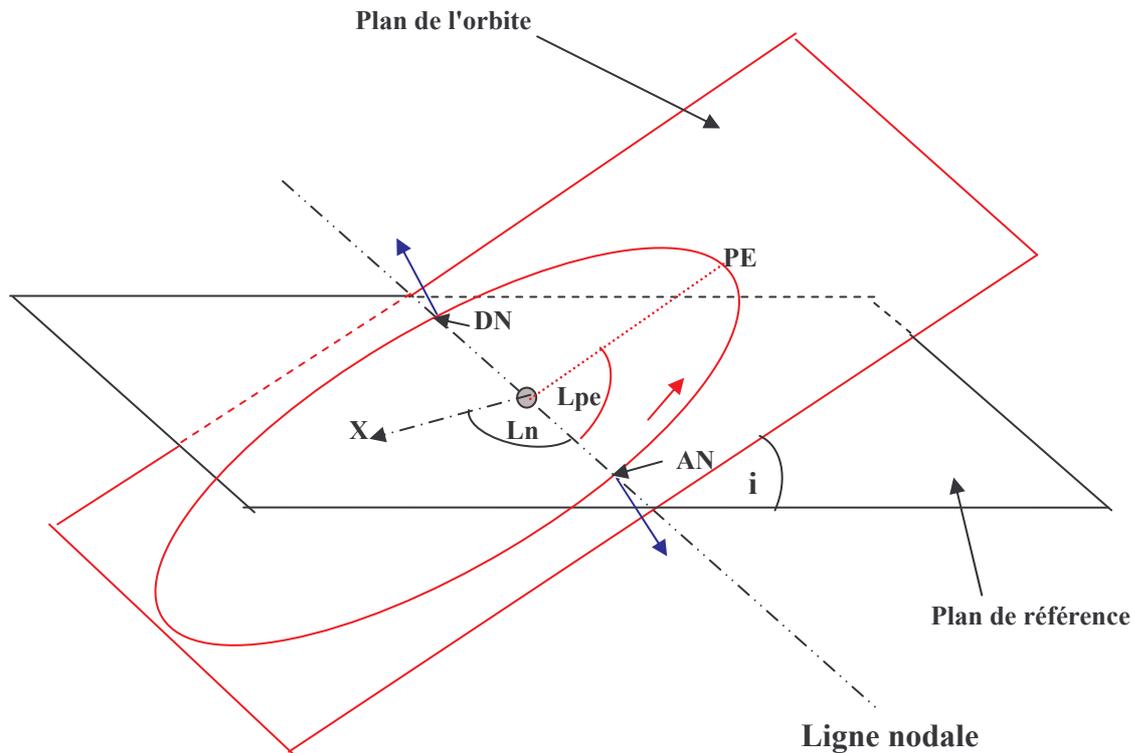
DN est le point nodal descendant puisqu'à partir de là l'orbite du vaisseau passe au dessous du plan orbital de l'objectif

i est l'angle d'inclinaison entre les deux plans qu'il faut réduire au minimum

Il est utile de préciser comment on caractérise une orbite dans l'espace en 3D par rapport à un plan de référence (voir figure)

Il fallait y penser, il faut connaître 3 paramètres :

- l'inclinaison i du plan orbital de l'orbite par rapport au plan de référence
- la longitude du point nodal ascendant **AN** par rapport à un axe de référence **X** qui est défini comme la direction du centre du soleil lorsqu'il se trouve au point de son orbite qui correspond à l'équinoxe de printemps (point vernal) Sur la figure c'est l'angle **L_n**
- la longitude **L_{pe}** du Périapsis dans le plan orbital par rapport à la ligne nodale. Sur la figure c'est l'angle **L_{pe}**



On voit que l'on peut "aplatir" le plan orbital sur le plan de référence en le faisant tourner autour de la ligne nodale en réduisant l'inclinaison i à zéro.

La meilleure façon de réaliser l'opération est de tourner le vaisseau perpendiculairement à son orbite et d'effectuer une poussée au point nodal ascendant ou descendant pour avoir une accélération dans le sens des flèches bleues.

Si l'on fait varier seule la longitude L_n du point nodal ascendant on fait tourner le plan de l'orbite sans modifier son inclinaison

Si l'on fait varier seule la longitude L_{pe} de la périhélie PE on va faire tourner l'orbite dans son plan.

Heureusement les calculateurs de bord nous aideront pour réaliser ces manœuvres comme nous le verrons plus loin.

Retenons pour l'instant la règle simple :

Pour changer l'inclinaison du plan orbital il faut effectuer une poussée perpendiculaire à ce plan à un des points nodaux, suivant une direction "vers le bas" au point ascendant AN et "vers le haut" au point descendant DN

Attention cette opération peut nécessiter une poussée pendant un temps prolongé si l'inclinaison est importante et pour cette raison il vaut mieux que le cap de lancement soit choisi pour que l'orbite après lancement soit le moins incliné possible par rapport à celle de l'objectif

3.4 - Comment modifier une orbite dans son plan ?

Très simple si l'on connaît un principe élémentaire qui s'applique dans tous les cas (j'utilise les noms anglais car ce sont ceux qui figurent sur les MFD) :

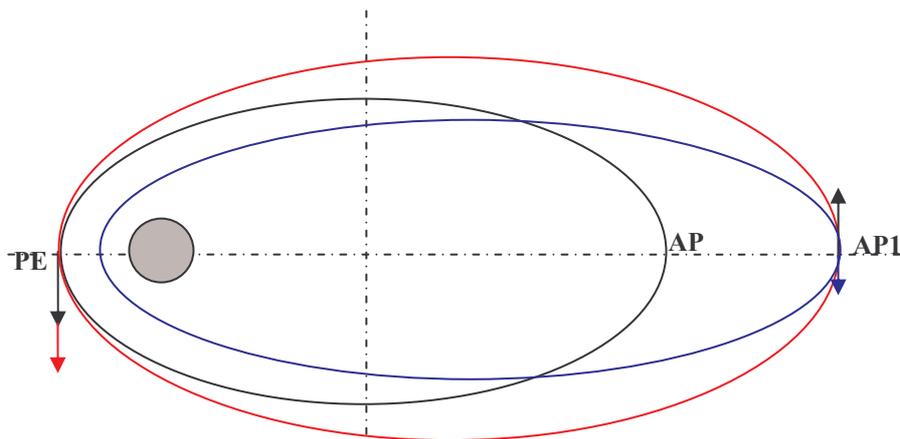
Si l'on effectue une poussée dans le sens prograde au periapsis on augmente l'apoapsis
 Si l'on effectue une poussée dans le sens prograde à l'apoapsis on augmente le periapsis
 Si l'on effectue une poussée dans le sens retrograde au periapsis on diminue l'apoapsis
 Si l'on effectue une poussée dans le sens retrograde à l'apoapsis on diminue le periapsis

On peut retenir simplement que :

Si on augmente la vitesse tangentielle en un point de l'orbite on va éloigner le point opposé à 180° et si on la diminue, on va le rapprocher
Suivant le sens de la poussée, le point ou nous opérons va être le nouveau Periapsis (si on accélère) ou le nouveau Apoapsis (si on ralentit)

Exemple ci-dessous.

Notre orbite d'origine est en noir. Si nous augmentons la vitesse au periapsis PE, en allumant le moteur principal nous éloignons l'apoapsis AP pour avoir une nouvelle orbite en rouge.
 Si au nouvel apoapsis AP1 nous diminuons la vitesse (en retournant le vaisseau dans le sens retrograde et en allumant le moteur principal) nous obtenons une nouvelle orbite en bleu dont le periapsis est plus proche que le premier.

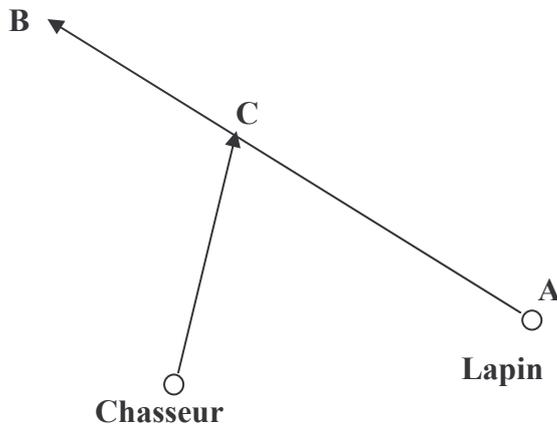


4 - THEORIE DE LA RENCONTRE

Il nous reste à faire encore un peu de théorie pour comprendre comment entreprendre un grand voyage loin de notre bonne vieille terre.

Pour le réaliser il nous faudra utiliser un moyen de calcul élaboré qui définira et permettra le contrôle de la trajectoire (TRANSX, IMFD, NAVMFD...) Nous étudierons cela par la suite

4.1 – Analogie avec la chasse



Un chasseur à l'arrêt veut tirer un lapin qui traverse un champ devant lui en allant de A vers B et se trouve en A quand il le voit. Compte tenu de son expérience il va tirer "devant" la position A du lapin pour que sa balle atteigne le lapin au point C au moment où il y parvient. Le temps mis par la balle pour arriver en C doit être égal à celui mis par le lapin

Le cerveau du chasseur a fait le travail d'un calculateur pour apprécier la trajectoire du lapin et la direction et l'instant du tir pour atteindre cette cible. Il tient compte également d'éléments extérieurs comme le vent qui peut dévier la trajectoire de la balle.

Dans ce cas nous avons pris une trajectoire simple pour le lapin et il ne peut se déplacer que dans un plan qui est le sol. On dit qu'il est dans un espace à 2 dimensions qui est un plan (largeur, profondeur)

Ce serait plus difficile pour tirer un oiseau qui peut en plus changer d'altitude en volant. On dit dans ce cas que l'oiseau se déplace dans un espace à 3 dimensions qui est un volume (largeur, profondeur et hauteur)

Le cerveau-calculateur du chasseur va avoir plus de mal à trouver qu'elle sera la position du point de rencontre théorique au moment où il va tirer

Supposons en plus que la trajectoire de l'oiseau n'est pas rectiligne et que nous ayons embarqué le chasseur dans un avion suivant une trajectoire non rectiligne et imaginez la difficulté pour réussir le tir

Ca va être dur de manger du pigeon !!!

C'est exactement le problème qui se pose si l'on veut aller d'un corps céleste à un autre:

- nous sommes en mouvement avec notre vaisseau puisque nous sommes posé sur un corps qui se déplace (la Terre par exemple) ou sur une orbite (autour de la Terre par exemple)
- nous voulons atteindre un corps qui se déplace (la Lune par exemple) avec notre vaisseau qui est l'équivalent de la balle du chasseur après qu'elle ait quitté le fusil
- nous pouvons subir des perturbations durant notre parcours avant l'impact en particulier dues à l'attraction des autres corps célestes (surtout ceux de masses importantes comme le Soleil, Jupiter ou Saturne).

Nous avons cependant trois avantages par rapport à ce malheureux chasseur :

- Nous disposons d'un calculateur de bord
- Les trajectoires des corps que nous visons sont prévisibles puisque ce sont des orbites connues calculées
- Nous pouvons agir à tout moment sur notre balle qu'est le vaisseau en actionnant ses moteurs si nous devons corriger la trajectoire

Et pourtant malgré tout ça si vous avez essayé vous avez dû souvent rater votre coup ce qui prouve que c'est difficile d'arriver où l'on veut dans l'espace.

4.2 - Transfert de Hohmann

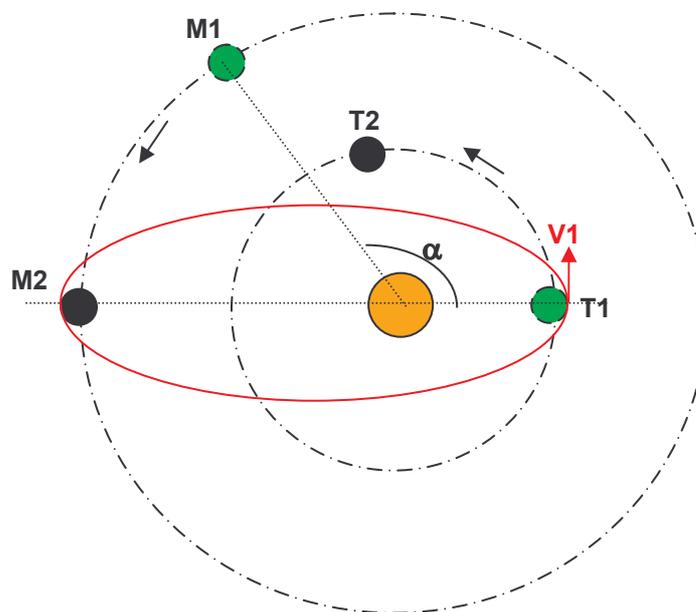
Hohmann était un ingénieur allemand qui a imaginé en 1925 une orbite de transfert qui devait permettre de voyager le plus économiquement possible d'un corps céleste à un autre. Le principe est simple.

Supposons que nous voulions aller de la Terre à Mars par exemple dont nous avons représenté les orbites par rapport au soleil comme circulaires pour simplifier notre dessin.

A l'instant du départ la terre est en T1 et Mars en M1.

Nous devons essayer de décrire une orbite elliptique par rapport au soleil dont une apogée (dans ce cas le Periapsis) sera tangent à notre orbite au départ et l'autre apogée (Apoapsis) tangente à Mars lorsque celle-ci arrivera au point de rencontre.

Comme le chasseur nous devons tirer "en avant" et notre temps de voyage pour aller de T1 en M2 en décrivant la demi orbite doit être sensiblement égal au temps que mettra Mars pour aller de M1 en M2.



Pour que la rencontre puisse se faire au mieux, il faudra que notre Apoapsis soit situé à un point nodal si nous ne sommes pas dans le même plan orbital. Rappelez-vous ma note précédente !

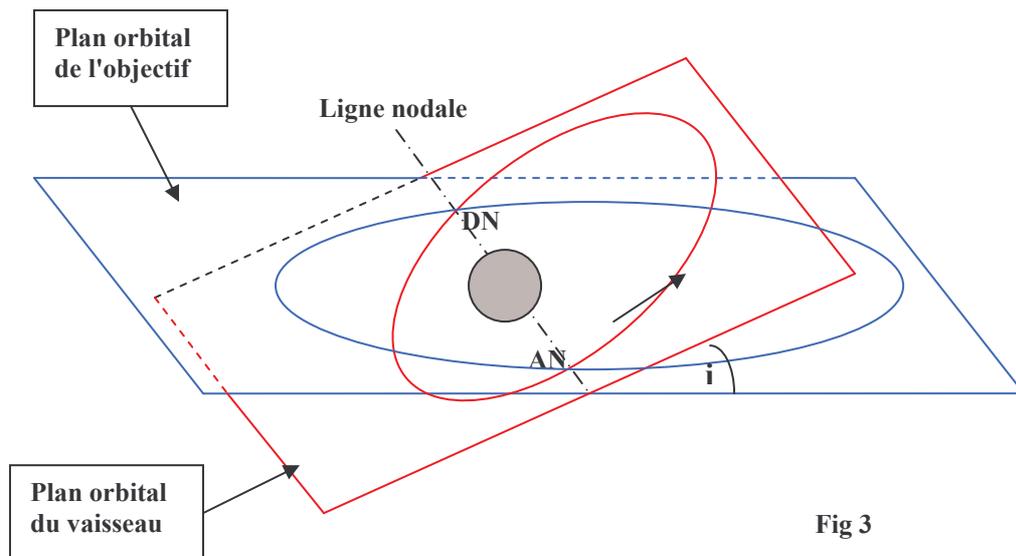


Fig 3

Cet orbite est le moyen le plus économique de se déplacer en dépensant le moins de carburant possible en navigant sur notre lancée de départ surtout si nous alignons les plans orbitaux au préalable.
Par contre le temps de transfert peut être long.

Pour Mars par exemple le temps est de 260 jours environ dans ce régime économique avec une vitesse au lancement d'environ 11,22 Km/s.
Si l'on utilise plus de carburant pour augmenter la vitesse on peut réduire le temps à 6 mois et même 4,5 mois au minimum mais à quel prix !
Aller plus vite sur le trajet présente un inconvénient, c'est que l'on arrive plus vite et alors il faut dépenser beaucoup plus d'énergie pour freiner si l'on veut se mettre en orbite autour de la planète cible. De plus, comme on emporte plus de carburant au départ, il faudra utiliser plus d'énergie pour lancer au départ

4.3 – Instant du tir

L'orbite de Hohmann nécessite que les planètes soient en bonne position pour permettre le tir. Cet instant propice qui peut durer quelques jours s'appelle "fenêtre de tir". Il correspond à l'angle α donnant l'égard angulaire idéal entre les deux planètes à l'instant initial pour réussir le transfert

Il est évident que les planètes et satellites ont des périodes de révolution (temps pour parcourir une orbite complète) différents. Le temps est d'autant plus élevé que la planète est éloignée du soleil ou de sa planète mère s'il s'agit d'un satellite.

Un nouveau tir n'est possible que si l'on retrouve le même angle α .

En fonction des périodes de révolution T1 et T2 des deux planètes, on peut démontrer que l'intervalle entre deux fenêtres de tir appelé période synodique peut se calculer suivant la formule (T2 étant la plus grande) :

$$T \text{ synodique} = (T1 * T2) / (T2 - T1)$$

Exemple (valeurs approchées) :

T2 pour Mars = 688 jours T1 pour la Terre = 365 jours Tsynodique = 777 jours

Si on loupe l'instant favorable du tir il faut attendre 27 mois environ avant un nouvel essai !

L'excentricité des orbites donne également des années plus avantageuses car la distance à parcourir peut être beaucoup plus faible. Par exemple la distance minimum Terre-Mars peut varier de 56 millions de Km à 100 millions de Km.

L'année 2003 a été très avantageuse, d'où beaucoup de tirs mais on ne retrouvera le même avantage qu'en 2018 !

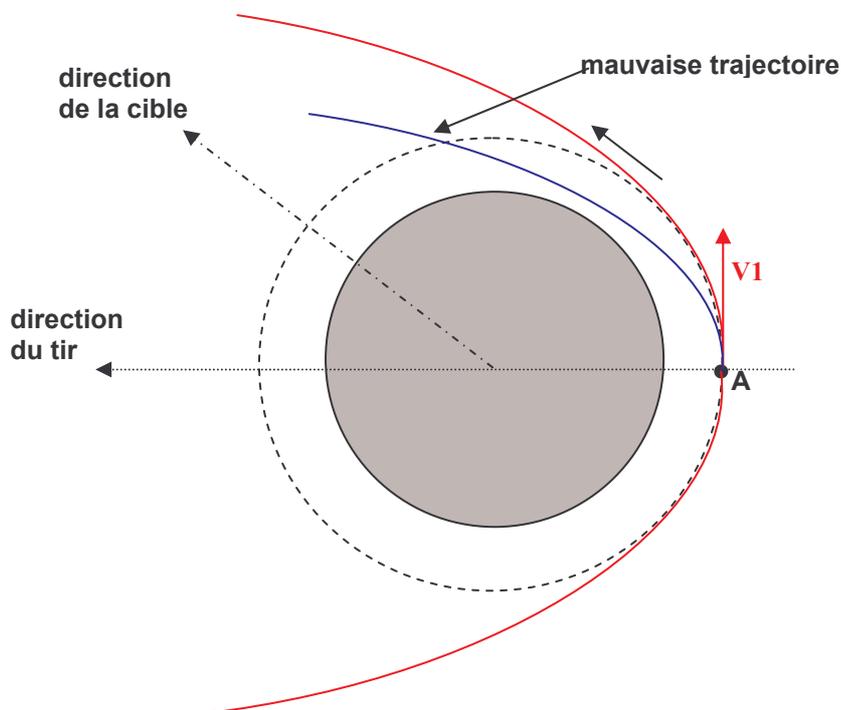
4.4 – Positon de tir

On voit qu'il faut "tirer" dans une direction "en avant" de la position de la cible au moment du tir.

Prenons le cas ou nous sommes en orbite autour de la Terre par exemple. Nous tournons dans le sens rétrograde (inverse des aiguilles d'une montre) si nous nous sommes mis en orbite en tirant vers l'est au départ pour bénéficier de la vitesse de rotation de la Terre

Nous allumerons le moteur pour atteindre la vitesse nous permettant de décrire l'orbite de Hohmann au point A ce qui nous donnera une direction de tir en avance par rapport à la position de la cible au moment du tir.

Il faudra bien choisir notre trajectoire d'échappement pour qu'elle soit suffisamment évasée pour ne pas nous rapprocher de la terre au départ et risquer de perdre de l'altitude ou même de percuter (voir courbe bleue).



4.5 - Vitesse au départ et à l'arrivée

Elle devra répondre aux critères suivants :

- Permettre de décrire une orbite de Hohmann avec l'Apoapsis au point de rencontre prévu
- Donner une vitesse à l'arrivée sur la cible la plus proche possible de la vitesse de celle-ci pour ne pas exiger trop de freinage

Une dernière remarque.

Notre vitesse sur l'orbite de Hohmann qui est héliocentrique est la somme vectorielle de la vitesse de la Terre autour du soleil (30 Km/s ou 108 000 Km/h) et d'une partie de la vitesse $V1$ que le lanceur a communiqué au vaisseau.

La vitesse restante est appelée vitesse résiduelle. Elle correspond en gros à la différence entre la vitesse nécessaire pour échapper à l'attraction de la planète et la vitesse $V1$. C'est elle qui est à notre disposition pour le voyage.

On profite de la vitesse de la Terre sur son orbite qui est d'environ 30 Km/s en lançant dans le sens de son déplacement (Prograde) si l'on veut atteindre des planètes extérieures à notre orbite terrestre. Pour les planètes intérieures il faut diminuer notre énergie donc il est plus avantageux de lancer en sens inverse (Retrograde) du déplacement de la terre.

La vitesse en arrivant près d'une planète va être à peu près la différence de vitesse entre la planète d'origine et celle de destination ce qui peut être très important. Par exemple, la Terre se déplace à 108000 Km/h, Mars à 87000 Km/h ce qui donne une vitesse en arrivant vers Mars de 21000 Km/h ! Pour nous satelliser autour de Mars il faut ralentir à moins de 3000 Km/h, alors préparez les freins ça va fumer !!!!

5 – PERMIS DE CONDUIRE

Maintenant que vous connaissez les principales lois qui commandent notre mouvement dans l'espace il est bon de s'assurer que vous savez conduire votre véhicule.

Je vais sûrement vous ennuyer un peu mais je pense que c'est nécessaire. Soyez attentifs et pour vous récompenser nous ferons quelques exercices spatiaux ensuite.

5.1 – LE CODE DE BONNE CONDUITE

Il est simple et peut se résumer à quelques règles simples :

- **Savoir s'orienter**
- **Ne rien heurter**
- **Economiser le carburant**
- **Ne pas rentrer trop vite dans une atmosphère**

Nous allons préciser quelques notions de **cinématique** (partie de la mécanique qui étudie le mouvement) qui nous aiderons à faire cela.

5.1.1 – La poussée

La poussée est la force que l'on doit appliquer à un corps pour lui donner un mouvement.
Il n'y a qu'à lancer une bille pour en être convaincu !

Cette force dans le cas du vaisseau spatial est fournie par un (ou un groupe de moteurs fusées) alimentés par du carburant embarqué

La vitesse acquise par un corps d'une masse donnée dépend de la force de la poussée qu'on applique et de la durée de son application

La poussée est souvent mesurée en terme d'unités de pesanteur **G** qui est égale à la poussée nécessaire pour annuler la force de gravitation (d'attraction) qui nous colle à la terre

Plus le corps est lourd plus la poussée doit être importante pour le déplacer.

Vous avez pu apprécier la différence de l'effort à fournir en essayant de déplacer votre voiture en la poussant après avoir déplacé votre vélo de la même façon

5.1.2 – La vitesse

La vitesse est l'allure à laquelle un corps se déplace d'un point à un autre.

En général elle s'exprime en m/s (mètre par seconde)

Elle peut varier dans le temps suivant notre position sur l'orbite (rappelez vous la différence de vitesse entre l'Apoapsis et le Periapsis sur une orbite non circulaire).

La vitesse correspond à un état stable du déplacement

Notre corps n'apprécie pas à quelle vitesse il se trouve.

Par exemple quand vous roulez sur autoroute sans accélérer, votre vitesse est constante et si vous fermez les yeux (pas si vous êtes le conducteur !) vous ne pouvez pas dire facilement si le véhicule va vite. C'est encore plus évident dans un avion où il n'y a pas de secousses.

Si vous débrayez et coupez le moteur la vitesse diminue parce que votre véhicule est soumis à des forces qui s'opposent au mouvement comme le frottement des pneus sur la route ou la résistance de l'air.

Une fusée dans le vide de l'espace conserve en théorie une vitesse constante puisque rien ne s'oppose à son mouvement.

En réalité la vitesse varie en fonction des forces perturbatrices d'attraction des corps célestes qui l'entourent mais suivant les distances elles peuvent être très faibles et alors les variations de vitesse sont lentes.

5.1.3 – L'accélération

L'accélération est le taux de changement de vitesse en un temps donné

Il s'exprime en général en m/s^2 (mètre par seconde par seconde)

Notre corps est sensible à l'accélération. Par exemple en voiture si vous appuyez sur l'accélérateur vous sentez une poussée dans le dos (sauf si vous avez une 2CV poussive...)

Sur terre, on prend comme base de référence la valeur **G** de l'accélération de la pesanteur au niveau du sol terrestre qui vaut $9.81 m/s^2$ (mètre par seconde par seconde)

Par exemple si vos moteurs fournissent une poussée de 1G votre vitesse augmentera de 9,81 m/s à chaque seconde de poussée en négligeant la résistance de l'air qui s'oppose à notre avance.

Pour simplifier en prenant $G = 10 m/s^2$ on peut voir que l'on a $V = 10m/s$ à 1s, $V = 20m/s$ à 2s, $V = 30m/s$ à 3s...etc.. $V = 600 m/s$ à 60 s soit 2160 Km/h (ouaww ! ça commence à décoiffer)

Vous voyez que la vitesse augmente à chaque seconde. On part lentement et on va de plus en plus vite. C'est très visible si vous regardez de l'extérieur un lancement d'Apollo par exemple.

Nous supportons mal l'accélération qui pèse sur notre corps. Avec une accélération de 3G un cosmonaute de 100 kilos a un poids apparent de 300 kilos et ça lui fait un peu mal surtout si ça dure ! On évite si possible des lancements à plus de 3G

Si on prend le cas d'une voiture de sport qui atteint par exemple 100 Km/h soit 27m/s en 6s (c'est le genre voiture italienne que je ne citerai pas) son accélération n'est que de $27/6 = 4,5 m/s/s$ c'est-à-dire moins de la moitié de G. C'est faible comparé à une fusée et pourtant ça vous plaque à votre siège, alors imaginez ce que vous ressentiriez dans Apollo !

Pour ceux qui aime faire des petits calculs si on lance un corps à l'arrêt avec une accélération constante Γ (on note en général l'accélération par gamma) on a au bout d'un temps T la vitesse

$$V \text{ (en mètres par seconde)} = \Gamma \text{ (en mètres/s}^2\text{)} \times T \text{ (en secondes)}$$

et on a parcouru la distance :

$$D \text{ (en mètres)} = 0,5 \times \Gamma \text{ (} \Gamma \text{ en mètres/s}^2\text{)} \times T \times T \text{ (T en secondes)}$$

en supposant qu'il n'y a pas de forces s'opposant à notre déplacement ce qui n'est pas le cas sur Terre à cause de l'atmosphère. Sur la Lune c'est idéal...

En utilisant les formules ci-dessus nous voyons que en théorie, si une fusée décolle verticalement avec une accélération constante de 2G (environ 20 m/s/s) elle atteint après 60 s une vitesse de 1200 m/s (4320 Km/h) et une altitude de 36000 m

5.1.4 - L'inertie

La force d'inertie caractérise la résistance d'un corps en mouvement qui est proportionnelle à sa masse et s'oppose à une modification de son mouvement

Pour comprendre ce qu'est l'inertie, il suffit d'essayer de pousser pour le lancer le caddie du super marché et juste après, un camion de 30 tonnes

Le principe de l'inertie fait qu'un corps persiste dans un état de mouvement uniforme ou de repos tant qu'il ne subit pas l'intervention d'une force extérieure.

Voilà pourquoi notre fusée lancée vers la Lune continue son voyage après l'arrêt du moteur ou pourquoi un bateau continue à courir sur son erre et va s'écraser sur le quai moteur à l'arrêt si on ne fait rien pour arrêter le mouvement.

L'inertie joue en notre faveur pour entretenir notre mouvement sans dépense de carburant. Par contre quand il s'agit de s'arrêter ce n'est pas notre amie car elle nous impose un freinage d'autant plus important que nous sommes lourd.

Il faudra à cause d'elle être très prudent dans nos manœuvres d'arrimage aux stations spatiales ou d'atterrissage pour ne pas nous laisser entraîner et aborder trop vite.

5.1.5 – L'énergie cinétique

L'énergie cinétique est l'énergie que possède un corps en mouvement

Si a un instant donné un corps de masse M a une vitesse V son énergie cinétique se calcule par la formule :

$$E_c = 0,5 \times M \times V^2 \quad (V^2 \text{ est égal à } V \times V)$$

L'énergie se conserve

Si un objet a perdu ou gagné de l'énergie, la même quantité d'énergie a obligatoirement été gagnée ou perdue par un autre objet en communication avec le premier.

Par exemple l'énergie fournie par le moteur d'une fusée, donc perdue en carburant, sert à augmenter la vitesse de celle-ci.

Autre exemple, l'énergie d'une voiture en mouvement se transmet à l'obstacle qu'elle heurte. Vous avez pu voir le résultat en cas d'accident !

Observons notre formule. On peut en déduire que:

a) - comme E_c dépend de la masse, si un corps est par exemple 10 fois plus lourd qu'un autre, il possède une énergie 10 fois plus élevée à la même vitesse.
Vous venez de comprendre pourquoi il est préférable de se faire emboutir par une voiture plutôt que par un camion qui roule à la même vitesse

b) – comme E_c dépend du carré de la vitesse ($V \times V$) l'influence de la vitesse est très importante.
Un corps de même masse allant par exemple 3 fois plus vite a une énergie 9 fois plus élevée.
Faites l'essai en rentrant avec votre voiture dans un mur à 30 Km/h puis après la réparation vous recommencez l'essai à 90 Km/h. Devinez quelle réparation coûtera le plus cher ?

Dans l'espace ou les vitesses sont très élevées, une collision peut être fatale !

Par exemple, un simple boulon de 0,01 kilo (soit 10 grammes) lancé à 30000 Km/h (c'est à peu près la vitesse d'un satellite) a une énergie cinétique égale à celle d'une voiture de 900 kilos lancée à 100 Km/h (oui vous pouvez vérifier avec la formule...)

Dans quel état serait votre Delta Glider après un tel choc ?

Songez que plus de 8000 objets connus (satellites, morceaux de fusées...il y a même un appareil de photo lâché par un astronaute lors d'une sortie ...) tournent autour de la Terre sans compter tous les petits morceaux non connus et vous comprendrez ou est le danger.

En pratique nous devons retenir deux choses :

En approche d'un objectif il faut aller le moins vite possible par rapport à lui pour économiser notre carburant qui va nous fournir l'énergie pour le ralentissement final (moins nous irons vite en arrivant au but et plus économique sera la mise en orbite)

En cours de manœuvre près d'un autre objet (station orbitale par exemple) il faut faire des déplacements à faible vitesse pour éviter les gros dégâts en cas de choc.

5.1.6 – Ce qui s'oppose au mouvement

- **La résistance de l'air**

Pour les planètes ayant une atmosphère, il s'agit essentiellement de la résistance de l'atmosphère qui crée une force qui s'oppose au mouvement.

La résistance de l'air dépend de la forme plus ou moins aérodynamique de la fusée, de la densité de l'atmosphère mais surtout elle est proportionnelle au carré de sa vitesse V^2 (vitesse x vitesse)

Par exemple, si la vitesse double, la résistance de l'air double.

Alors allez me dire si vous avez lu ce qui précède, c'est terrible puisque au bout de 60 s par exemple ma vitesse est 60 fois plus élevée qu'au départ si j'accélère de façon constante donc la résistance de l'air est multipliée par 3600 et il va me falloir une énergie énorme pour avancer.

Heureusement la densité de l'air diminue avec l'altitude et au fur et à mesure que nous montons la résistance se fait de moins en moins sentir et devient négligeable à quelques dizaines de Km 75% de notre atmosphère est concentrée dans la troposphère qui va du sol à moins de 20 Km d'altitude et au-delà de 60 Km l'air se fait rare.

Il ne faut pas non plus perdre de vue l'échauffement provoqué par le déplacement à très grande vitesse dans une atmosphère. La navette par exemple a des points qui atteignent 1600° C lors de sa rentrée dans l'atmosphère qu'elle aborde à près de 25000 Km/h.

Retenez ces règles si une planète est pourvue d'atmosphère :

Au lancement il faut monter presque verticalement pour sortir le plus vite possible des couches denses de l'atmosphère et pouvoir ensuite accélérer sans risques.

Au retour il faut rentrer le moins verticalement possible dans l'atmosphère pour ralentir progressivement avant d'atteindre les couches basses denses.

- **La gravitation**

Il faut toujours penser que c'est cette force dite de gravitation qui veut nous ramener vers un corps céleste qui va nous contrarier.

Elle nous attire vers le centre de ce corps avec une intensité qui heureusement diminue en fonction du carré ($D \times D$) de la distance D d'éloignement. Par exemple, si nous sommes deux fois plus loin nous serons tirés quatre fois moins fort

C'est elle que nous devons vaincre pour nous échapper

5.1.7 – Le vecteur vitesse

Pour finir, voilà le plus beau. Nous allons simplifier un peu mais c'est l'essentiel

Imaginons que nous sommes posés au point M sur la surface du sol et qu'à un instant initial nous communiquons la vitesse V à notre engin. La flèche qui pointe dans la direction du déplacement et dont la longueur caractérise la grandeur de la vitesse s'appelle le **Vecteur vitesse**.

Considérons un axe vertical Z passant par le point M et le centre de la terre et un axe horizontal X perpendiculaire en ce point.

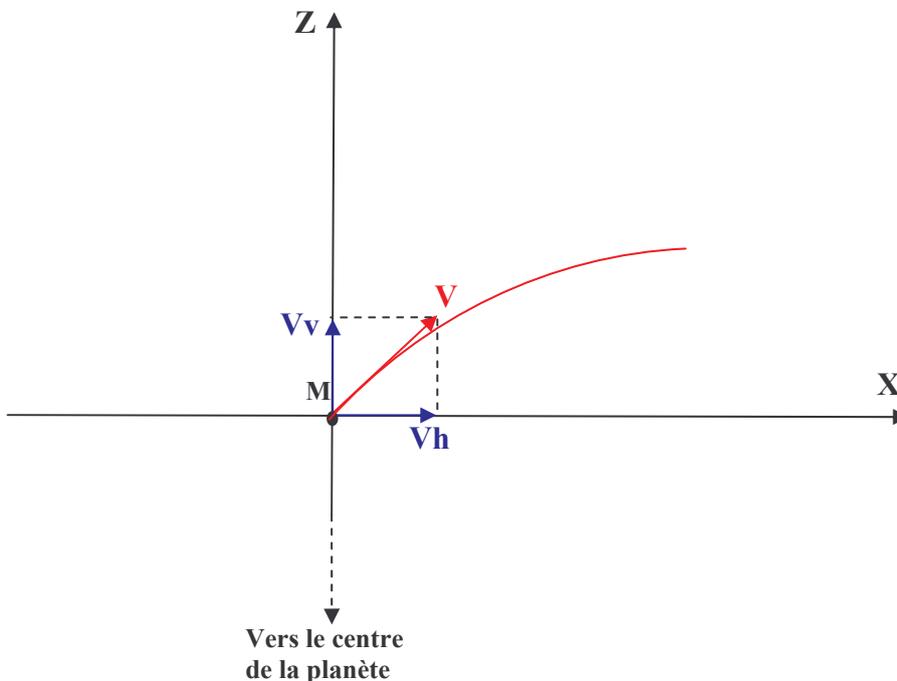
On peut décomposer notre vecteur V par projection sur les axes en deux vecteurs V_v et V_h qui donnent le même résultat pour le mouvement.

Donc à un instant donné :

V est le vecteur vitesse

V_v est le vecteur vitesse vertical

V_h est le vecteur vitesse horizontal



Vous devez maintenant sentir pourquoi une fusée lancée verticalement ne pourra pas se satelliser. C'est parce que sa vitesse horizontale V_h sera nulle et aucune force centrifuge due à la rotation ne sera créée pour s'opposer à l'attraction de la terre.

De même si on lançait la fusée à l'horizontale (vue de l'esprit) elle ne pourrait pas s'élever.

Au lancement il va falloir faire varier progressivement l'inclinaison du vecteur vitesse par rapport aux axes pour avoir au départ une vitesse verticale V_v importante qui nous permettra de monter rapidement et d'échapper aux couches denses de l'atmosphère puis de diminuer V_v au profit de la vitesse horizontale V_h pour obtenir la vitesse de satellisation nécessaire.

La trajectoire de lancement ne sera pas linéaire mais sera une courbe incurvée parce que nous sommes sans cesse attiré par la terre.

Il faut à chaque point de notre trajectoire que notre vitesse V_v nous fournisse une accélération verticale supérieure en ce point à celle que la terre nous impose vers son centre ($G = 9,81 \text{ m/s/s}$ au niveau du sol) pour que l'on continue à monter.

5.2 – Le vaisseau spatial

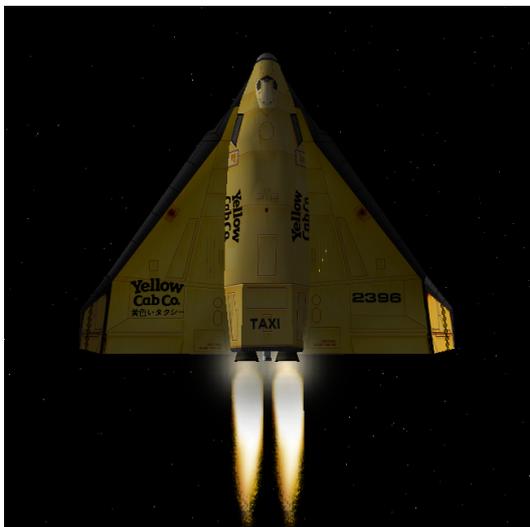
Il peut être de forme quelconque (fusée, navette, Delta Glider ..) mais dans tous les cas il est équipé des moteurs suivants

- **Un ensemble de propulsion a l'arrière appelé moteur principal (Main thruster)** qui permet d'accélérer au décollage ou pendant le voyage (c'est l'accélérateur de notre voiture)

En général, ce moteur principal permet le freinage en retournant la fusée en vol le derrière en avant dans le sens de la marche (c'est l'équivalent du frein de notre voiture qui elle heureusement n'a pas besoin de faire demi tour pour freiner)

Certains vaisseaux comme le Delta Glider disposent d'un moteur principal avant qui peut éviter de se retourner pour freiner.

- **Un ensemble de moteurs ventraux (Hover thruster)** dans certains vaisseaux comme le Delta Glider permet un décollage vertical à la façon des avions à décollage vertical comme le Harrier anglais.



Moteur principal arrière
Allumage par touche + du clavier numérique maintenue



Moteur principal avant
Allumage par touche – du clavier numérique maintenue

La touche * du clavier numérique permet de stopper le moteur

Si l'on tient la touche Ctrl du clavier enfoncée avant d'appuyer sur + ou – on augmente ou on diminue progressivement la poussée du moteur (dans le cas du Delta Glider on passe de façon continue du moteur arrière au moteur avant.

Si on appuie d'abord sur + ou – on augmente à 100% la poussée et si on veut maintenir sans tenir la touche enfoncée il faut appuyer sur Ctrl

- **Un ensemble de moteurs de positionnement en attitude (Attitude thruster)**

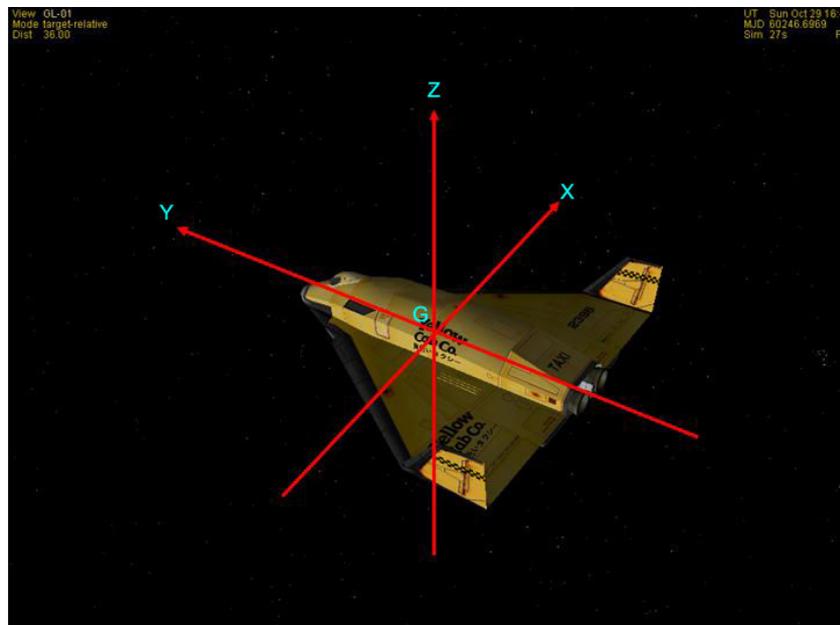
On peut considérer que c'est notre volant de l'espace

Contrairement à la voiture qui reste dans un espace plan à deux dimensions et ne peut dévier de sa route qu'en tournant à droite ou à gauche, notre vaisseau qui est libre dans l'espace peut comme un avion modifier sa position suivant 3 axes que l'on peut situer par rapport à lui (voir figure ci-dessous)

- Un axe longitudinal **Y** dans le sens de la marche
- Un axe transversal **X** perpendiculaire à **Y**
- Un axe vertical **Z** perpendiculaire aux deux autres

Ces trois axes se coupent en un point **G** que l'on appelle **centre de gravité**. C'est en ce point théorique que se concentre toute la masse **M** du vaisseau qui sert pour les calculs de son mouvement. Il suit l'orbite imposée au vaisseau.

C'est sur lui que s'appliquent toutes les forces qui s'exercent sur le vaisseau comme la force centrifuge ou la force d'attraction (gravitation) dont nous avons parlé dans la note précédente.



Ces mouvements peuvent être:

- soit une rotation autour de l'axe le point G ne bougeant pas
- soit une translation linéaire du point G le long d'un axe, le vaisseau gardant la même orientation

La rotation autour de l'axe X permet de baisser ou lever le nez ce qui correspond au **tangage** d'un bateau (**PITCH** en anglais)

La rotation autour de l'axe Y permet de faire une rotation autour de l'axe longitudinal Y ce qui correspond au **roulis** d'un bateau (**BANK** en anglais)

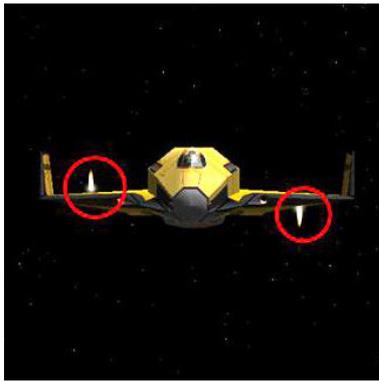
La rotation autour de l'axe Z permet de changer notre orientation vers la droite ou la gauche ce qui correspond à un mouvement de **lacet** comme si on donne des coups de volant en roulant (**YAW** en anglais)

La translation suivant l'axe Y nous fait avancer ou reculer

La translation suivant l'axe X nous fait écarter à droite ou à gauche

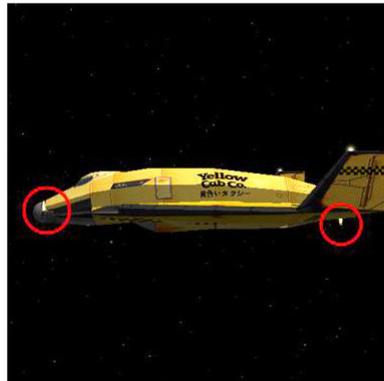
La translation suivant l'axe Z nous fait monter ou descendre

Voyez ci-dessous 3 exemples de rotations (admirez la belle allure du DG en Yellow Cab ! Dan Steph vous fait faire un baptême de l'espace en payant la course)



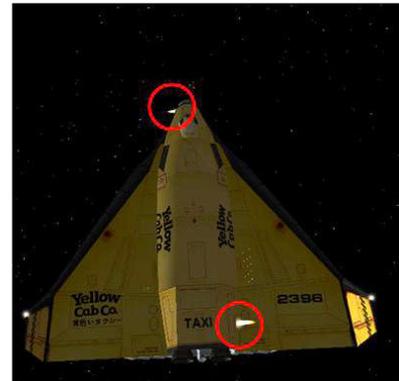
Rotation "BANK"

Les 2 petits moteurs sont allumés un en bas et l'autre en haut
Si on les allume tous les deux du même coté en même temps on effectue une translation vers le haut ou le bas



Rotation "PITCH"

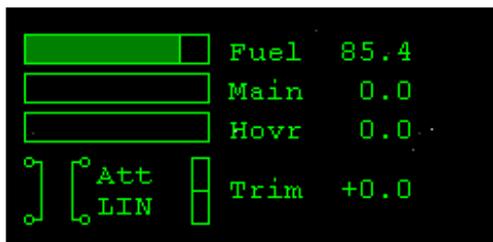
Les 2 petits moteurs sont allumés un en bas et l'autre en haut (ici on baisse le nez)
Si on les allume tous les deux du même coté en même temps on effectue une translation vers le haut ou le bas



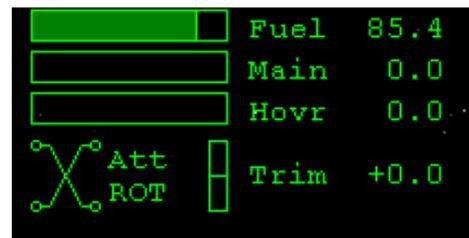
Rotation "YAW"

Les 2 petits moteurs sont allumés un à gauche et l'autre à droite. Ici on tourne vers la droite
Si on les allume tous les deux du même coté en même temps on effectue une translation vers la droite ou la gauche

Les mouvements sont obtenus par l'allumage de petits moteurs répartis par paires qui donnent des poussées dans le sens adéquat pour provoquer une rotation ou une translation suivant le choix qui s'effectue avec la **touche / du clavier numérique**. Le choix s'affiche sur la fenêtre de la cabine en haut à gauche sous les jauges de carburant en haut et de poussées principale (Main) et ventrale éventuellement (Hovr)



Att LIN = prêt pour une translation



Att ROT = prêt pour une rotation

Le clavier numérique permet d'agir pour réaliser le positionnement désiré
En tenant la touche Ctrl enfoncée en même temps que la touche on peut augmenter ou réduire les poussées pour les manœuvres délicates

	8 Baisse le nez	
4 Incline à gauche	5 Stoppe la rotation	6 Incline à droite
1 Pivote à gauche	2 Lève le nez	3 Pivote à droite

Action des touches pour la rotation

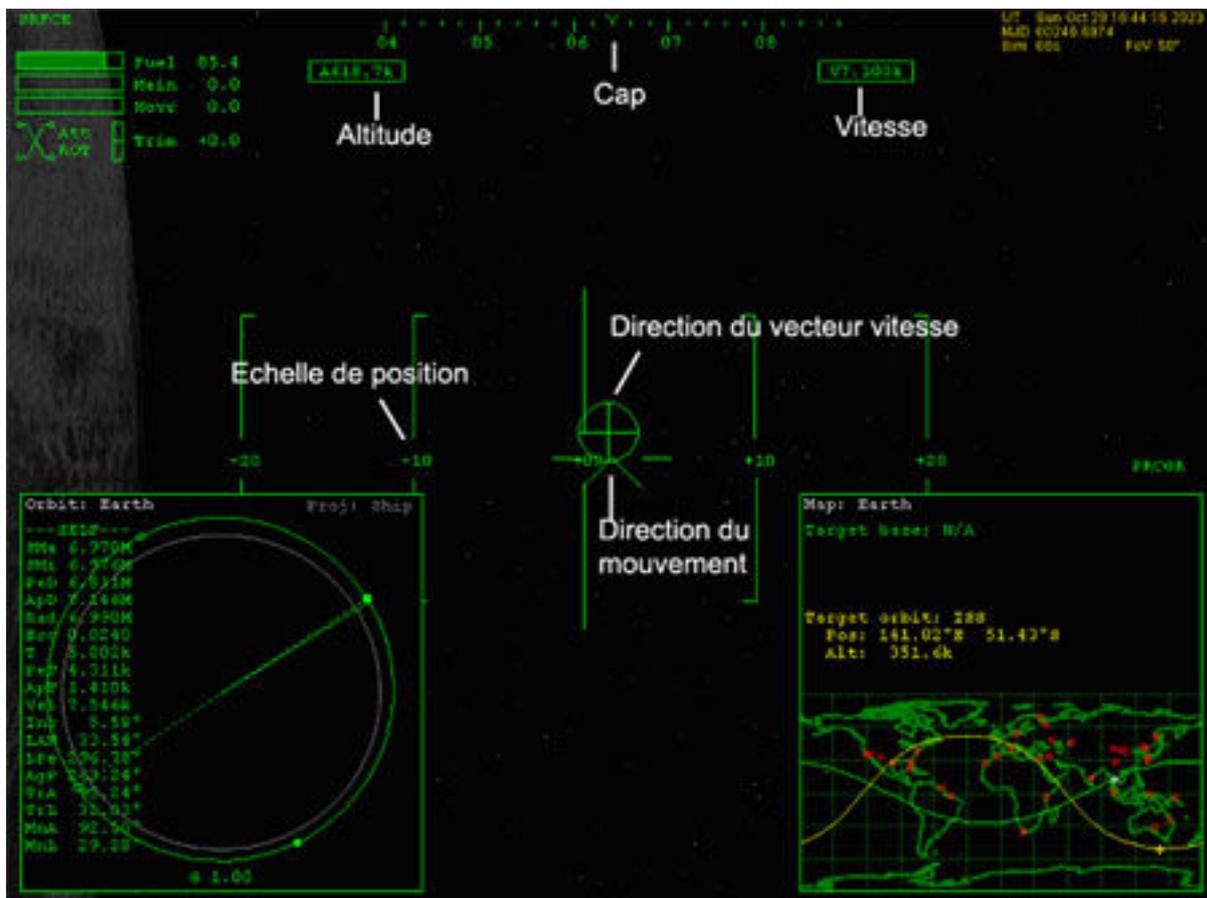
	8 Descendre	9 Avancer
		6 Reculer
1 Glisser à gauche	2 Monter	3 Glisser à droite

Action des touches pour la translation

Attention : Contrairement à la rotation qu'on peut stopper par la touche < 5 >, on ne peut arrêter une translation qu'en agissant dans le sens inverse (par exemple si on a fait < 9 > il faut faire < 6 >) en essayant de donner une impulsion identique. Pour cette raison les mouvements de translation sont un peu difficiles à exécuter et il est préférable de procéder par de petites impulsions courtes. Soyez caressants !!

Le joystick permet peut se substituer au clavier si il est performant. Personnellement j'aime bien le clavier.

Informations importantes affichées sur la partie haute de l'écran



On peut y voir à l'instant de la lecture:

- L'altitude** en mètres affichée avec coefficient multiplicateur (ici 618.7K = 618000 m)
- La vitesse** en mètres par seconde affichée avec coefficient multiplicateur (ici 7.100K = 7100 m/s)
- La direction du vecteur vitesse** (voir paragraphe 2.1.6)
- La direction du mouvement** qui est différente de celle du vecteur vitesse sauf en cas de trajectoire linéaire ou parfaitement circulaire

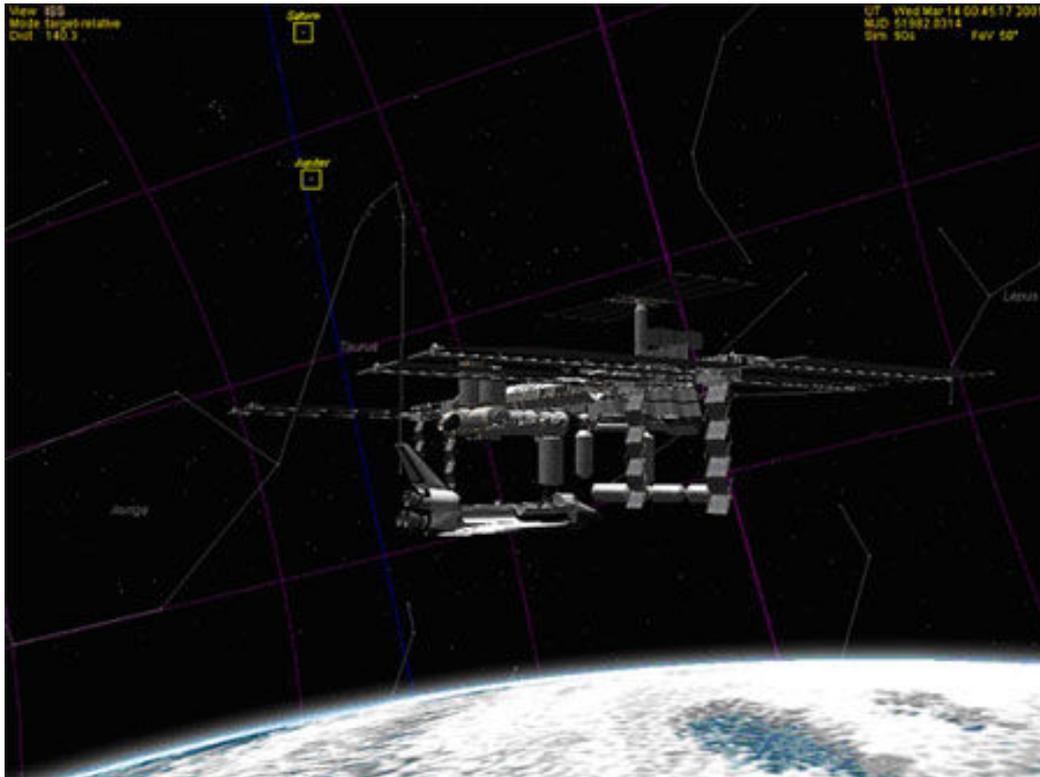
L'échelle de position donne les angles permettant de voir les écarts de position dans l'espace du vaisseau par rapport à sa trajectoire.

Un dernier conseil pour faciliter le repérage dans l'espace. On peut utiliser la touche **F9** du clavier qui fait apparaître un planétarium.

Les planètes et la Lune apparaissent dans un carré jaune avec leur nom (sur la photo on peut voir Jupiter et Saturne) et les constellations avec leur nom.

La ligne bleue (mal visible) figure fictivement l'intersection du plan écliptique de la terre (plan de son orbite rappelez vous) avec la sphère céleste .

Si à l'aide des touches flèches (en tenant Ctrl enfoncé) nous nous déplaçons notre vision le long de cette ligne nous rencontrerons toutes les planètes peu écartées d'elle (les plans des orbites des planètes étant peu différents de celui de la terre comme nous l'avons vu)



AVERTISSEMENT

Dans les exercices qui suivent nous utiliserons des scénarios de base inclus dans Orbiter. L'appellation est différente suivant la version d'Orbiter utilisée.

- avec Orbiter 031217 les scénarios "Mk4 in orbit.scn" et "Cape Canaveral.scn" du dossier "Default orbiter scenarios"
- avec Orbiter 2005 les scénarios "DG Mk4 in orbit.scn" et "Cape Canaveral.scn" du dossier Delta-Glider

De plus pour éviter des déformations de l'orbite au cours des exercices il est préférable si on utilise Orbiter 2005 de décocher la case Non Sphericalgravity sources dans l'onglet Parameters du Launchpad (voir la documentation Orbiter)

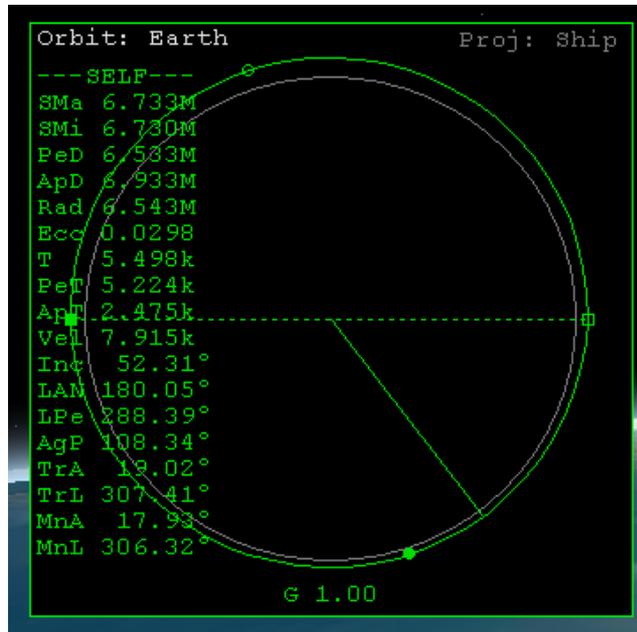
Vous pouvez avoir des valeurs un peu différentes de celles lues sur les figures. Ne vous inquiétez pas il est normal d'avoir des petits écarts suivant le moment où le MFD est photographié.

6 – EXERCICE DE MODIFICATION D'ORBITE

Nous allons faire un petit exercice en utilisant le Delta Glider de base dans Orbiter pour vérifier nos théorie (les valeurs sur mes captures MFD peuvent légèrement différer des vôtres compte tenu du moment de la photo mais ce n'est pas grave pour l'exercice)

Chargeons le scénario Mk4 in orbit adapté à la version Orbiter que nous utilisons (voir ci-dessus)

Nous retrouvons sur le MFD les éléments importants que nous avons explicités ci-avant.



PeD distance du Periapsis

ApD distance de l'Apoapsis

Ecc excentricité

PeT temps pour atteindre le Periapsis

ApT temps pour atteindre l'Apoapsis

Vel vitesse sur l'orbite

Inc inclinaison du plan orbital

LAN longitude du point nodal ascendant

LPe longitude du Periapsis

T période (temps de parcours de l'orbite)

Rad distance du vaisseau au centre de la terre suivant le rayon vert

La ligne pointillée est la ligne nodale avec un carré plein pour le nœud AN et vide pour le nœud DN

Petit cercle vert plein = Periapsis

Petit cercle vert vide = Apoapsis

Les distances sont exprimées en mètres, les temps en secondes et les angles en degrés

Le symbole k suivant un chiffre le multiplie par 1000, le symbole M par 1000000

Un symbole N/A signifie qu'il est impossible de donner une valeur. C'est le cas de la distance de l'Apoapsis pour une excentricité supérieure à 1.

ATTENTION

L'affichage des nombres se fait à l'Anglo-saxonne c'est-à-dire que le point représente une virgule.

Par exemple, 6.533M s'écrirait en France 6,533M ce qui donne 6533000 m ou 6533 Km

Nous ne voyons pas l'altitude du vaisseau par rapport au sol. Il faut être attentif au fait que si l'on ne veut pas percuter notre bonne planète, le point le plus proche de l'orbite qui est le Periapsis doit avoir au moins une distance PeD supérieure au rayon terrestre qui est en moyenne de 6370 Km environ. Comme il y a de l'atmosphère, il est bon de conserver toujours le Periapsis à une valeur minimum de 6370Km + 150 Km = 6520 Km si on ne veut pas avoir des ennuis et risquer de se brûler les fesses.

On devra donc faire attention au cours de nos manœuvres à toujours avoir PeD > 6.520M

G 1.00 que nous voyons en bas est l'intensité du champ de force, cette gravité qui nous attire inexorablement vers la terre. Elle est maximale à 1.00 car nous sommes près de la terre.

Allons-y pour quelques manœuvres de base !

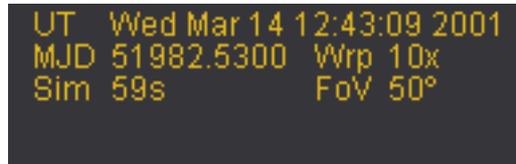
Nous avons représenté dans le texte une touche par la lettre ou le chiffre qu'elle porte encadré par < > par exemple <P> et pour un appui simultané de la touche Shift (majuscule) et d'une touche nous utilisons la notation Shift + < touche> par exemple Shift + <O>

Il est conseillé d'enregistrer la situation entre chaque phase pour pouvoir recommencer sans tout reprendre au début.

6.1 - Augmenter le Periapsis :

Il faut manœuvrer en accélérant dans le sens Prograde (sens de la marche) au moment où nous sommes à l'Apoapsis.

On voit sur le MFD que le temps **ApT** pour l'atteindre est de 2.475k soit 2475 secondes ou en gros 41mn. Pour ne pas attendre si longtemps nous allons accélérer le temps de la simulation en appuyant sur la touche T du clavier (une fois multiplie par 10 deux fois par 100 et ainsi de suite jusqu'à 10000) La vitesse de simulation s'affiche en haut du tableau de bord



Wrp 10x signifie que le temps s'écoule 10 fois plus vite.

On revient à une vitesse normale en appuyant successivement sur la touche R qui permet de ralentir à 0,1x pour les ajustages fins.

Attention à ne pas être à 0,1x si ça n'est pas nécessaire sinon le vaisseau va sembler être un veau pendant les manoeuvres

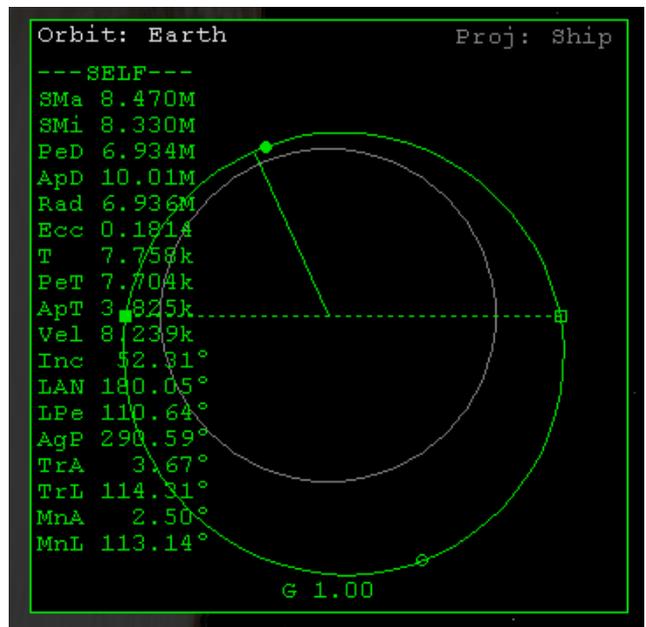
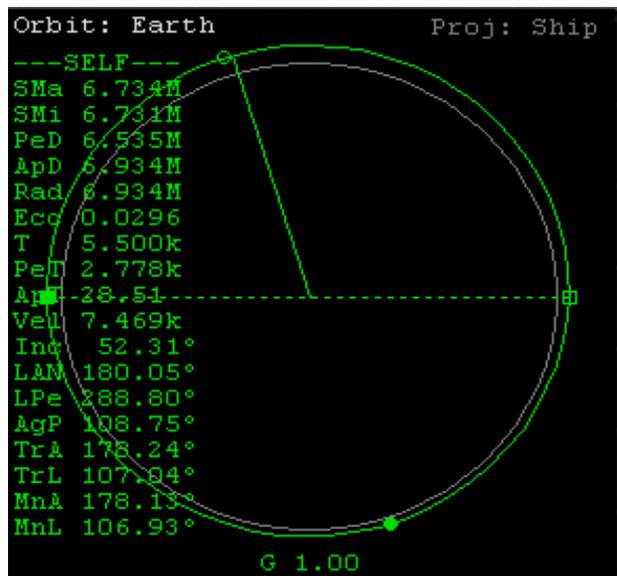
Accélérons à 100x et quand ApT approche 500 revenons à la vitesse normale.

Préparons le vaisseau en le plaçant dans le sens Prograde s'il n'y est pas. Appuyer sur la touche <^> du clavier (à coté du P) Notons que la touche <\$> à sa droite nous place en position rétrograde. Avec le DeltaGlider ces manoeuvres sont facilitées en cliquant sur les touches du clavier de positionnement situé à gauche du tableau principal

Quand ApT est à 0 ou légèrement avant enclenchons le moteur principal à fond pour augmenter la valeur de PeD à environ 10.00M. Attention en approchant de la valeur cherchée, il faut diminuer rapidement la poussée sous peine de dépassement.

Une astuce consiste à stopper la poussée et à donner des courtes impulsions par la touche <+> du clavier numérique pour approcher par petites étapes. Ensuite on peut finir très précisément en passant en mode translation (touche </> du clavier numérique et en utilisant les moteurs d'approche comme pour un rendez-vous avec les touches <6> et <9> du clavier numérique

Nous voyons ci-dessous le résultat.



On peut remarquer que le Periapsis est maintenant le point où se trouvait l'Apoapsis et que la vitesse en ce point est augmentée ce qui est normal puisque l'on vient d'accélérer.

PeD = 6934 Km – 6370 Km (rayon moyen de la terre) donne une altitude d'environ 564 Km . Sur le HUD on peut lire 565.6k soit 565600 m ou 565,6 Km qui est très proche du calcul simple.

ApD à 10.01M soit 10010000 m ou 10010 Km et notre altitude en ce point sera d'environ 3640 Km La période T passe de 5500 secondes (1h31mn40s) à 7758 (2h9mn18s)

A noter également que la longitude LAN du point nodal ascendant n'a pas bougé ce qui est normal puisque nous n'avons fait que modifier l'orbite dans son plan orbital.

La longitude du Periapsis qui était de $288,80^\circ$ est passée à $110,64^\circ$ comme il fallait s'y attendre puisque le nouveau Periapsis est pratiquement opposé à 180° par rapport à l'ancien. En toute rigueur on devrait avoir $288,80 - 180 = 108,80^\circ$ au lieu de $110,64^\circ$. La petite différence vient du fait que nous n'avons pas allumé le moteur pendant le même temps avant d'arriver à l'Apoapsis et après l'avoir dépassé.

Dans l'idéal il faut retenir que si le temps de combustion T_b pour obtenir la vitesse désirée doit être de x secondes il faut allumer le moteur $x/2$ secondes avant d'atteindre l'Apoapsis. Des calculateurs comme IMFD permettent de le faire comme nous le verrons plus tard.

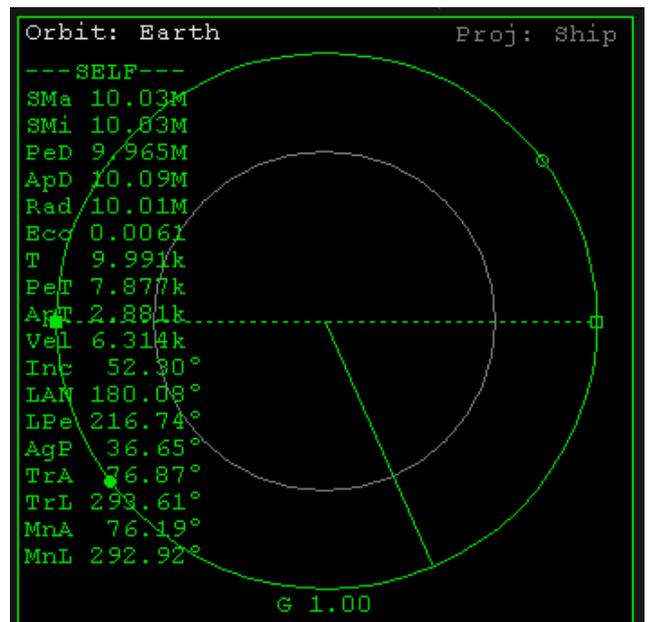
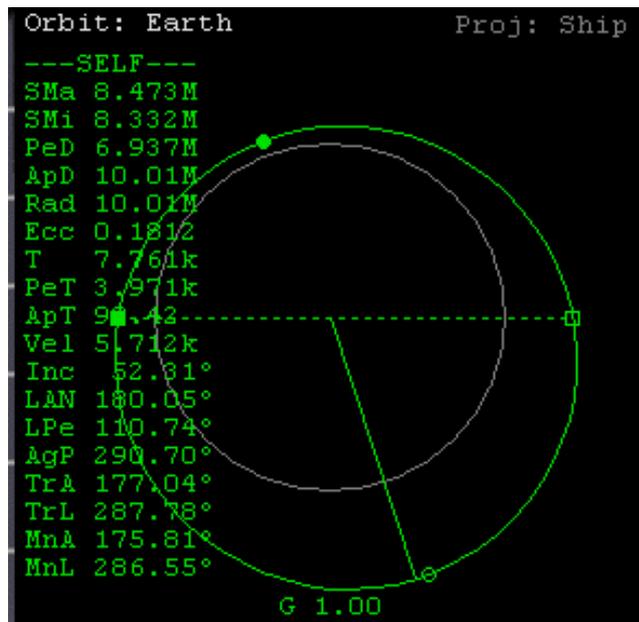
L'excentricité $Ecc = 0.0296$ qui était proche de 0 puisque notre orbite initiale était presque circulaire est devenue $Ecc = 0.1814$ puisque notre orbite est plus elliptique.

6.2 – Rendre l'orbite circulaire

Nous allons maintenant circulariser l'orbite à la distance ApD du nouvel Apoapsis. C'est simple, il suffit de donner si possible au Periapsis la même valeur que celle de l'Apoapsis.

En suivant la règle qui veut que l'on éloigne un point de l'orbite en augmentant la vitesse au point opposé, nous allons accélérer à l'Apoapsis.

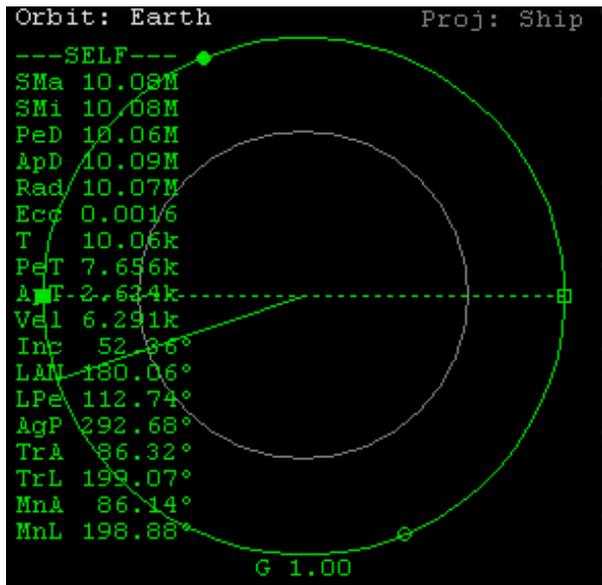
Même manoeuvre que ci avant : accélérons le temps pour atteindre l'Apoapsis plus vite tournons nous dans le sens Prograde un peu avant d'arriver et allumons le moteur principal en surveillant l'excentricité qui doit décroître. Eteindre le moteur quand $Ecc = 0$ si l'on veut être parfaitement circulaire.



Voilà le travail ! $Ecc = 0.0061$ c'est presque le cercle $ApD - PeD = 0.08M$ soit 80 Km de différence ce qui paraît peu mais c'est encore trop.

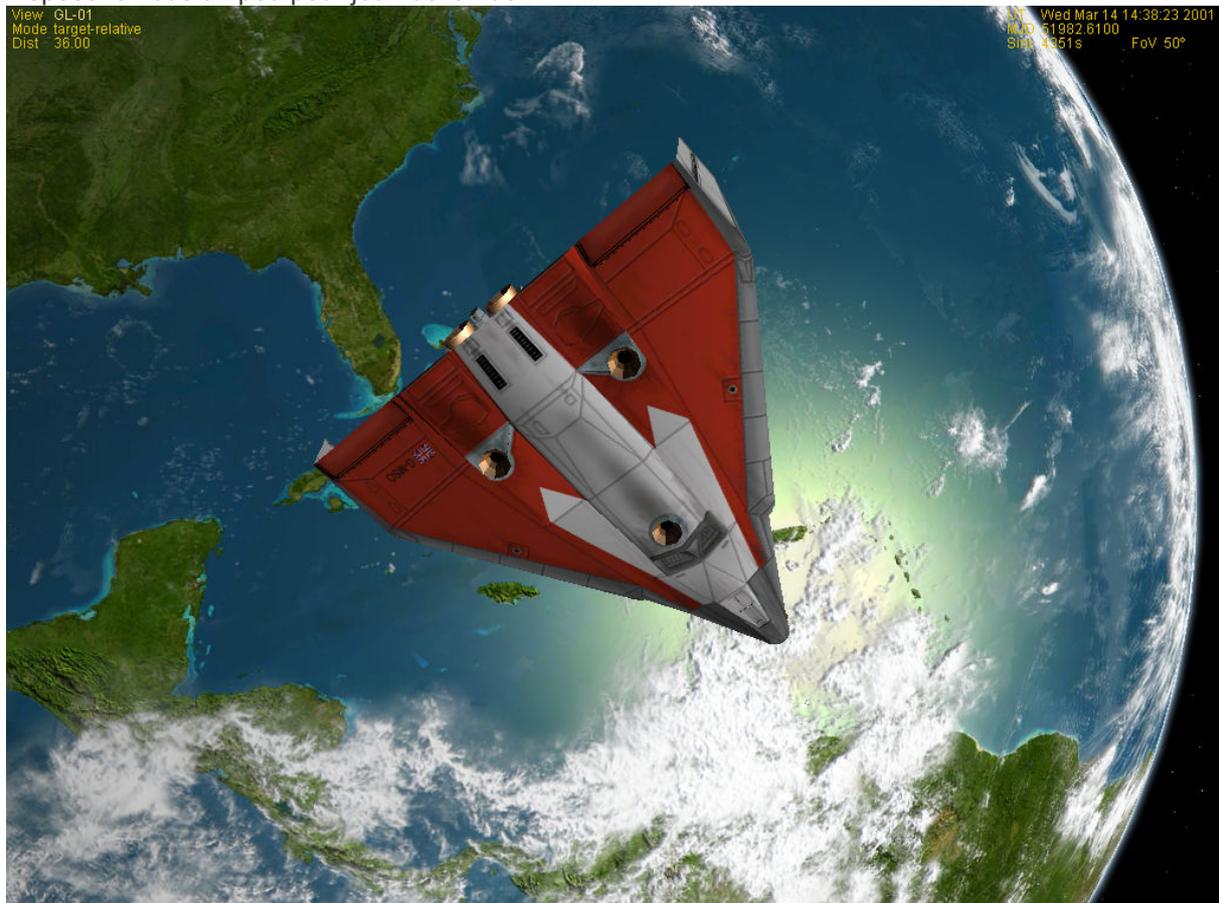
On peut s'entraîner en faisant une autre petite correction pour essayer de réduire Ecc . On refait un petit coup à l'Apoapsis pour voir mais attention il faut être très doux avec le moteur car il faut très peu de chose pour faire changer Ecc . Le mieux est d'utiliser les moteurs d'approche comme nous l'avons dit plus haut pour avoir de petites accélérations.

De toute façon il est très difficile de réduire Ecc en dessous de 0.001



On peut constater que la ligne nodale n'a pratiquement pas bougée puisque LAN est presque le même

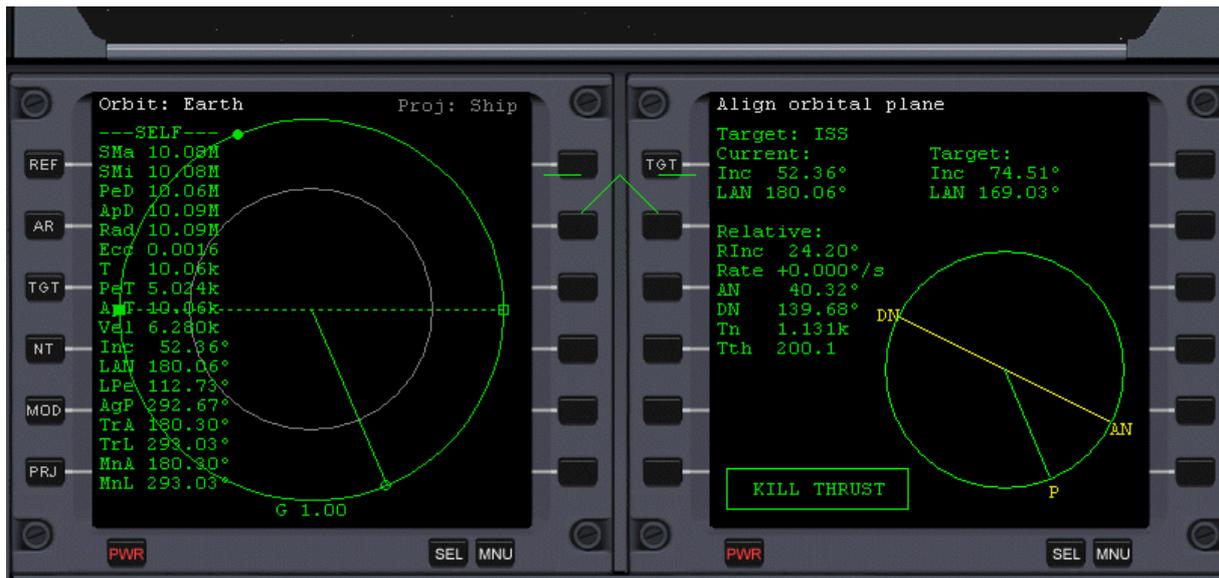
Reposons nous un peu pour jouir de la vue



6.3 – Modifier l'inclinaison de l'orbite

Nous allons nous placer dans le plan orbital de ISS en réalisant un allumage en un des points nodaux pour créer une poussée perpendiculaire au plan de notre orbite

Sur le MFD de droite affichons la fenêtre d'alignement des orbites en faisant shift + <Q> (sur le clavier français le Q correspond au A et réciproquement) puis shift + <T> pour spécifier ISS comme objectif (target)



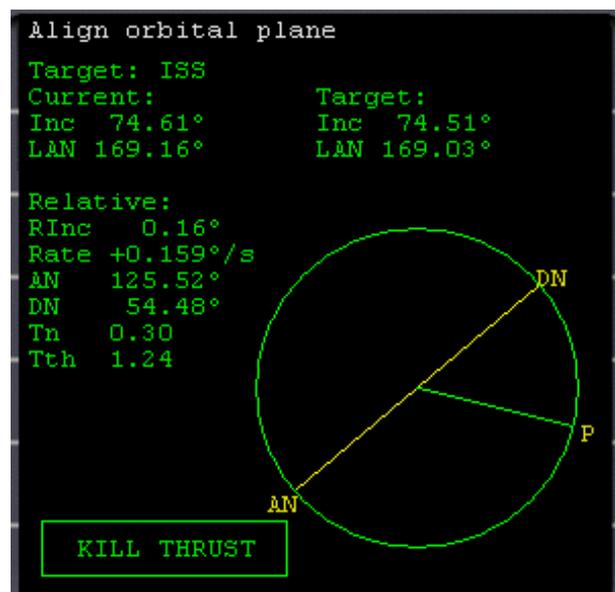
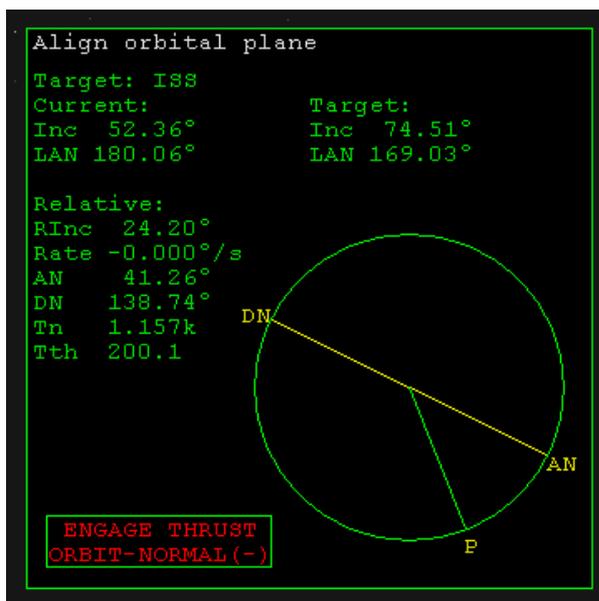
L'inclinaison relative entre les deux plans orbitaux RInc est de 24.20° et il faut la réduire à 0° si possible.

Le temps Tn pour atteindre le nœud ascendant est de 1.131k soit 1131 secondes.

Comme nous allons corriger au point AN il faut tourner le vaisseau perpendiculairement à son plan "vers le bas" c'est-à-dire en position "orbit normal -". Pour cela nous pouvons cliquer sur le bouton du tableau de bord ou appuyer sur la touche <u> du clavier située à droite du M. Pour la position "orbit normal +" nécessaire si on veut corriger au point DN on peut cliquer sur le bouton du tableau de bord ou appuyer sur <M>

Accélérons le temps pour approcher de AN et lorsque le texte ENGAGE THRUST ORBIT-NORMAL(-) apparaît en clignotant nous allumons le moteur principal (Thrust veut dire poussée) en surveillant la décroissance de RInc.

Le jeu est que RInc devienne le plus faible possible. Attention plus on approche de 0 et plus la décroissance est rapide. Il faut réduire progressivement la poussée ou/et procéder par de petites impulsions. Stopper les moteurs lorsque KILL THRUST (arrêter la poussée) apparaît



Bon, nous sommes contents et presque dans le plan de ISS. Nous pouvons le vérifier en ouvrant la Map sur un des MFD.

Faire Shift + <, > (c'est la touche à droite du N car le M d'un clavier anglo-saxon est le , sur un clavier français) puis Shift + <T> pour définir ISS comme objectif (Target). Super, nous voyons ça !



La croix blanche à droite (notre vaisseau) et la croix jaune à gauche décrivent la même trajectoire par rapport à la terre et nous pourrions éventuellement envisager une rencontre avec ISS en modifiant au bon moment notre altitude. Une autre fois peut-être ?

6.4 - Atteindre un point donné au dessus du sol

Pour terminer notre enseignement nous allons tenter de survoler la France à assez basse altitude. En effet nous pouvons voir sur notre carte que notre trajectoire passe au dessus de la France (à peu près au milieu)

Si nous attendons de nous trouver au point diamétralement opposé à la France par rapport à la terre et que, en ce point, nous diminuons notre vitesse par une poussée inverse au sens de la marche, nous allons créer un Periapsis qui se situera au dessus de la France. Il suffit de nous placer à 500 Km environ pour jouir d'une belle vue.

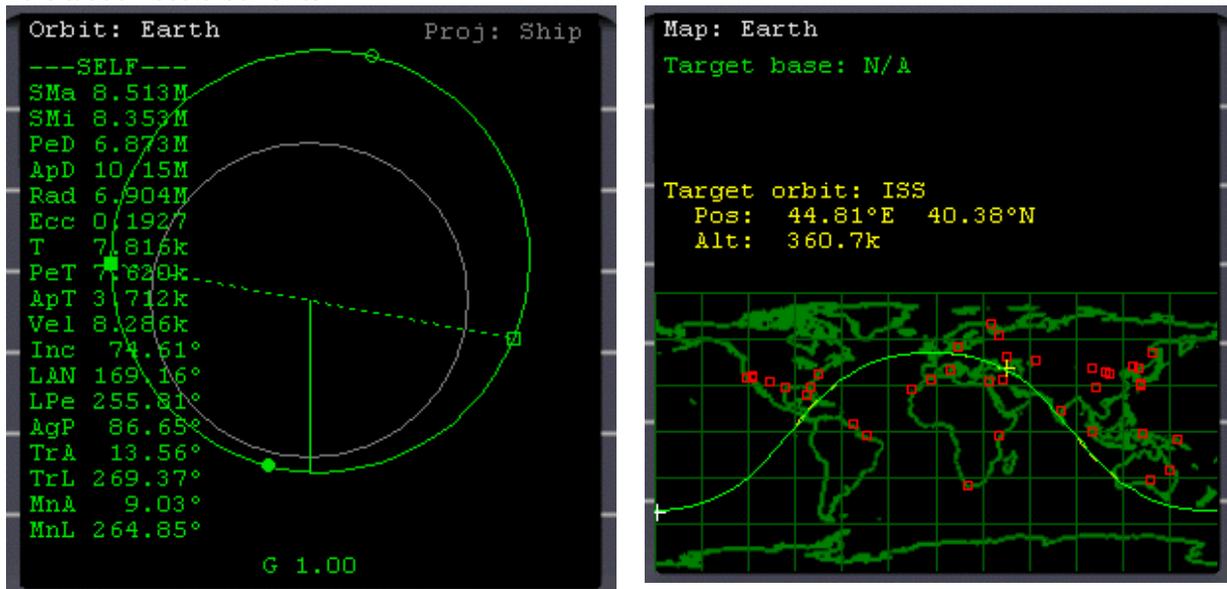
Comment trouver le point que nous cherchons ? Si vous observez la carte vous constatez qu'elle est divisée par des lignes verticales en douze parties. La circonférence de la terre correspond à 360° donc l'espace entre deux lignes verticales correspond à 30° . Si nous voulons nous trouver en une position diamétralement opposée à la France soit avec un écart de 180° , il faudra placer notre vaisseau (la croix blanche) en un point situé 6 espaces à droite ou à gauche de la ligne passant sur la France. Dans notre cas, nous devons être sur un des bords de la carte et à ce moment nous agirons. OK ? on y va !

Préparons la manœuvre en affichant sur l'autre MFD notre orbite en faisant Shift + <O> si ce n'est pas déjà fait comme ci-dessous



En surveillant notre position sur la carte (croix blanche) accélérons notre mouvement en appuyant sur la touche <T> pour avancer jusqu'au bord droit (nous serons à ce moment au dessus de la Nouvelle-Zélande qui se situe à peu près aux antipodes de la France) Là nous revenons en temps normal par la touche <R> nous nous plaçons en position rétrograde par la touche <\$> ou le clavier du tableau de bord. Nous allumons le moteur et sur le MFD de droite nous surveillons la décroissance de PeD pour l'amener à 6.870M environ (500 Km au dessus du sol) Penser à affiner par les moteurs d'approche pour finir.

La situation est la suivante.



Accélérons le temps (X100) pour arriver au dessus de la France (croix blanche au milieu de la carte) et voilà ce que nous verrons !

Remarque : j'ai éclairci la photo car il faisait encore presque nuit

Vous pouvez me voir en bas à gauche vers l'embouchure de la Loire.



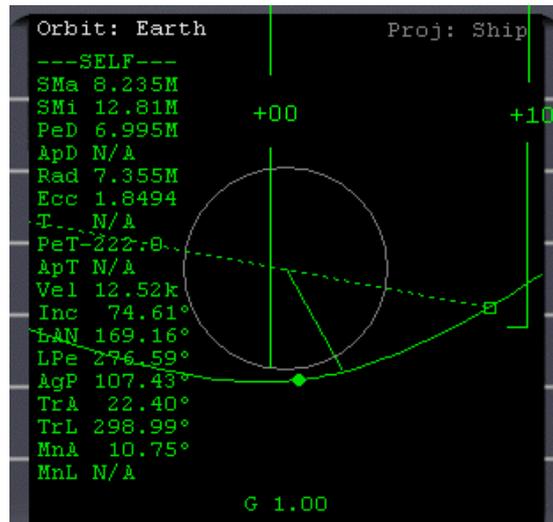
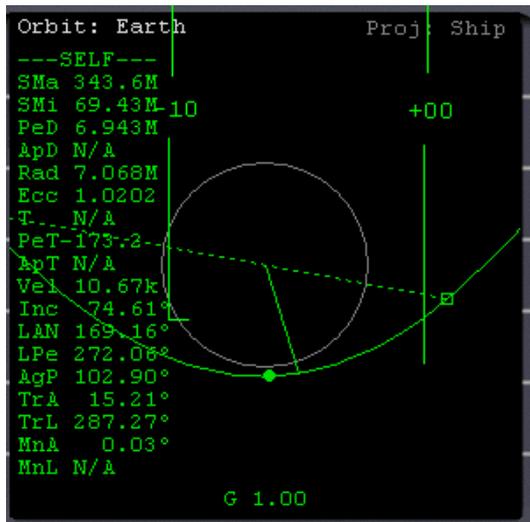
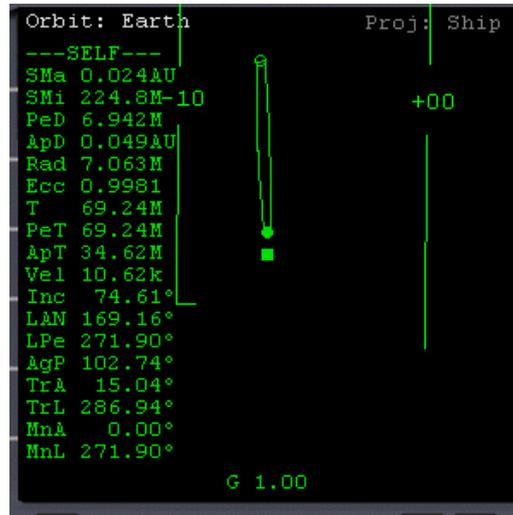
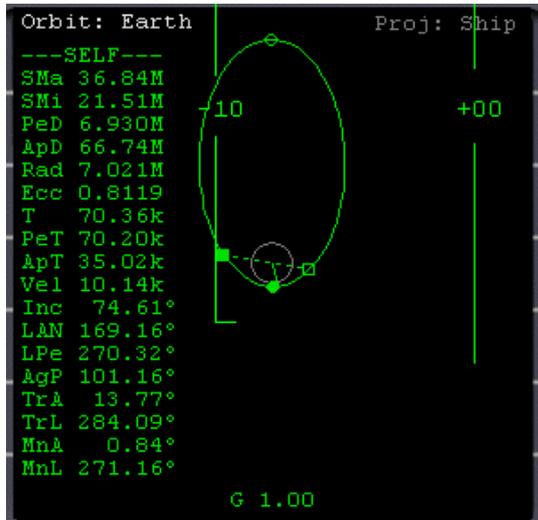
6.5 – Trajectoire hyperbolique

Pour terminer embarquons pour l'infini.

En nous plaçant dans le sens Prograde, nous allons allumer le moteur principal pour voir ce que devient notre orbite. C'est parti !

L'orbite devient de plus en plus allongée au fur et à mesure que son excentricité tend vers 1 et devient hyperbolique (trajectoire ouverte) pour $Ecc > 1$. La vitesse *Vel* est alors de 10,64 Km/s environ.

On peut remarquer sur les figures du bas que plus la vitesse s'élève, et plus l'hyperbole s'ouvre



Voilà le cours terminé et vous pouvez rentrer à la maison si vous savez refaire une orbite elliptique ce qui doit être le cas maintenant (il suffit d'allumer le moteur en se plaçant en position rétrograde pour diminuer la vitesse)

Maintenant que nous possédons la théorie et que nous savons agir sur les moteurs nous allons faire un peu de pratique pour illustrer ce qui précède.

Nous utiliserons les touches du pavé numérique

7- Essais de maniabilité

7.1 – Essai de lancement

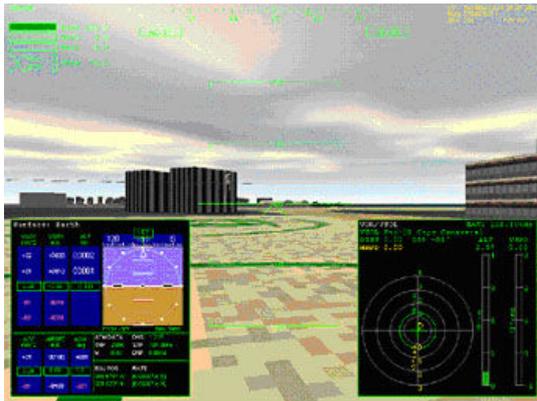
Lançons Orbiter et chargeons le scénario "**Cape Canaveral**" correspondant à la version d'Orbiter utilisée

Nous sommes au départ avec le Delta Glider standard posé au sol à Cape Canaveral

Appuyer sur **H** pour afficher l'échelle de direction

Escamoter le tableau de bord par action sur la touche **F8** pour mieux jouir de la vue

On voit sur l'affichage qu'on se trouve à l'altitude 2.57 (2,57 m) et à la vitesse 0.00



Appuyer quelques secondes sur la touche **+** pour allumer le moteur principal et la relâcher. La vitesse augmente puis au moment où l'on coupe le moteur elle diminue. Nous sommes victime des forces de frottement des roues sur le sol et de la résistance qui s'oppose à notre mouvement et font décroître notre vitesse horizontale V_h

Si au départ nous appuyons sur la touche **0** du clavier numérique nous allumons le moteur ventral, nous montons sans avancer grâce à la vitesse V_v acquise. Si nous coupons le moteur, nous retombons à une vitesse de plus en plus élevée (toujours cette méchante gravitation qui augmente notre vitesse de chute toute les secondes)

Revenons à la position de départ.

Appuyer sur la touche **L** pour garder le DG dans sa position horizontale

Allumer à fond le moteur ventral en appuyant sur **<0>** (clavier numérique) nous montons

Allumer à fond le moteur principal en appuyant sur la touche **<+>** (clavier numérique)

Nous continuons à monter (vitesse V_v) et nous avançons (vitesse V_h) La vitesse affichée est la combinaison des deux vitesses (Vecteur vitesse V) Attendons d'atteindre une altitude de 3 à 4000m pour ne pas prendre de risques.

Si nous coupons le moteur ventral avec la touche **<. >** du clavier numérique (à droite du 0) notre altitude va commencer assez vite à diminuer car la terre nous attire très fort puisque nous n'en sommes pas très éloigné et nous n'avons plus de force d'accélération verticale. Par contre nous continuons à avancer.

Appuyer sur la touche **<2>** du clavier numérique pour lever le nez de 10° environ (procéder par impulsions successives car le DG est assez rétif tant qu'il est dans une atmosphère).

Le repère du vecteur vitesse apparaît et nous retrouvons une vitesse ascendante, par contre notre vitesse globale a tendance à diminuer car nous transformons l'énergie du moteur principal à la fois pour monter (vecteur V_v) et pour avancer (vecteur V_h)

Pour lancer il faudra en permanence régler le **Pitch (Tangage)** pour s'élever le plus vite possible tout en accroissant la vitesse.

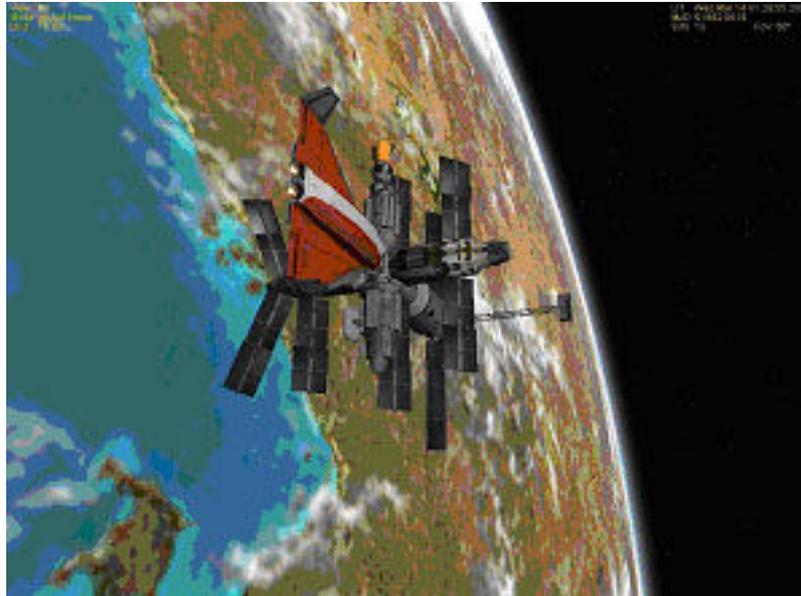
Je vous conseille d'utiliser le DG III de **Dan Steph** qui est plus facile à maîtriser si vous voulez faire une mise en orbite qui consiste à atteindre la vitesse horizontale de satellisation d'environ 7200 m/s à une altitude supérieure à 150 Km.

7.2 – Déplacements dans l'espace

Nous allons vers quelques manœuvres "à vue" pour sentir les réactions de l'appareil

Lançons Orbiter et chargeons le scénario "Mir" du dossier "**Space Stations**"

Le Delta Glider est arrimé à la station. Le spectacle est superbe



Appuyer sur **F1** pour revenir en cabine

Effacer pour mieux voir le paysage les deux MFD en faisant Shift **gauche (touche majuscule à gauche)+ <A>** et

Shift droit (touche majuscule à droite) + <A> (A=Q sur un clavier anglais)

Décrocher le DG en faisant **Ctrl + <D>**

Le décrochage provoque une légère poussée et notre DG s'éloigne lentement. C'est son inertie qui le fait se déplacer. Comme il n'y a pas de forces résistantes dans le vide (il y a si peu de molécules d'air à près de 300 Km d'altitude) il faudra le freiner pour le stopper.

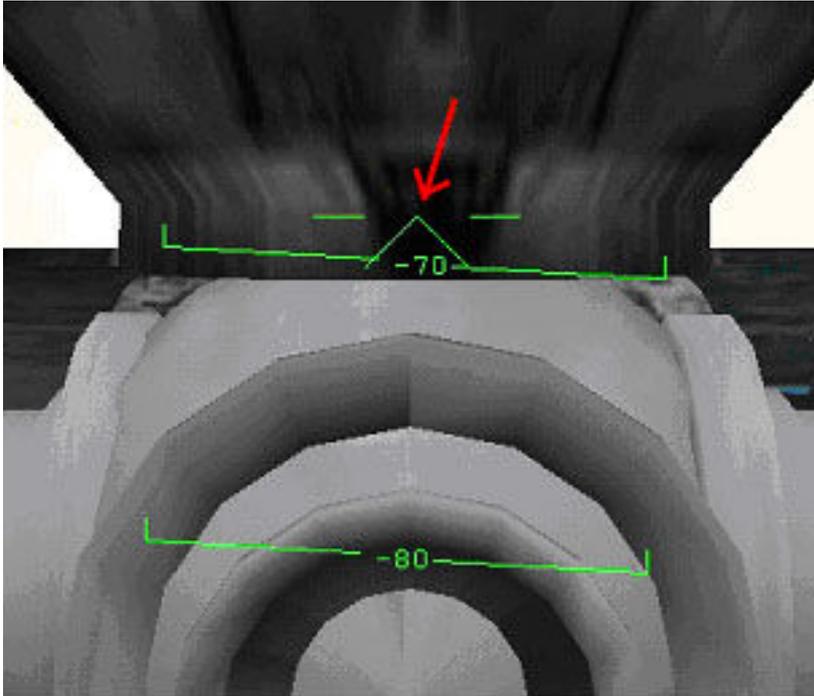
Vous pouvez revenir en vue extérieure en appuyant sur **F1** et vous déplacer à l'aide des flèches en tenant la touche Ctrl pour vous situer



Vue de la cabine



Vue de l'extérieur



Appuyer sur la touche **</>** sur le clavier numérique et vérifier que le mode translation est actif

Appuyer par impulsions sur la touche **<6>** pour annuler l'éloignement et revenir en approche vers Mir. Jouer sur **<6>** et **<9>** pour obtenir une vitesse lente sinon en réel ça serait la casse !

En utilisant les touches **<1>** **<3>** **<8>** et **<2>** pour faire des petites corrections s'il le faut aligner le repère de déplacement (repéré par la flèche rouge) à peu près comme montré sur la photo. Normalement l'arrimage va se produire si le positionnement est bon

Information **DOCKED** affichée en jaune sur le MFD appelé par **Shift + <D>**

Un peu plus difficile en repartant de la situation d'arrimage

Décrocher en faisant **Ctrl + <D>**

Vérifier que le mode translation est sélectionné (**Att LIN** sur le HUD) sinon le sélectionner avec **</>**

Accélérer le recul en agissant sur **<9>** pour allumer le moteur de translation avant

A une distance suffisante de la station essayer de stopper à peu près le mouvement en utilisant **<6>**

Sélectionner le mode rotation (**Att ROT** sur le HUD) avec la touche **</>**

Opérer des rotations successives sur tous les axes en utilisant les couples de touches **<8>** **<2>**, **<4>** **<6>** et **<1>** **<3>**.

Plus le temps ou vous maintenez la touche est long, plus la rotation est rapide

La touche **<5>** permet de stopper la rotation.

Vous pouvez vérifier que plus votre rotation est rapide et moins l'arrêt est rapide.

Les forces d'inertie jouent contre nous, une fois lancé le vaisseau ne veut plus s'arrêter

Vous pouvez également vérifier en passant en observateur extérieur par la touche **F1** que puisque la rotation s'effectue autour de notre centre de gravité G qui continue à suivre sur notre orbite, nous restons à la même place par rapport à Mir pendant nos rotations.

Voyez ce que j'ai réalisé ci-dessous



Après ces cabrioles je vous laisse le soin de vous arrimer à nouveau sur Mir en opérant des rotations et translations successives.

Restez en vue extérieure, replacez votre avant dans le bon sens et ensuite en jouant sur la translation alignez vous le mieux possible en vous approchant du Dock d'arrimage et en vous positionnant comme nous l'avons fait au premier exercice.

Avec un peu d'habitude vous arriverez à réussir j'en suis sûr

8 – CONCLUSION

Nous voilà au bout de cette étude.

Je n'ai malheureusement pas tout pu vous expliquer mais j'espère que mon texte vous aidera à progresser dans l'utilisation de ce merveilleux logiciel qu'est Orbiter.

Orbiter n'est pas un jeu mais il devient de plus en plus passionnant au fil des essais que l'on réalise. Soyez persévérant et ne perdez pas courage, vous serez récompensé quand vous réussirez votre premier alunissage ou votre première approche de Mars ou des anneaux de Saturne.

Pensez que Orbiter s'apprend avec de la persévérance et que même avec plus de deux ans d'expérience j'apprends toujours. C'est ce qui fait sa richesse.

Merci à Martin Schweiger et à tous les contributeurs

A bientôt j'espère et bonne chance.

PAPYREF