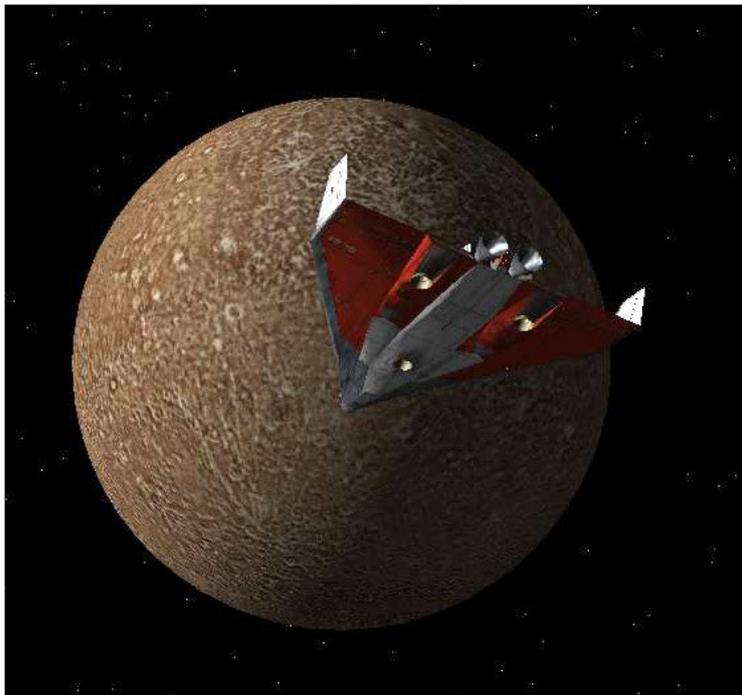


Utilisation de IMFD version 4.6

2^{ème} partie - Exercices

Par Papyref

Octobre 2006



0 – OBJET

Cette note à pour objet de vous faire réaliser quelques exercices qui vous aideront pour utiliser IMFD en version 4.6

Ils ne donnent qu'un aperçu des possibilités de ce superbe logiciel et c'est à vous de les découvrir toutes en l'utilisant.

Tous les exercices ont été testés avec Orbiter P1.

Il est bon avant de faire ces exercices d'avoir lu la première partie de cette note qui développe l'utilisation des modules et leurs commandes.

REMERCIEMENTS

Le calculateur IMFD a été conçu par **Jarmo Nikkanen**

Vous pouvez le télécharger sur le site <http://koti.mbnet.fi/jarmonik/Orbiter.html> avec sa documentation en anglais.

Pour atterrir facilement sur la Lune ou autre planète vous pouvez utiliser LandMFD de Dennis Hare
Vous pouvez le télécharger sur le site http://www.aovi93.dsl.pipex.com/orbiter_addons.htm avec sa documentation en anglais.

Je remercie vivement les auteurs pour leur excellent travail et bien sûr Martin Schweiger qui nous a donné le superbe outil qu'est Orbiter !

N'oubliez pas d'activer le module InterMFD dans l'onglet module du Launchpad

Sommaire

1. **Objet**
2. **Generalités**
3. **De la Terre à la Lune**
4. **De la Lune à la Terre**
5. **De la Terre à la Lune (variante)**
6. **De la Terre à Mars**
7. **De Mars à la Terre**
8. **De Io à Europa**
9. **De la Terre à Venus et retour**
10. **De la Terre à Mercure**
11. **Utilisation de Sling-Shot**
12. **Utilisation de Base Approach**
13. **Utilisation de Tangential Transfert**
14. **Utilisation de Surface Launch**
15. **Conclusion**

Annexe – Quelques fenêtres de lancement

1 - GENERALITES

Nous utiliserons le Delta Glider dont le tableau de bord possède des touches fonctionnelles qui facilitent les actions.

Si on souhaite utiliser un appareil sans tableau de bord il faut utiliser la souris pour agir sur les touches fonctionnelles entourant le MFD, ou se reporter à la partie théorique de la note pour avoir les équivalents clavier SHIFT + < Touche > correspondants aux touches fonctionnelles.

Les chiffres que vous obtiendrez sur vos MFD peuvent être un peu différents de ceux des photos mais resteront proches normalement si vous utilisez les scénarios enregistrés.

Pour simplifier, je ne redonne pas après le premier exercice le détail des opérations nécessaires à l'ouverture des différents modules que vous aurez déjà utilisé.

Principes d'utilisation de COURSE pour la navigation

Pour aller d'une planète à une autre, il faut échapper à l'influence de la planète de référence autour de laquelle on orbite. On utilise en général :

- Allumage avec ORBIT-EJECT couplé à MAP en mode OP-MODE SHARED pour réglage de l'altitude du periapsis désiré sur la cible

Pour aller d'une planète à un de ses satellites, il n'y a pas besoin d'échapper à l'influence de la planète de référence autour de laquelle on orbite. On utilise :

- Calcul de la trajectoire avec un des modes de TARGET INTERCEPT (en général Off-Plane) couplé à MAP en mode OP-MODE SHARED pour réglage de l'altitude du periapsis désiré sur la cible
- Réalisation directe dans Target Intercept de l'allumage en Auto Burn

Pour revenir d'un satellite vers la planète mère, il faut échapper à l'influence du satellite de référence autour duquel on orbite. On utilise :

- Allumage avec ORBIT-EJECT en mode Lower Orbit couplé à MAP en mode OP-MODE SHARED pour réglage de l'altitude du periapsis désiré sur la cible

Pour aller d'un satellite à un autre satellite d'une planète, il faut échapper à l'influence du satellite de référence autour duquel on orbite. On utilise :

- Allumage avec ORBIT-EJECT couplé à MAP en mode OP-MODE SHARED pour réglage de l'altitude du periapsis désiré sur la cible

Correction de trajectoire et approche

Correction en route avec un des modes de TARGET INTERCEPT

Correction à distance inférieure à 3xSOI (sphère d'influence) avec l'option PLANET-APPROACH

Insertion en orbite

- Si on veut s'insérer au Periapsis prévu avec ou sans excentricité, on utilise ORBIT INSERT
- Si on veut s'insérer à un moment donné à l'altitude où on se trouve on utilise Orbital en mode Circularize

Surveillance de la trajectoire

Elle se fait grâce au module MAP couplé en mode Shared et ses choix Dsp, Int et Plane

Si il est couplé en mode OP-MODE SHARED à un autre MFD, il montre l'influence sur la trajectoire des modifications effectuées sur ce dernier.

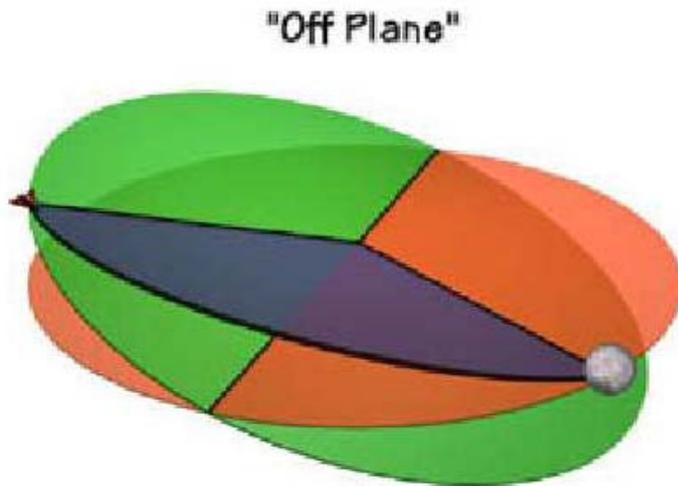
2 – DE LA TERRE A LA LUNE

C'est un voyage classique pas trop long qui convient parfaitement pour un entraînement.
De plus la Lune est une destination qui a toujours fait rêver. N'est on pas souvent "Dans la Lune" ?

Charger le scénario 01 – Depart pour la Lune.scn

Ce scénario permet après largage de Mir de se trouver dans un plan orbital presque aligné avec celui de la Lune.

Nous utiliserons le sous module Off-Plane Intercept du Module Target Intercept car il permet le transfert même si les plans orbitaux ne sont pas alignés et le trajet est court.



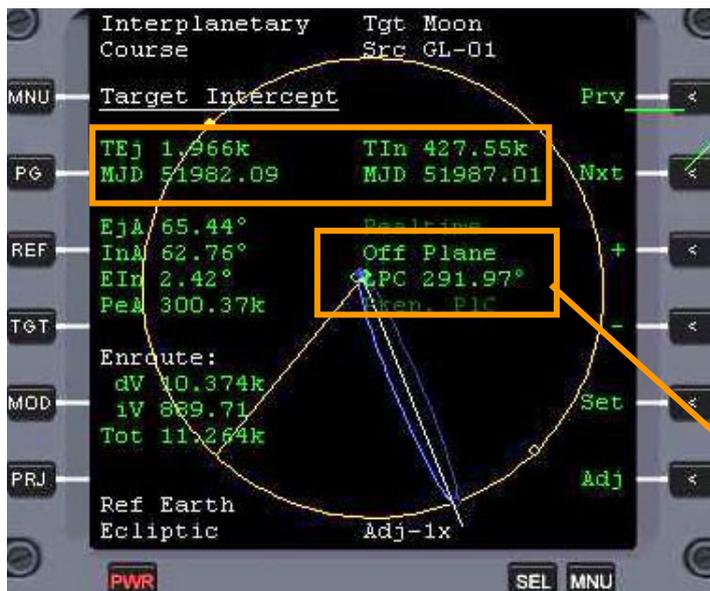
Le vecteur de combustion est calculé pour faire décrire une orbite de transfert (dans le plan violet) dont le plan coupe l'orbite de l'objectif en un point nodal.

Si l'objectif est à l'opposé de la planète de départ, l'inclinaison de l'orbite de transfert peut être très grande.

Cette manœuvre peut être très onéreuse en carburant et il vaut mieux la faire avec des plans orbitaux les plus alignés possible sinon il vaut utiliser Two Plane, Source Plane ou Target Plane

2.1 – Recherche automatique de la solution de tir avec Target Intercept

Ouvrir Sur le MFD de gauche le module Target Intercept qui va permettre de réaliser l'orbite de transfert HTO la plus économique. Il convient car on n'échappe pas à la planète de référence sinon il faudrait utiliser Orbit Eject



- PWR si nécessaire
- SEL (plusieurs fois si nécessaire)
- Interplanetary pour ouvrir le MFD
- MNU pour ouvrir le menu

COURSE pour ouvrir le choix
NEXT pour sélectionner Target Intercept
SET pour ouvrir Target Intercept

TGT puis entrer MOON pour sélectionner l'objectif

S'assurer d'être en mode Off Plane

Larguer le Delta en faisant CTRL + D puis K pour fermer le cône

Utilisation de IMFD version 4.6 - Exercices

On obtient une solution de tir à $TE_j = 1.966K$ (1966 s) avec un temps de combustion $BT = 700$ s (on peut l'avoir en changeant de page par PG puis en faisant BV) mais sans avoir aligné les plans puisque $EIn = 2.42^\circ$

Le temps de voyage est la différence entre les temps MJD pour l'éjection et l'arrivée ce qui donne $51982.09 - 51987.01 = 4.92$ soit presque 5 jours !!! C'est beaucoup pour un voyage lunaire qui est normalement de l'ordre de 3 à 4 jours. De plus le temps de combustion est assez long !

On peut accepter cette solution mais elle est coûteuse en temps et en carburant

On peut modifier les paramètres TE_j et TIn proposés pour diminuer si possible le temps d'allumage et de transport. Mais alors attention à la valeur de PeA !

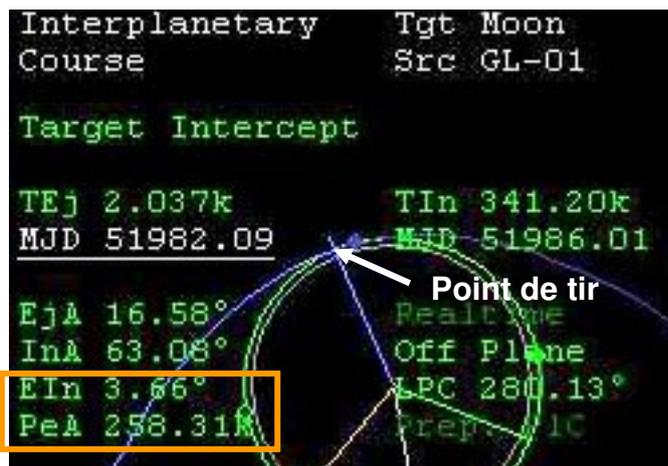
L'altitude calculée du periapsis à la Terre PeA est de 300.37k ce qui nous garantit de ne pas rentrer dans l'atmosphère.

Il est important de dire un mot à ce sujet.

La forme de l'orbite obtenue après allumage va dépendre des valeurs de TE_j et TIn choisies. Elle peut arriver en se déformant à être au départ trop proche de l'atmosphère et même couper la terre et alors c'est la catastrophe !

Quand on fait un réglage il faut être très attentif à s'assurer que la valeur de PeA reste positive et supérieure à 150k (hauteur de sécurité pour la Terre) Bien entendu cette valeur dépend de la planète autour de laquelle on orbite.

Exemples à faire et ne pas faire (en grossissant en faisant **PG** pour être sur la page 2 puis **Z+**)

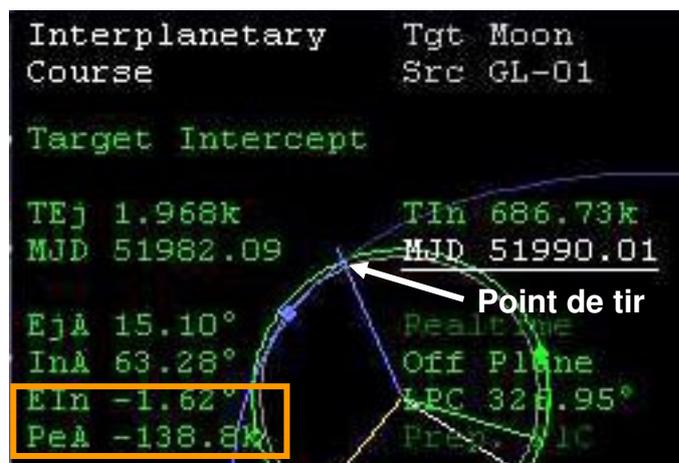


Le point de tir est bien placé.

$PeA = 258,31$

On ne risque pas de pénétrer dans l'atmosphère

Le petit point juste au dessus de la pointe de la flèche est le Periapsis de l'orbite calculée



On avance le temps TIn par exemple et le point de tir est mal placé

$PeA = -138.8$ (négatif !)

On rentre largement dans l'atmosphère et on percute même le sol puisque l'altitude est négative (cercle vert = notre orbite, Cercle gris = le sol, courbe bleu = l'orbite calculée)

Pour toute opération de tir depuis une orbite autour d'une planète, il faudra toujours avoir PeA supérieur à l'altitude limite de l'atmosphère

Par cette méthode, on obtient rapidement une solution de tir pour rejoindre la Lune, mais on ne tient pas compte au plus près des conditions d'insertion lunaire (inclinaison et altitude) et de limitation de consommation qu'imposerait par exemple une mission Apollo.

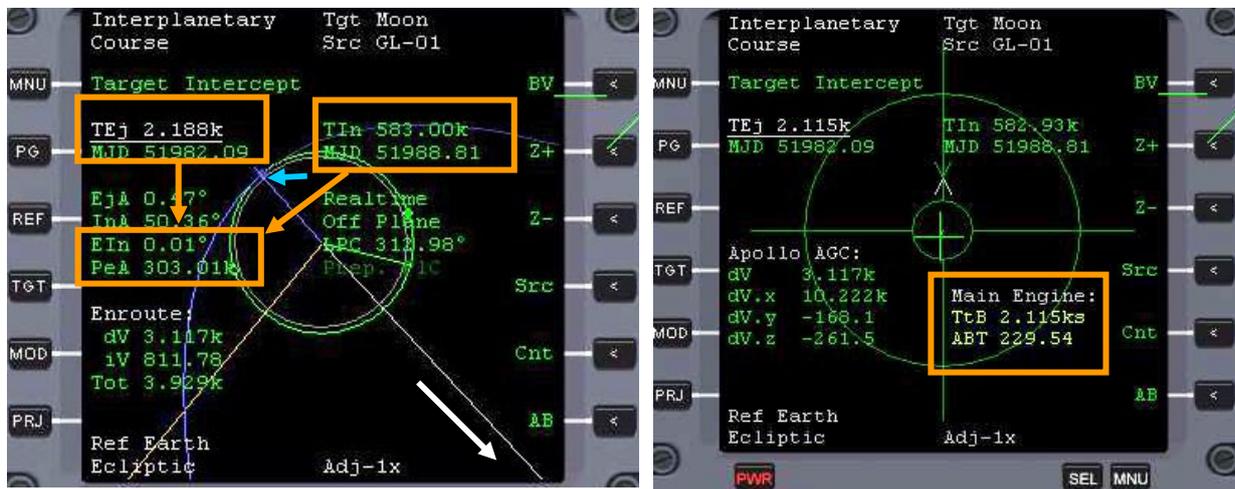
Si nous voulons économiser du carburant il faut faire varier TIn pour que EIn=0 soit le plus petit possible mais alors la date d'arrivée est imposée. Ensuite on peut faire varier TEj de manière à diminuer le temps de voyage tout en ayant un PeA suffisant comme nous l'avons dit plus haut et un temps de combustion ABT le plus petit possible.

Ci-dessous nous avons optimisé la consommation en effectuant les réglages suivants:

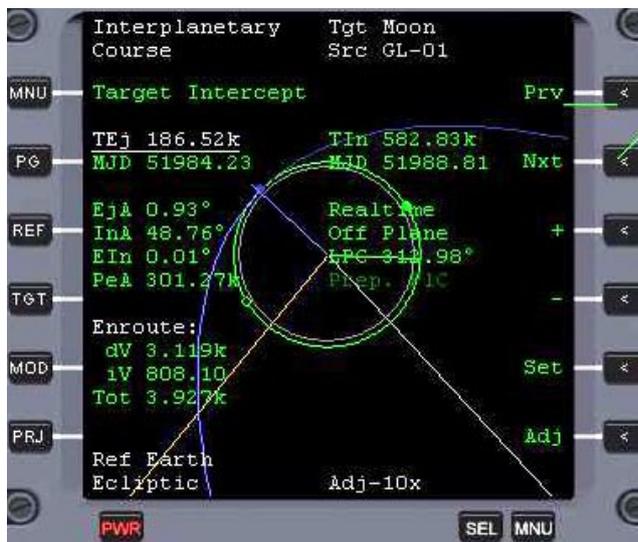
- En faisant PG pour passer en page 2 utiliser Z+ pour agrandir l'affichage et voir la trajectoire bleue prévue au départ.puis repasser en page 1
- Réglage de TIn pour EIn voisin de 0 (utiliser Prv, Nxt ,+ et – et modifier Adj si nécessaire)
- Réglage de TEj pour placer le point d'éjection au bout du rayon bleu (flèche bleue) dans le prolongement de la direction de la Lune (flèche blanche) en s'assurant que PeA reste >150k (utiliser Prv, Nxt ,+ et – et modifier Adj si nécessaire)

En faisant PG pour passer en page 2 puis BV, on peut voir que ABT est réduit à moins de 230 s ce qui est normal puisque dV est passé de 10k à un peu plus de 3k. Moins d'accroissement de vitesse au départ = moins de carburant consommé.

Par contre le voyage est plus long puisque TIn-TEj = 580900 s soit 6,7 jours environ



Il reste à passer en autoburn par AB en page 2 et à attendre le départ. On peut accélérer le temps jusqu'à 1000x



Si on veut diminuer le temps de voyage il faut partir plus tard en décalant le temps Tej du départ tout en respectant comme précédemment le positionnement du point de lancement et la valeur de PeA.

Ci contre TIn-TEj donne environ 4,6 jours et ABT comme on peut le voir en faisant BV est sensiblement le même

Notas :

Les chiffres varient un peu entre les réglages puisque le temps passe !

Il faut lancer dans TEj=186520 s soit un peu plus de deux jours et il vaut mieux refaire un scénario démarrant à MJD=51984 par exemple si on ne veut pas avoir le tournis en attendant le départ

Si c'est le TIn d'arrivée que l'on se fixe, il est bon de prendre un scénario commençant 5 jours plus tôt pour faciliter et l'idéal est d'avoir le plan orbital presque aligné avec celui de la Lune.

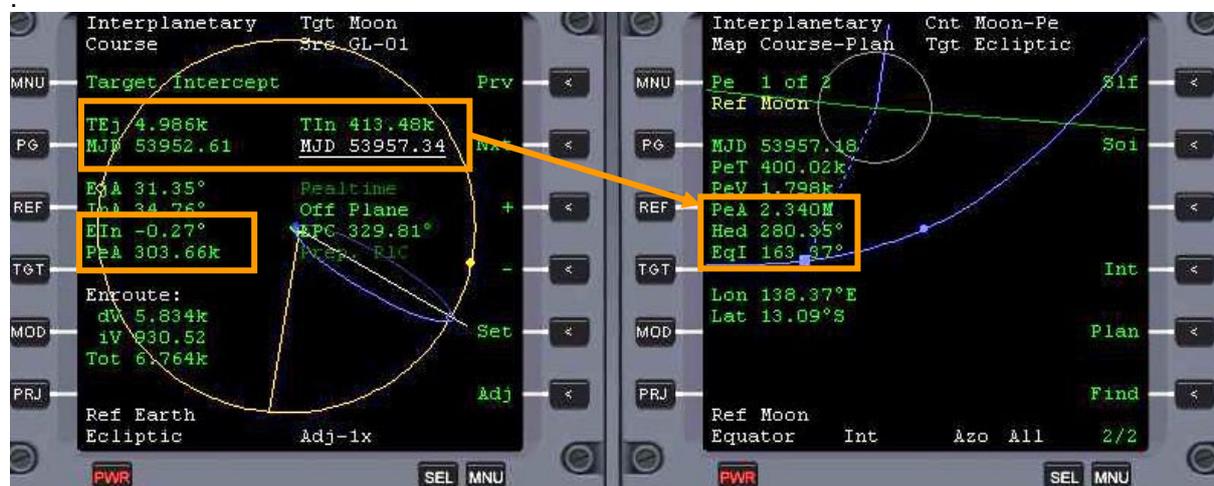
2-2- Recherche de la solution en utilisant Map

Le principe de recherche reste le même mais nous pouvons contrôler la trajectoire prévue en couplant le module Course avec un module Map

Sur le MFD de gauche ouvrir Target Intercept comme on l'a fait ci-dessus
Sur le MFD de droite nous allons ouvrir le module Map de la façon suivante:

- **PWR**→**SEL**→**MNU**
- **OP-Mode** puis entrer 0 (zéro) pour se coupler au MFD de gauche
- **Map** puis **TGT** et entrer Moon
- **REF** puis entrer Moon
- **Cnt** (sur page 1) puis entre p-moon pour faire référence au periapsis à la Lune
- **PG** si nécessaire pour passer en page 2 puis **Int** et **Plan** pour se lier au module Course

On fera les réglages comme déjà vu mais on peut régler **TIn** et **TEj** en fonction de ses intérêts pour régler les valeurs du Periapsis à la Lune et de l'inclinaison **EqI** d'insertion.
Attention toutefois au temps de combustion **ABT** et à la valeur minimum de **PeA** sur Target Intercept !



Ces réglages sont assez délicats et il ne faut pas essayer d'être trop précis. Il sera plus efficace de corriger en route sans que ceci soit trop onéreux en carburant.
Il faut faire un compromis en fonction de ce que l'on désire comme par exemple entre date d'arrivée et temps de combustion.

Notas :

Pendant le tir le MFD Map donne des tracés étranges qui viennent du principe de calcul
Le réglage fin d'altitude n'est pas très efficace et on obtient en général une trajectoire de collision.
Il conviendra de faire une correction une fois dans la sphère d'influence SOI de la Lune comme nous allons le voir

En résumé, pour utiliser Off-Plane Intercept il faut :

- 1 - désigner l'objectif
- 2 - agir sur **Tin** pour avoir **EIn = 0**
- 3 - agir sur **TEj** pour avoir **TIn - Tej = un temps raisonnable que l'on se fixe en vérifiant que:**
 - **PeA > limite d'altitude atmosphérique**
 - **BT < temps de combustion maximum qu'autorise le vaisseau pour cette phase**
- 4 - en ouvrant le module **Map** en mode **OpMode Shared**, avec la cible comme référence, on peut affiner **TEj** pour avoir l'altitude souhaitée en arrivant sur la cible tout en respectant les contraintes pour **PeA** et **BT** (correction non obligée)
- 5- Après avoir trouvé **TEj** on passe en **AutoBurn**

2.2 – Correction en route

Nous allons repartir de la solution proposée automatiquement à partir du scénario initial
01 – Depart pour la Lune.scn

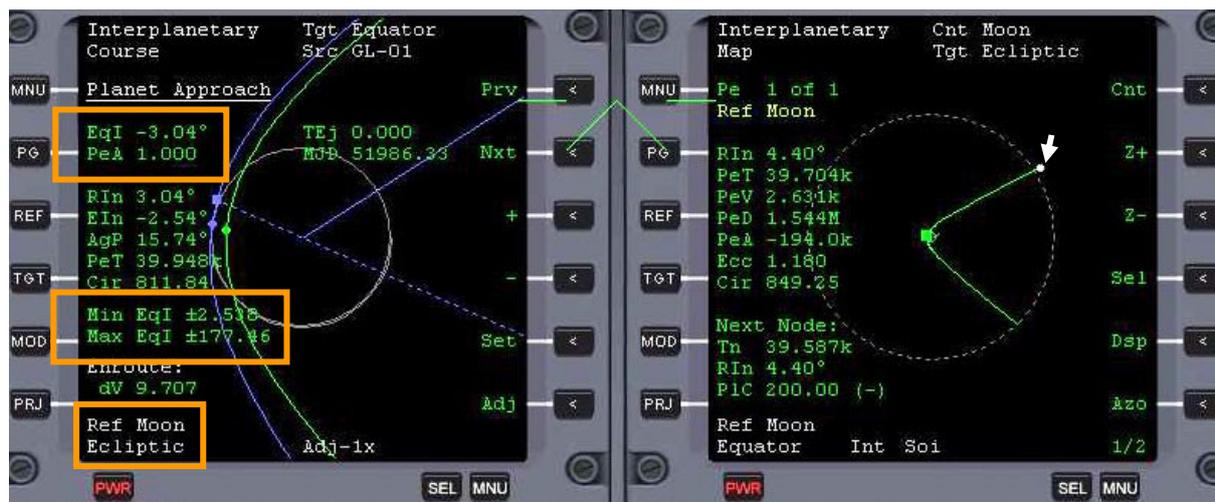
Après l'allumage, il n'y a plus qu'à attendre en accélérant le temps et en surveillant sur Map que nous allons vers notre objectif avec une valeur faible sinon négative pour PeA ce qui est le cas.

Nous allons faire une correction de trajectoire en entrant dans la SOI de la Lune en utilisant le sous-module **Planet Approach** du module Course en l'appelant par :

- Prv** ou **Nxt** pour se placer sur le nom du module Target Intercept en haut à gauche
- +** pour ouvrir le menu de choix des sous modules Course
- Prv** ou **Nxt** pour sélectionner le sous-module Planet Approach
- Set** pour valider le choix
- REF** puis entrer Moon si ce n'est pas le cas (**attention c'est important d'avoir la bonne cible !**)
- Z+ouZ-** si on veut en passant en page 2

Sur le module Map:

- SOI** pour afficher en cercle pointillé les sphères d'influence.
- REF** puis entrer Moon si ce n'est pas le cas
- Z+ouZ-** en passant en page 2 pour voir la trajectoire et la sphère d'influence



Sur le MFD Map on voit que le vaisseau (point blanc) va rentrer dans la sphère d'influence SOI (cercle pointillé de la Lune) Ceci se produit vers Altitude = 40M lue sur le HUD

On peut voir aussi sur le MFD Planet Approach plusieurs choses intéressantes :

- EqI et PeA nous donnent les valeurs de l'inclinaison équatoriale et de l'altitude prévues par le calculateur
- Min EqI et Max EqI nous donnent la limite des réglages possible pour l'inclinaison équatoriale de l'orbite

Notre altitude n'est pas excellente (et même négative) et s'est éloignée de notre objectif, ce qui est normal en raison des éléments perturbateurs (manque de sphéricité, alignement des plans pas parfait...)

Notre inclinaison équatoriale n'est peut être pas non plus celle que nous souhaitons.

En supposant que notre objectif sur la Lune est Tranquility-Base pour la mission Apollo 11, elle se trouve à la latitude 0°59N c'est-à-dire presque sur l'équateur lunaire.

Il faut réaliser une mise en orbite rétrograde (rotation d'Est en Ouest) pour bénéficier de l'effet de freinage de la Lune qui nous fera économiser du carburant, et il nous faut une inclinaison de $180 - 0,59 = 179,41^\circ$ (ou $-179,41^\circ$) pour avoir une trajectoire rétrograde qui passe juste au dessus de la cible.

Rappelons que 90° à -90° en passant par 0° donne un mouvement prograde (ouest-est) et 90° à -90° en passant par 180° un mouvement rétrograde.

$+90^\circ$ ou -90° correspondent à une orbite circumpolaire et 180° ou -180° correspondent à une orbite équatoriale.

Prv ou Nxt pour sélectionner EqI puis **Set** et entrer -177.46° qui est la valeur maximum possible

Prv ou Nxt pour sélectionner PeA puis entrer 100k qui est bonne altitude pour une mission Apollo

AB pour allumer

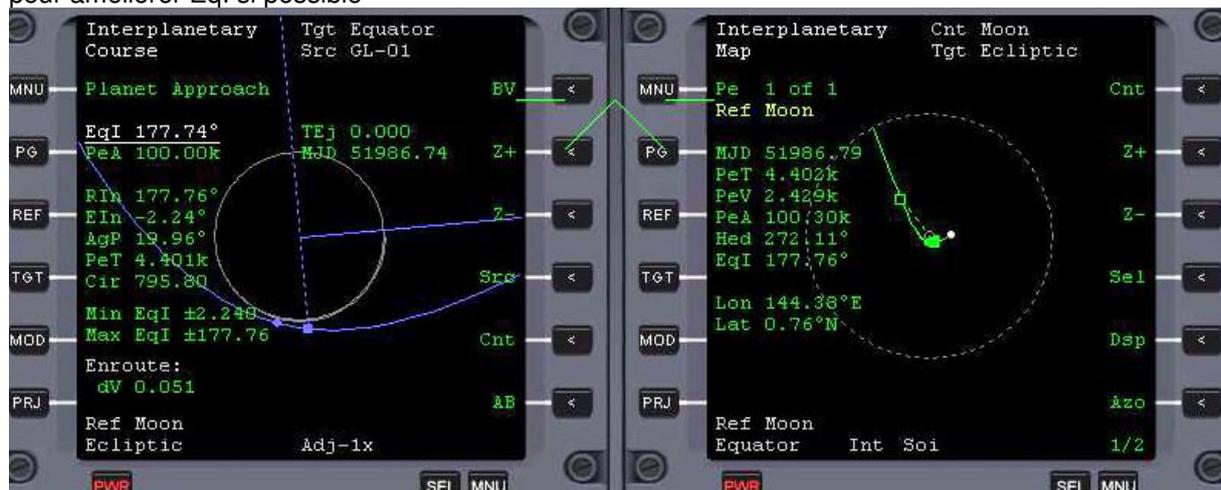
Sur Map on peut afficher la valeur de EqI en agissant sur MOD



La correction n'est pas parfaite mais elle a nécessité moins de 14 secondes d'allumage.

PeA sur le module Map est de 20k mais nous étions un peu loin pour une bonne précision

Nous allons refaire une dernière petite correction près de l'arrivée à une distance $< 5M$ de la Lune quand le temps PeT (pour arriver au périapsis) lu sur Map est de l'ordre de 4.500k. On peut en profiter pour améliorer EqI si possible



2.4 – Mise en orbite lunaire

Maintenant il n'y a plus qu'à réaliser la mise en orbite en utilisant le module **Orbit-Insert** sur le MFD de gauche.

Prv ou Nxt pour se placer sur le nom du module Planet Approach en haut à gauche

+ pour ouvrir le menu de choix des sous modules Course

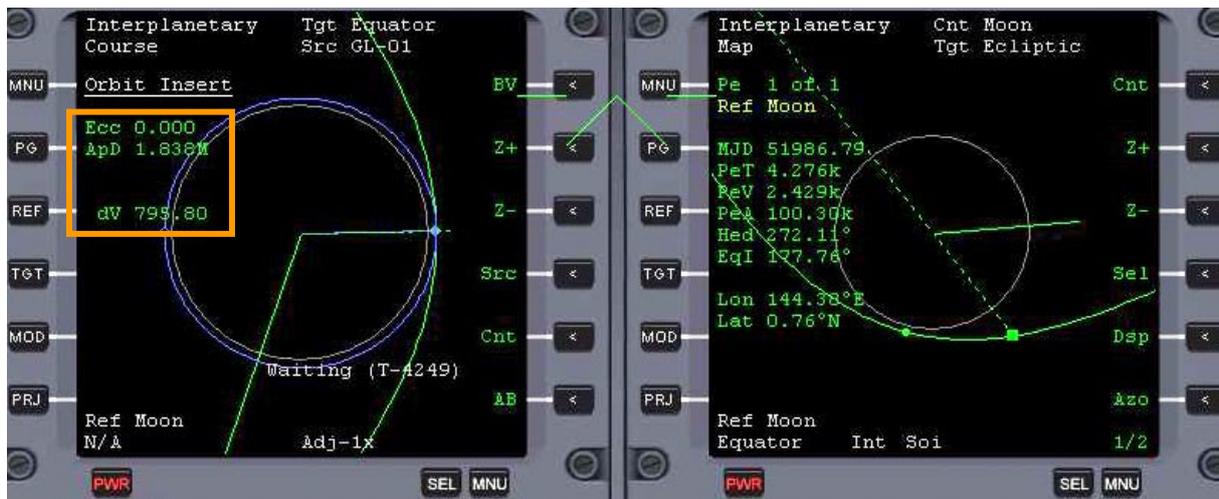
Prv ou Nxt pour sélectionner le sous-module **Orbit Insert**

Set pour valider le choix

Changer de page par **PG**
 Passer en autoburn **AB**

Ce module est pratique et il va circulariser à l'altitude ApD = PeD prévu
 On peut si on le désire modifier ApD mais seulement en l'augmentant ou modifier Ecc si on ne veut pas se mettre en circulaire
 En final l'excentricité est très proche de 0

On peut afficher le temps d'allumage ABT en cliquant sur BV. L'allumage en rétro permet de diminuer la vitesse d'approche pour avoir $dV = 0$



Orbite quasi équatoriale, rétrograde (Est-Ouest) et circulaire à une altitude de 100k passant sur la base.

Nous nous trouvons à 3.447M de distance de la base on pourrait descendre !
 Vous essayerez plus tard....

Le scénario
02- En orbite lunaire.scn
 vous place dans cette situation et va nous servir pour le retour

3 – DE LA LUNE A LA TERRE

Maintenant après avoir contemplé la Lune, nous allons faire le retour.
 Pour cela nous utiliserons le module Orbit Eject dans le mode Lower Orbit puisque nous voulons nous diriger à "l'intérieur" de notre orbite.
 Le module Course ne convient pas car nous sommes toujours sous influence de la Terre.

3. 1 – Recherche de la solution de tir

Charger le scénario **02 – En orbite lunaire.scn**

Sur le MFD gauche, afficher le module Orbit Eject en faisant :

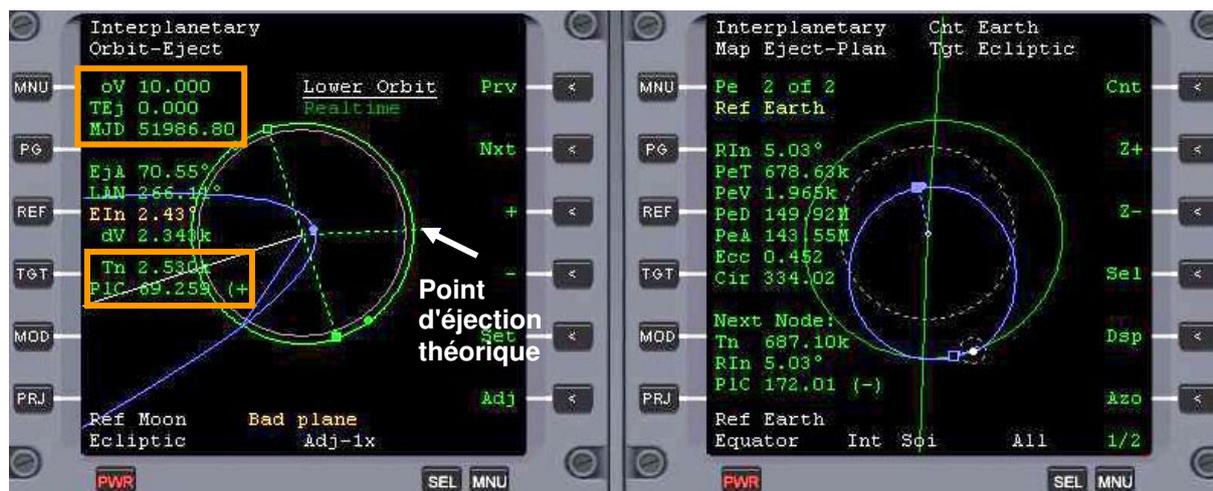
PWR → **SEL** (plusieurs fois si nécessaire) → **Interplanetary** → **MNU**
Nxt pour sélectionner Orbit Eject
Set pour sélectionner le module
 + plusieurs fois pour sélectionner Lower Orbit

Le mode Lower Orbit nous donne une orbite d'éjection dans le sens opposé au déplacement de la planète autour du soleil.
 Il est adapté pour atteindre des planètes plus proches du soleil que la planète de référence et à utiliser dans le cas particulier pour le transfert Lune-Terre

Sur le MFD de droite, afficher le module Map en mode OpShared pour pouvoir contrôler la trajectoire d'approche en faisant:

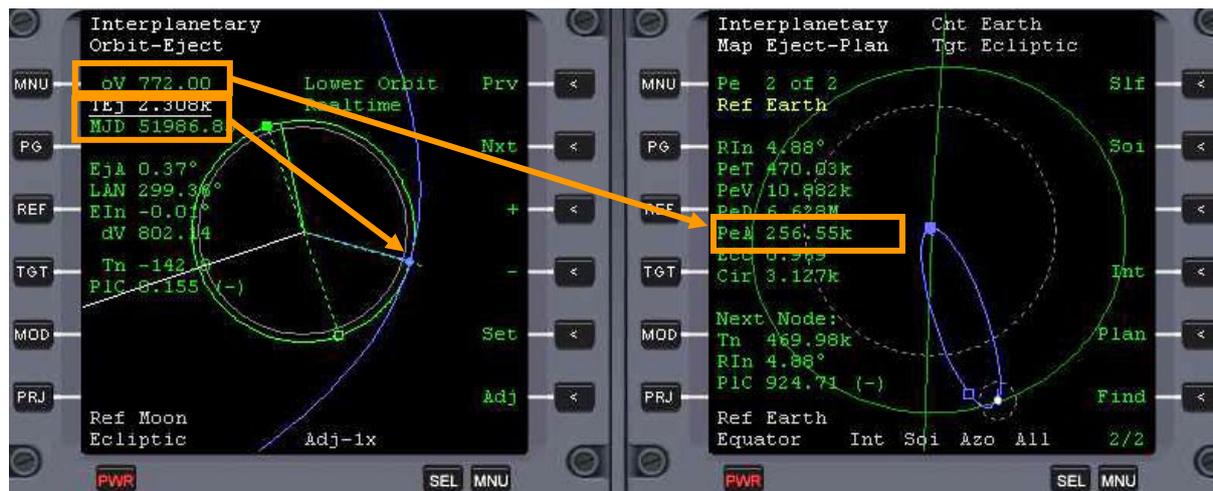
PWR → **SEL** (plusieurs fois si nécessaire) → **Interplanetary** → **MNU**
PG pour sélectionner OpMode Shared et entrer 0 (zéro) pour être couplé au MFD de gauche
Map pour ouvrir Map
REF puis entrer Earth comme référence
Disp pour afficher les orbites
PG pour être en page 2
SOI pour afficher la sphère d'influence
Int et Plan pour afficher la trajectoire sous dépendance du module Orbit Eject

Z+ et **Z-** seront utilisés si nécessaire pour bien visualiser la trajectoire



EIn est plus grand que 1 et le MFD nous signale que le plan d'éjection n'est pas bon (Bad Plane)
 Il faut commencer par réduire EIn le plus près possible de 0 en allumant au prochain nœud signalé par Tn 3212k et PIC 3.382 (+)

Amener EIn vers 0 en plaçant le vaisseau en position NORMAL + et en allumant quand Tn = 0
 On peut utiliser le RCS en mode translation (touche /) pour ajuster finement.



Augmenter oV pour avoir PeA sur Map réglé à la valeur la plus proche de la valeur désirée (réglage approché seulement possible) Ici nous avons pris 256k

Régler TEJ pour amener le point d'éjection sur le point qui est à l'extrémité d'un rayon vert pointillé. En modifiant TEJ il faut amener le rayon bleu sur le rayon vert pointillé (voir figures ci-dessus). Il ne faut pas risquer de percuter la Lune au départ et le problème est similaire à celui que nous avons évoqué au paragraphe 1.1 avec un petit ennui en moins car il n'y a pas d'atmosphère

Faire **PG** sur le module **Orbit-Eject**
Passer en allumage auto par **AB** et c'est parti !

Voilà le travail ! Avec un **ABT** de moins de 53 s au départ (on peut le voir en faisant **BV**) nous allons pouvoir regagner notre Terre.

Le scénario

04 – Ejection vers la Terre.scn

vous place dans la situation EIn = 0 et peut vous servir pour tester les réglages

Notas:

Il est possible de chercher la solution de tir sans aligner les plans en raison de la faible valeur de EIn mais le résultat ne sera pas très bon et il faudra des corrections plus onéreuses en carburant.

Il vaut mieux respecter la règle et aligner

En fin d'allumage Map signale "Invalid Burn Data" si on reste en mode Plan. Il vaut mieux supprimer le mode Plan avant l'allumage.

3.2 – Correction en route

Après l'allumage et en cours de route, **PeA** varie un peu et il faudra une petite correction en route en entrant dans la sphère d'influence SOI de la Terre et peut être aussi en arrivant pour plus de précision.

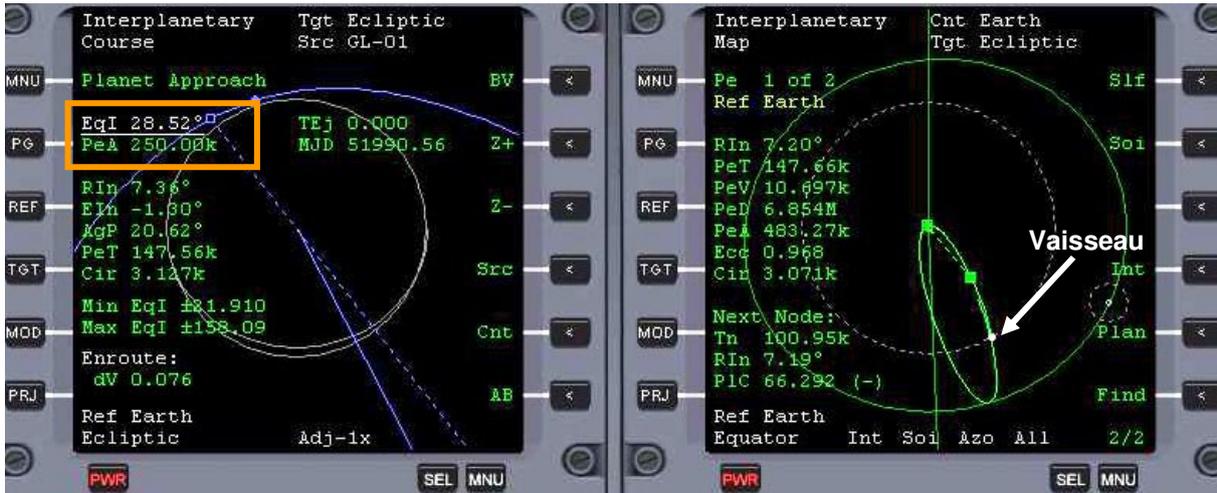
Il vaut mieux faire les corrections assez loin de l'objectif pour dépenser moins de carburant et la SOI voire deux fois la SOI donne un bon point dur le trajet.

Supposons que l'on désire se mettre en orbite à 250 km d'altitude sur une orbite pouvant passer au dessus de Cape Canaveral qui se trouve à 28°52N. Nous prendrons ces valeurs pour l'approche.

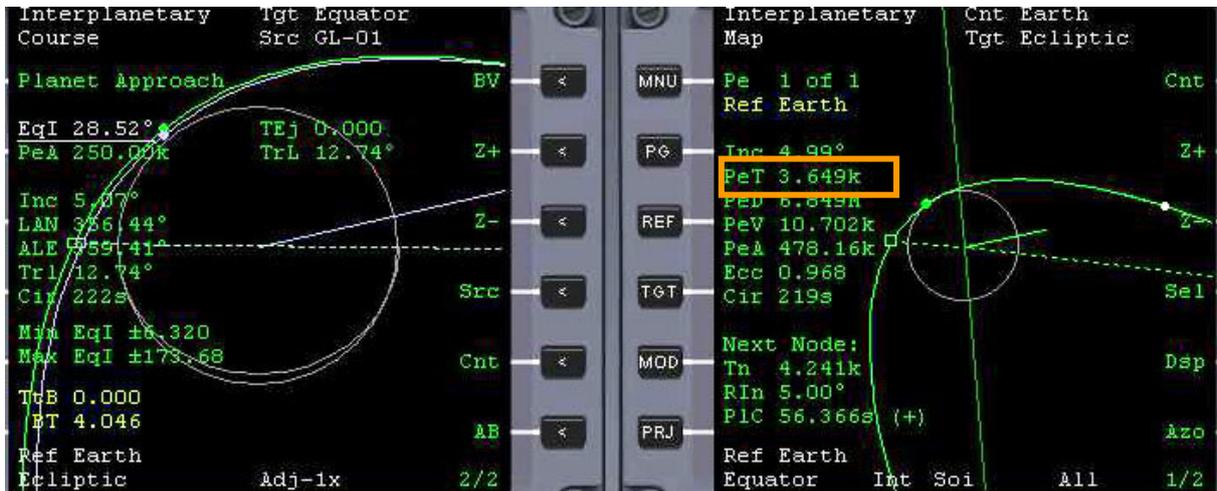
Nous utiliserons comme pour l'aller le module Planet Approach. que nous ouvrirons de la même façon.

Faire **REF** puis entrer Earth
Sélectionner **Eql** et **PeA** et entrer les valeurs 28.52 et 250k

Contrôler sur le module Map le moment où le vaisseau entre dans la sphère d'influence (cercle en pointillé) et lancer l'Auto Burn sur le module Course



L'allumage prend moins de 4s ce qui est très économique



En arrivant près de la Terre vers 20M (PeT vers 4.000k) faire la dernière correction essentielle pour avoir la bonne altitude (n'oubliez pas l'atmosphère et PeA a varié !)
Relancer un Auto Burn sur le module Course et c'est bon ! PeA = 250k environ et trajectoire dont l'inclinaison permettra de passer au dessus de Cape Canaveral

Nota : Pour améliorer la précision de l'allumage qui est court, il est bon de sélectionner TEj et de l'augmenter jusqu'à 200s. Ainsi, en passant en Auto Burn ensuite, le vaisseau se positionne à T-180 et il a le temps de se stabiliser avant l'allumage

3.3 – Mise en orbite terrestre

Circulariser comme nous l'avons fait pour la Lune au § 2.4 et nous avons une orbite qui peut passer sur le Cape à 254 km d'altitude (voir figure ci après)
Nous sommes de retour au bercail et il ne restera plus qu'à atterrir.

Compte tenu des perturbations de la gravitation près de la Terre l'altitude finale est un peu différente de celle désirée. Il faut se garder une marge d'erreur de quelques kilomètres au dessus de l'altitude de l'atmosphère si on désire s'insérer en orbite très basse



En résumé, pour utiliser Planet Approach il faut :

- Désigner la planète de référence (très important sous peine d'erreur !)
- Entrer les valeurs souhaitées pour EqI (inclinaison sur le plan équatorial) et l'altitude PeA
- Faire la première correction à une distance de 1 à 2 fois la distance de SOI
- Faire la dernière correction entre 4000s et 3000s avant l'arrivée

Remarque importante

Nous avons réalisé les corrections avec le module Planet Approach qui facilite l'opération et qui est valable en raison de la faible distance du voyage Terre Lune
Comme nous le verrons dans les exercices qui suivent, pour des voyages plus importants il est nécessaire de faire les corrections avec le module Target Intercept

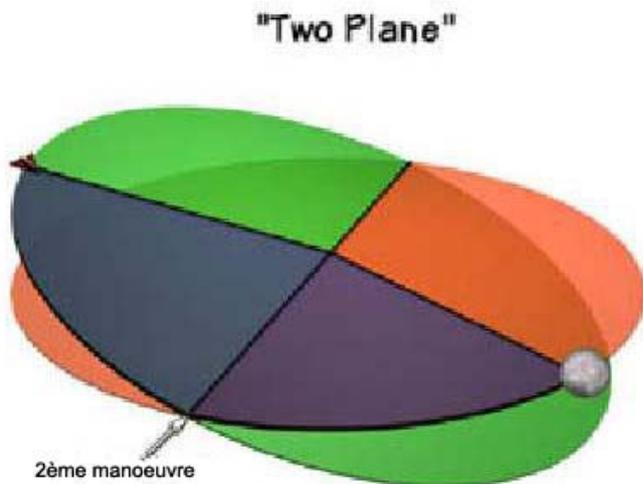
Le scénario

04 – En orbite terrestre.scn

vous place dans cette situation et peut vous servir pour faire d'autres essais

4 – DE LA TERRE A LA LUNE (VARIANTE TWO-PLANE)

Nous utiliserons cette variante de transfert pour nous entraîner



On suit le plan orbital de la planète de départ (en vert) puis le plan orbital de la planète objectif (en orange)
Le changement de plan se fait en un point nodal.

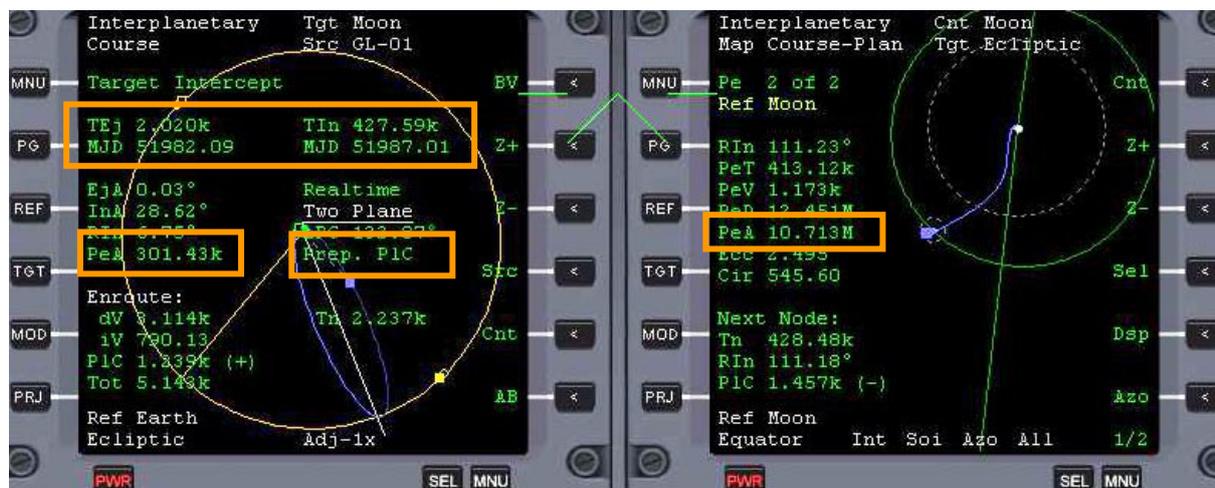
Si possible il faut intercepter l'objectif en un nœud et à défaut, essayer de faire le changement de plan le plus loin possible du corps de référence de départ pour économiser le carburant.

L'idéal est de placer le point de changement de plan sur l'objectif.

Charger le scénario 01 – Départ pour la Lune.scn

Ouvrir à gauche le MFD comme en 2.1 mais en choisissant le module Two-Plane

Ouvrir à droite le MFD Map en mode Op Shared et mode Int et Plan



La solution proposée est bonne et donne un temps d'allumage ABT < 230 s et un voyage de moins de 5 jours.

On peut l'accepter et faire un allumage automatique puis corriger en route comme nous l'avons fait ci-dessus à la limite de la SOI et à 4000s de l'arrivée

On peut aussi faire les mêmes corrections que dans l'exemple précédant en surveillant les valeurs de ABT et de PeA >150k

L'allumage se fait en deux fois:

- Premier allumage par AB après avoir trouvé la solution.
- Dès la fin de cet allumage, sélectionner Prep.PIC, faire + pour valider puis AB pour préparer le deuxième allumage pour changement de plan au point nodal

Nous verrons plus loin dans un autre exercice une autre façon de réaliser un voyage Terre_Lune en utilisant le module BaseApproach

5 - DE LA TERRE A MARS

Nous allons repartir du scénario Depart pour la Lune.scn un peu modifié pour se placer à un moment favorable pour un tir vers Mars.

Il faut partir vers le mois de juin 2003 pour arriver au début 2004 pour réaliser un voyage économique le plus court possible (voir en annexe les fenêtres de tir favorables pour différentes planètes)

Le scénario
05 – Départ pour Mars
 vous place le 9 juin 2003 en fin de journée, dédocké et prêt à partir

5.1 – Solution de tir

Pour tirer vers une planète extérieure il faut utiliser le module Orbit-Eject en mode Higher Orbit
 Nous le placerons en mode Realtime qui n'impose pas un vecteur de combustion Prograde et nous couplerons le module Map en mode Op-Shared à ce module

Sur le MFD gauche ouvrir le module Orbit-Eject en faisant:

- PWR → SEL (n fois) → Interplanetary →MNU →sélection du module Orbit-Eject → Set

Sur le module MFD de droite, ouvrir le module Map en faisant:

- PWR → SEL (n fois) → Interplanetary →MNU →PG et entrer 0 pour se coupler à Orbit-Eject → Map pour sélection du module
- TGT et entrer Mars pour sélectionner l'objectif
- Dsp pour afficher les orbites
- PG pour passer en page 2
- Int et Plan pour afficher la trajectoire liée aux paramètres de Orbit-Eject
- PG pour repasser en page 1
- Sel pour afficher les valeurs au Periapsis martien Pe 1 of 3

Un mot sur l'orbite!

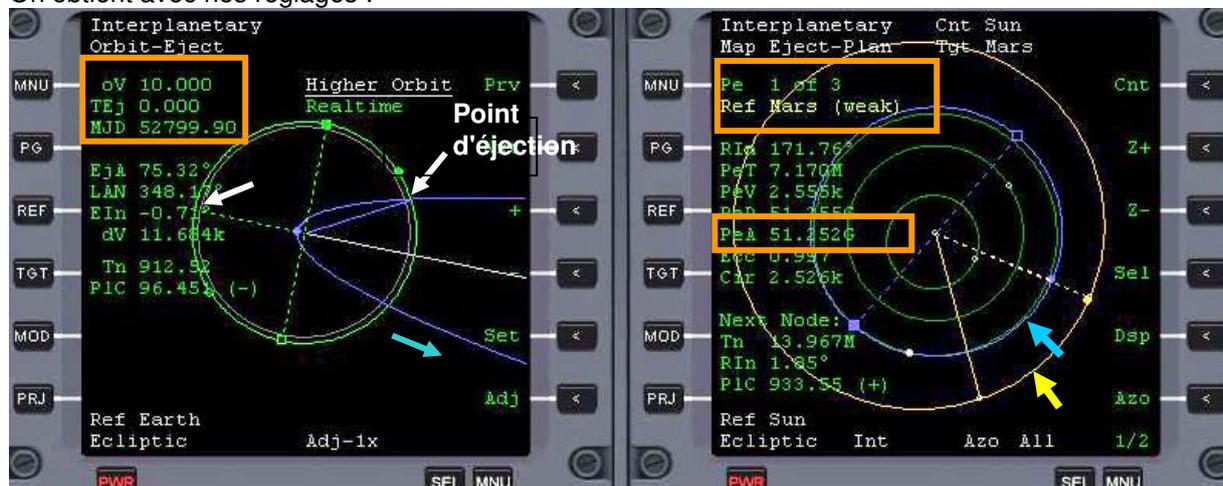
C'est une orbite autour du soleil (Sun) comme référence et elle est définie par rapport au soleil avec une valeur Ap d'Apoapsis et une valeur Pe de Periapsis.

Comme c'est Mars l'objectif on peut afficher aussi le Periapsis de l'orbite au niveau de Mars.

C'est ce qui explique qu'avec Sel on peut afficher 3 valeurs: Pe ou Ap avec Ref Sun et Pe avec Ref Mars.

Si la trajectoire est loin de Mars (>100M), Pe avec Ref Mars est suivi de (weak) pour le signaler.

On obtient avec nos réglages :



Sur Map on voit que l'orbite d'éjection (voir flèche bleue) ne coupe pas l'orbite de Mars (voir flèche jaune) ce qui est normal puisque oV dans Orbit Eject est par défaut seulement égal à 10. PeA au Pe Ref Mars est donc très grand (>51G), ce qui n'est pas surprenant.

Le point d'éjection actuel pour $TE_j = 0$ n'est pas bien placé et on voit que l'orbite d'éjection en bleu percuterait la Terre si on tirait immédiatement. De plus le temps de combustion BT serait trop grand.

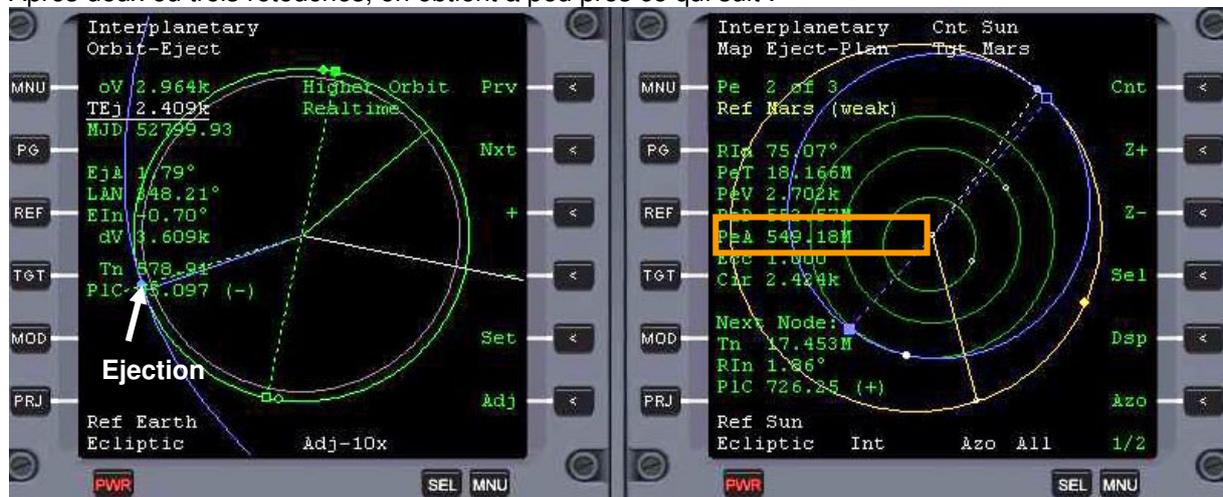
Sélectionner TE_j et augmenter le temps pour amener le point d'éjection au bout du rayon vert pointillé (flèche blanche) qui est la position calculée idéale pour l'éjection à l'opposée du trait blanc qui est la direction de l'objectif.

Sélectionner oV et l'augmenter pour diminuer PeA sur plan si possible en dessous de 1G (**attention a bien avoir choisit Pe 1 of 3 Ref Mars**)

1G = 1000M = 1000000 km c'est à dire environ trois fois la distance Terre-Lune
 Sur un voyage aussi long que Terre-Mars une telle erreur de calcul initial est acceptable et la correction en route sera facile.

Retoucher TE_j pour replacer le point d'éjection et si il faut oV à nouveau pour réduire PeA

Après deux ou trois retouches, on obtient à peu près ce qui suit :



Sur Map on obtient la distance prévue au Periapsis qui est $PeA = 549.18$ (549180 km) et le temps de transfert pour y arriver qui est $PeT = 18.166M = 18166000$ s = environ 210 jours (1 jour = 86400 s)

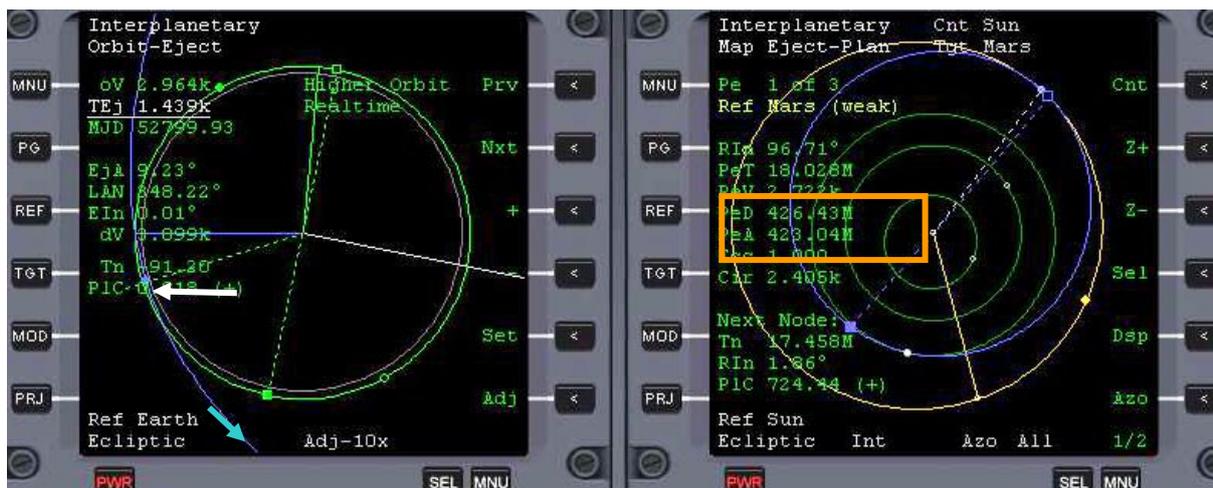
On passera en théorie à 549180 km de Mars si on ne fait pas de correction ce qui est une très bonne précision pour un voyage de plus de 400000000 km (moins de 2 pour 1000 en déviation)

Pour un tel voyage on peut considérer que si on obtient $PeA < 5G$, c'est satisfaisant et on fera les corrections en route.

Le temps de voyage sera de 210 jours = 7 mois ce qui est normal pour un tir en période favorable pour avoir un trajet minimum.

Comme dernier gadget et pour nous entraîner à le faire si nous en avons besoin, nous allons réduire EIn à 0 si possible pour avoir un tir dans le plan de notre orbite puisque dans ce cas, le vecteur d'échappement est dans le plan de celle-ci

On voit sur Orbit-Eject que à environ $Tn = 578$ s il faut faire faire un allumage de 5.097 s en position NORMAL – si on veut aligner. Faisons le en surveillant EIn



Après avoir réduit Eln à 0 nous allons parachever le réglage en réajustant si on peut TEj pour diminuer PeA le plus possible.

Attention ! Bien s'assurer en zoomant si nécessaire qu'en partant du point d'éjection (flèche blanche) la trajectoire calculée bleue ne coupe pas l'orbite verte dans le sens du départ. Dans notre cas c'est bon puisqu'on tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Sans correction nous passerons théoriquement à moins de 421000 km (1,1 fois la distance Terre Lune) et c'est déjà très bien après un voyage de 7 mois !

PeA peut varier un peu après les réglages mais ce n'est pas grave, nous corrigerons en route !

Annuler le mode Plan sur Map pour éviter des aberrations possibles d'affichage.

Tout est maintenant correct, il n'y a plus qu'à passer en Auto Burn par AB et à attendre le départ. On peut accélérer le temps qui revient à 10x automatiquement, 200 secondes avant l'allumage. Pour la précision il est préférable de revenir à 1x pour le positionnement et l'allumage.

Le scénario

06 – Solution de tir pour Mars.scn

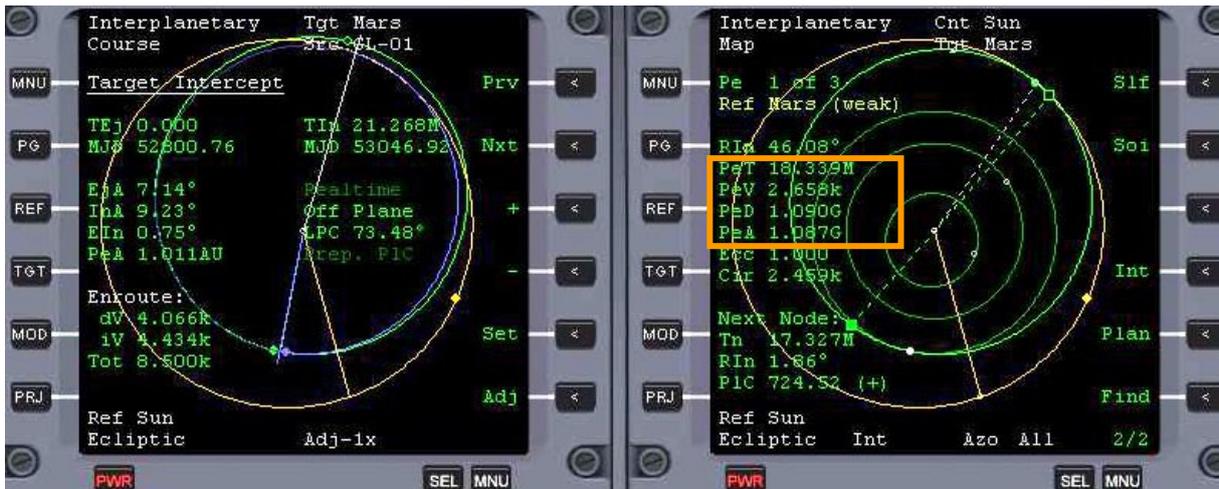
Nous place dans cette situation en attente de départ

5.2 – Corrections

5.2.1 - Correction à mi course

Après le tir on peut passer le module Map en mode normal en faisant Plan. Quand on voit apparaître sur Orbit-Eject un texte "Have a nice voyage" qui nous signale que l'on sort de la sphère d'influence de la Terre ($G=0.5$ sur le module Orbit standard) ouvrir à la place d'Orbit-Eject (**faire MNU→Course**) le module Target Intercept en mode Off_Plane pour la correction car les plans sont peut être un peu désalignés. Prendre Mars comme objectif.

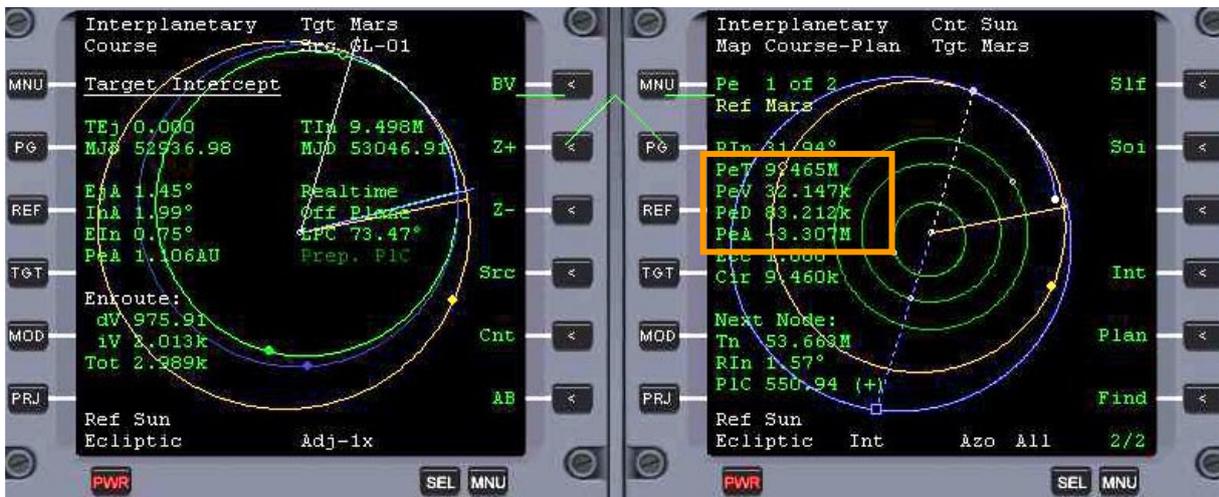
Attention ! S'assurer que la source sélectionnée est bien le vaisseau GL-01. Si ce n'est pas le cas il faut faire Src et entrer X (pour désigner le vaisseau) et valider car c'est la trajectoire du vaisseau que nous devons corriger. Si on ne se trouve pas avec cette source on a un message d'erreur "Invalid Burn Data" quand on passe en mode plan sur Map



On a l'affichage ci-dessus et il nous faut maintenant patienter avant de faire une correction à mi route. Accélérons le temps en 10000X jusqu'à la correction.

Attendons que PeT soit aux alentours de 9M à 10M (le temps total prévu était de 18M environ) pour faire une correction. Nous sommes encore assez loin et elle ne coûtera pas trop cher en carburant. Passons le module Map en mode plan

Le scénario
08 – Mi course de Mars.scn
 nous permettra de vous entraîner pour les corrections

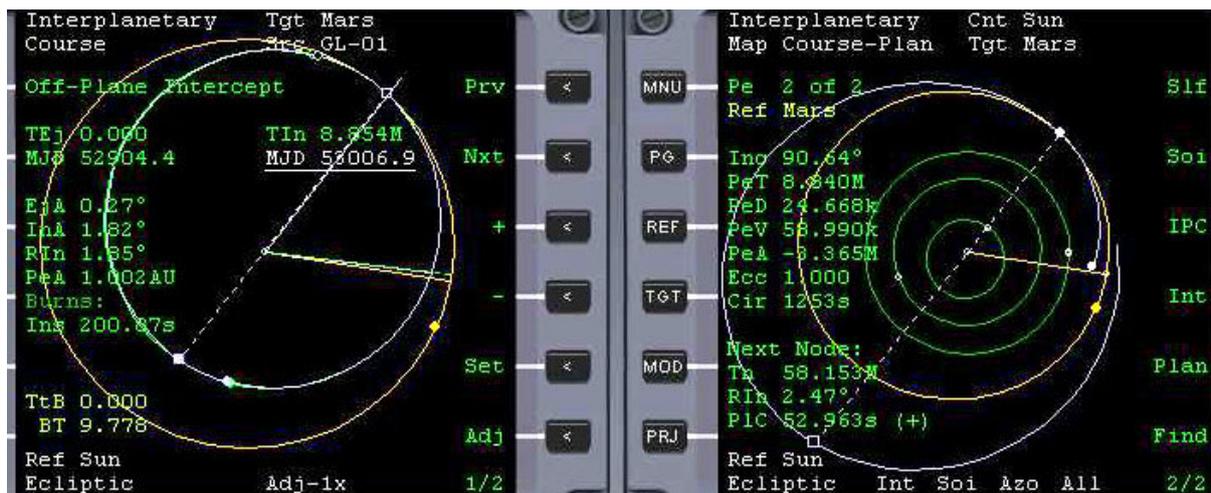


Qu'allons nous corriger ?

On constate que PeA est négatif donc nous sommes en plein sur l'objectif et de ce côté-là, pas de souci à se faire. En continuant comme ça nous ferons un gros trou dans la planète ! Nous corrigerons PeA en approche.

Par contre MJD = 53046,9 et si on compare à notre date de départ MJD = 52799,9 cela veut dire que notre voyage dans ces conditions serait de $53046,9 - 52799,9 = 247$ jours au lieu de 207 jours prévus MJD pour l'insertion devrait valoir $52799,9 + 207 = 53006,9$

Nous allons donc sélectionner MJD sur Target Intercept avec Prv/Nxt puis faire Set et entrer 53006.9 puis passer en AutoBurn. L'allumage dure environ 20s mais nous gagnons 47 jours !



Nota

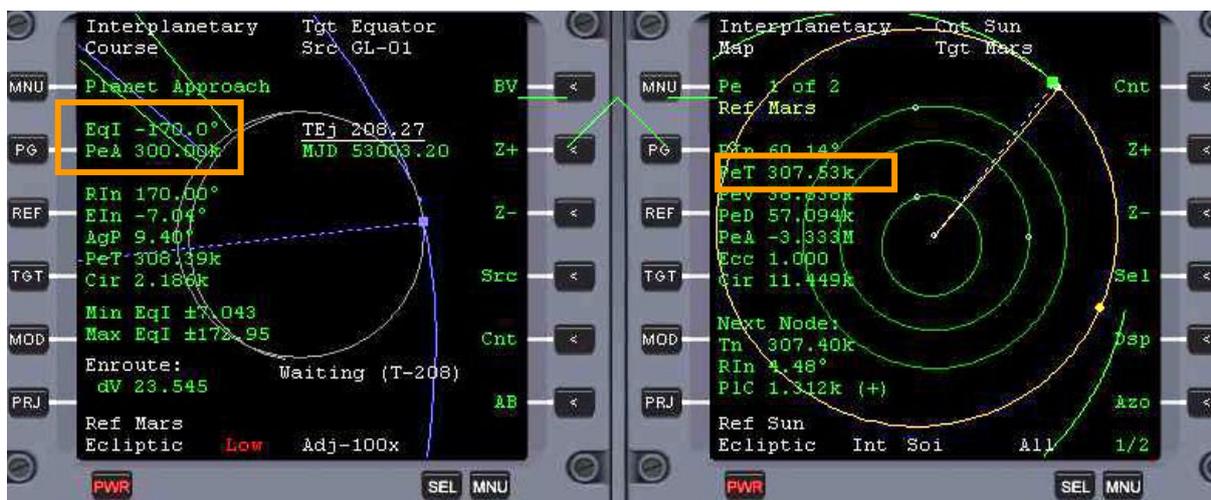
On peut également entrer directement une date d'arrivée dans MJD sous la forme jj.mm.aaaa. Par exemple dans notre cas on pourrait vouloir arriver le jour de Noël 2003 au lieu du 2 janvier 2004 (53006,9) et il suffit d'entrer 25.12.2003 pour MJD. La correction nous cote environ 20 s de plus d'allumage mais nous gagnerions 8 jours de voyage et quelle joie de réveiller autour de Mars !

5.2.2 - Corrections en approche

Quand **PeT** arrive vers 300k on entre dans la zone d'influence de Mars et on va pouvoir faire les corrections finales.

Sur le MFD de gauche il faut ouvrir le module Planet-Approach:

- **Prv** ou **Nxt** pour sélectionner le nom du module en haut à gauche
- **+** pour aller au menu Course
- **Prv** ou **Nxt** pour sélectionner **Planet Approach** et faire **Set**
- **Vérifier en bas à gauche du module que la référence est bien Mars sinon faire REF et la rentrer.**



- Sélectionner **EqI** et rentrer l'inclinaison équatoriale de l'orbite que l'on souhaite dans les limites Min et Max possibles (prenons par exemple 170° qui nous donne une orbite rétrograde inclinée de 10° par rapport au plan équatorial)
- Sélectionner **PeA** et rentrer l'altitude d'approche désirée (par exemple 300k)
- **PG** pour page 2 puis passer en allumage auto par **AB** pour l'allumage

Nota : Pour améliorer la précision de l'allumage qui est court, il est bon de sélectionner **TEj** et de l'augmenter jusqu'à 200s. Ainsi, en passant en Auto Burn ensuite, le vaisseau se positionne à T-180 et il a le temps de se stabiliser avant l'allumage

5.3 – Mise en orbite

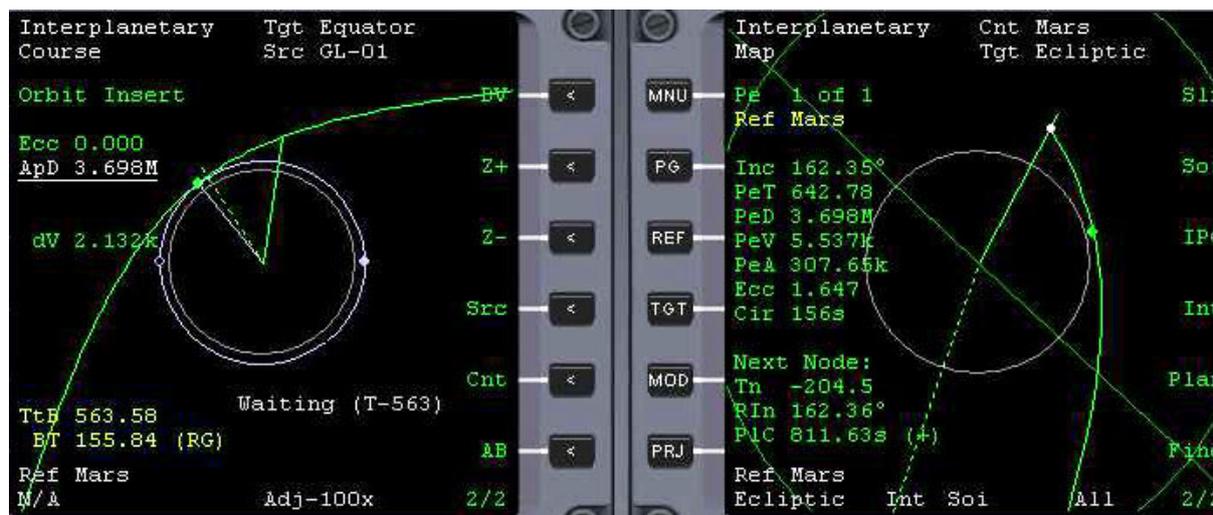
On peut opérer comme on l'a fait pour la Lune et il n'y a pas de problème.
Il est bon d'attendre que PeT lu sur Map soit de l'ordre de 1.000k pour ouvrir le module.

Prv ou Nxt, pour sélectionner le nom du module sur Planète Approach et faire + pour entrer dans le menu Course.

Prv ou Nxt, pour sélectionner le sous module **Orbit Insert**

Vérifier que la référence est Mars et la changer si il le faut (si l'on est trop loin de Mars quand on ouvre le MFD, la référence est Deimos car on est près de celle-ci)

PG pour page 2 puis passer en AB et patienter la mise en orbite se fait automatiquement



On peut sélectionner et régler l'Excentricité ou augmenter éventuellement ApD dans la limite réalisable.

L'altitude peut varier un petit peu

Voilà le voyage est fini, j'espère qu'il ne vous a pas paru trop long ? Mars est superbe...

Le scénario

08 – En orbite martienne

vous place à 300 km d'altitude environ le 2 janvier 2004 comme prévu à peu de choses près (MJD = 53006.75) Vous pourrez essayer de vous poser

En résumé, pour utiliser Orbit-Eject il faut (utilisation directe pour régler la trajectoire)

- Ouvrir Orbit-Eject sur un MFD
- Mettre Orbit-Eject en mode Lower Orbit si on va vers une planète qui à une orbite plus petite que celle ou on se trouve ou pour revenir d'un satellite vers sa planète mère
- Mettre Orbit-Eject en mode Higher Orbit si on va vers une planète qui à une orbite plus grande que celle ou on se trouve
- Ouvrir Map sur l'autre MFD en le couplant par le mode Op-Shared et sélectionner l'objectif, le mode intersection Int et le mode Plan
- Réduire la valeur de l'altitude PeA au périégée de l'objectif lue sur Map comme suit:
 - régler la valeur de TEj pour régler la position du point d'éjection
 - régler la valeur de oV pour que l'orbite calculée soit tangente à l'orbite de l'objectif
 - ajuster finement TEj et oV pour avoir PeA le plus petit possible avec un temps ABT
 - Vérifier que l'orbite d'éjection ne risque pas de rentrer dans l'atmosphère éventuelle ou de percuter la planète sinon corriger TEj

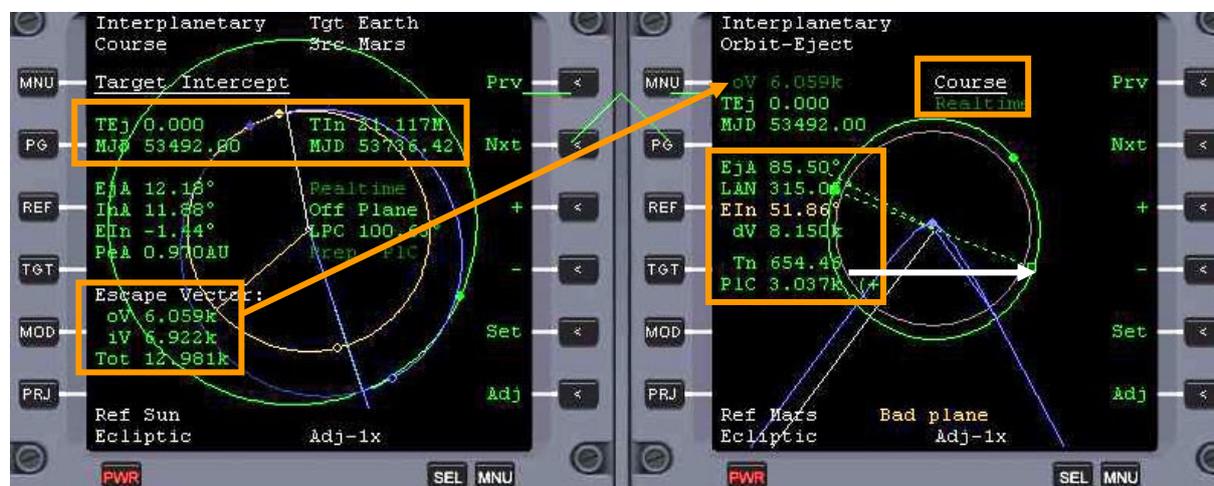
6 – DE MARS A LA TERRE

La fenêtre favorable pour le retour se situe au tout début de mai 2005 avec arrivée en janvier 2006

Comme il serait long d'attendre le départ nous allons utiliser le scénario
09 – Retour de Mars vers la Terre
 Il nous place en orbite martienne le 2 mai 2005

Pour le retour nous allons utiliser une méthode un peu différente de celle de l'aller mais qui nous permettra de montrer toutes les possibilités de IMFD. Je simplifie, vous devez maintenant connaître les manœuvres !

- Sur le MFD de gauche ouvrir Target Intercept en mode Off-Plane avec comme objectif Earth
- Sur le MFD de droite, ouvrir Orbit-eject en mode Op-Shared sur 0 (couplé à Course)
 Passer en mode Course puisque nous voulons nous coupler au module du programme Course.



Que voyons nous sur les MFD ?

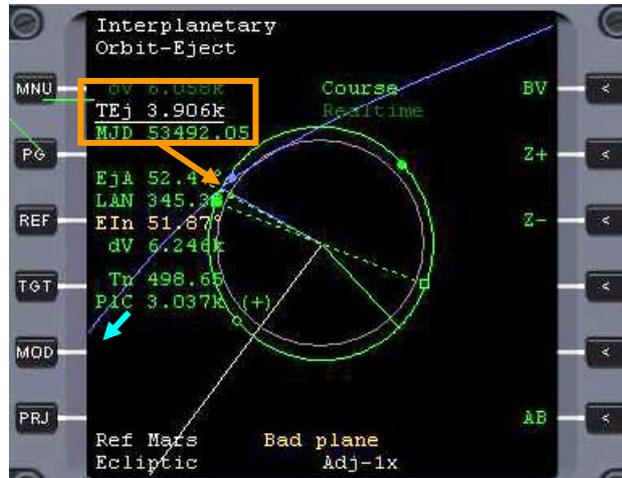
Arrivée prévue à MJD 53736.4 donnant 244 jours de voyage avec un vecteur d'échappement

$\Delta v = 6.059k$ qui s'est transmis à Orbit-Eject (non éclairé car non modifiable en raison du couplage)
 Ein est grand mais il va tendre vers 0 à l'allumage car le vecteur est piloté pour amener dans le plan de la cible.

- **Sélectionner TEj et l'augmenter** pour placer le point d'éjection au bout du rayon pointillé vert

La courbe d'éjection en bleu coupe la planète sur la partie droite mais il n'y a pas de danger car nous sommes éjecté sur la partie gauche de la trajectoire (flèche bleue) qui ne coupe rien (on tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre sur le graphique)

Avec BV on peut voir que le temps ABT d'allumage est inférieur à 382 s

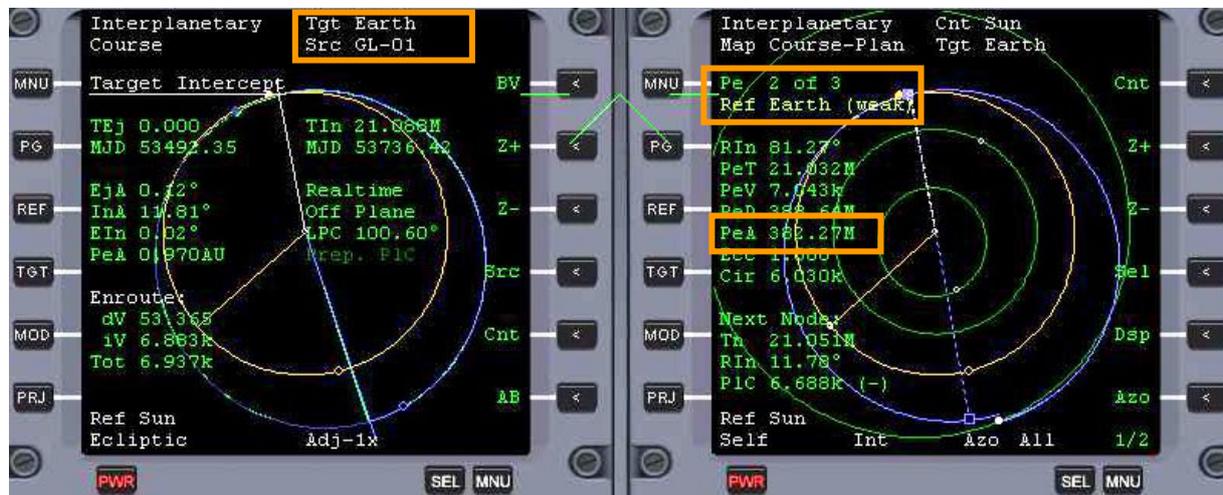


- **Faire l'allumage automatique avec AB.**

Une fois l'allumage terminé, accélérer le temps

Quand le MFD de droite affiche 'Have a nice voyage !' le vaisseau échappe à la SOI de Mars qui était jusque là considérée comme la source. A ce moment il faut prendre le vaisseau comme source car c'est lui qui est prépondérant pour la trajectoire

- **Sur le MFD Course passer en page 2 avec PG sélectionner Src et entrer X pour que le vaisseau soit la source (on peut aussi entrer son nom, ici GL-01)**
- **Passer le MFD droit en Map avec comme objectif Earth et sélectionner les options DsP, SOI, Int et Plan. Sélectionner Pe 2 of 3 qui correspond au Periapsis de Earth**

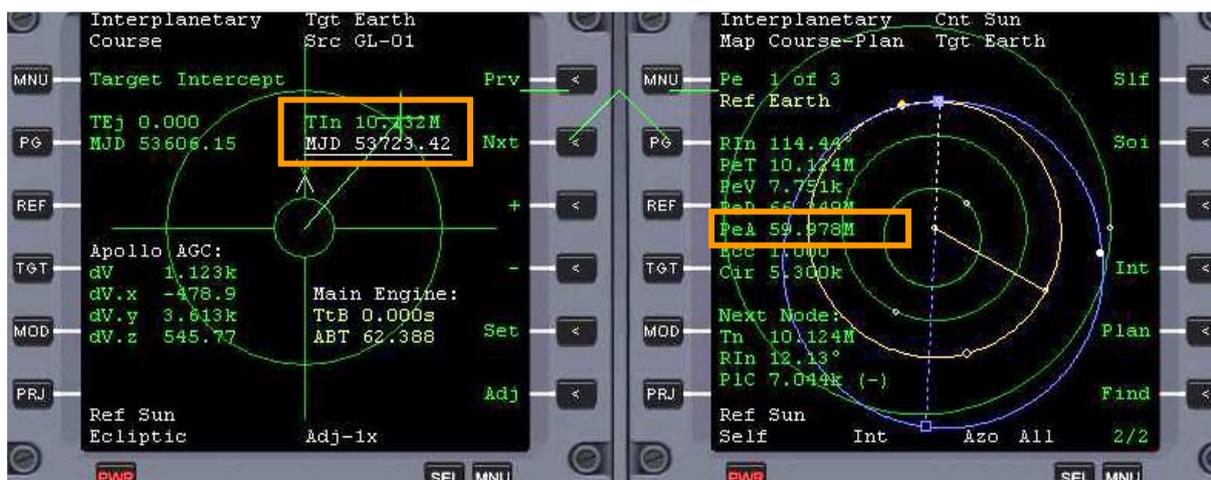


Voilà une bonne solution avec un $PeA = 382.27M = 382270$ km. Ceci paraît beaucoup mais c'est une excellente précision qui est la distance Terre-Lune et nous corrigeront en route comme à l'aller
 Temps prévu de parcours = 21032000 s soit 244 jours environ. Comme à l'aller, nous réduisons au moment des corrections si nous le désirons

Corrections

On peut corriger à mi-course comme à l'aller.

Quand PeT est de l'ordre de 10M on peut agir sur TIn pour réduire PeA tout en s'assurant par BV que le temps ABT est raisonnable en fonction du carburant restant.



Faire varier le temps MJD sur Target Intercept pour réduire PeA lu sur Map à la valeur minimum. On arrive à PeA = 59M (15% de la distance Terre-Lune) avec un BT raisonnable de moins de 63 s. La date prévisionnelle d'arrivée est réduite de 13 jours ce qui nous donne un total de 231 jours de voyage.

OK ? on allume ! Ne pas oublier de passer le MFD Map en mode normal (supprimer Plan) pour voir évoluer PeA prévu

Il est bon de refaire une correction quand PeT est de l'ordre de 1.000M pour diminuer encore PeA ce qui nous fera gagner du carburant pour la correction finale.



En faisant varier TIn on peut amener PeA à 1.849 M avec moins de 10 s de combustion.

Ceci nous permettra une approche finale économique et nous fait gagner 1/3 de jour. Remarquons que la vitesse prévue au Periapsis est PeV = 12.142k (plus de 12 km/s) et il faudra un bon coup de frein pour la mise en orbite !

Ensuite il suffit de continuer le voyage et de faire comme à l'aller des petites corrections avec **Planet Approach** pour ajuster EqI et PeA aux valeurs souhaitées quand PeT atteint environ 300k et 1k

Pour finir utiliser le module **Orbit-Insert** et c'est gagné !

Nous sommes parti de Mars avec 74% de carburant et il nous reste 25 % à l'arrivée.

Le trajet a duré moins de 213 jours et nous avons été rapides !

7 – DE IO A EUROPA

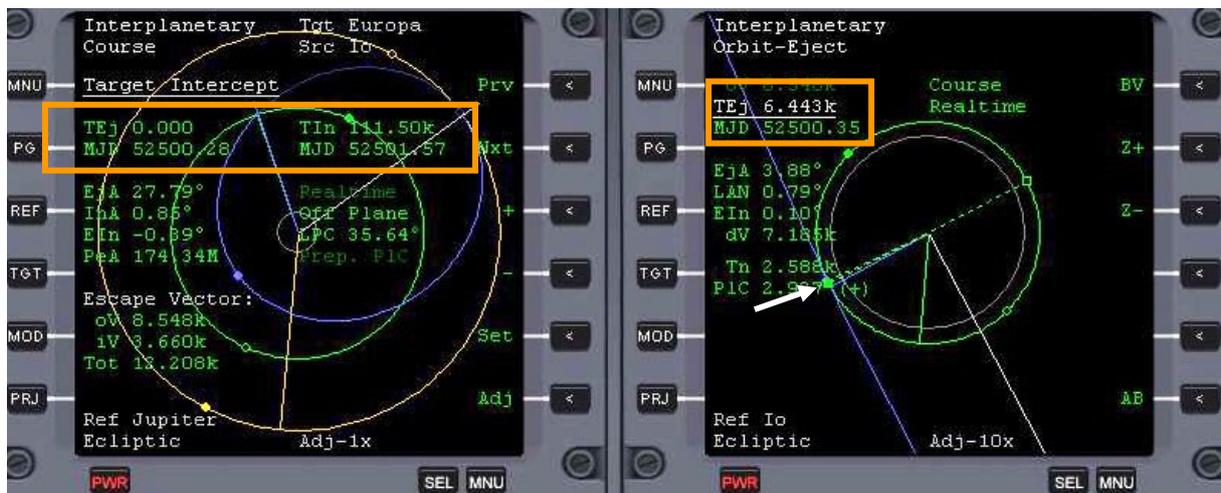
Charger le scénario 11 – De Io à Europa.scn

Nous allons utiliser le module **Orbit-Eject couplé en mode Op-Mode Shared** comme nous l'avons déjà fait au module **Target Intercept en mode Off-Plane** pour trouver la solution de tir.

Definir Europa comme Objectif sur Target Intercept

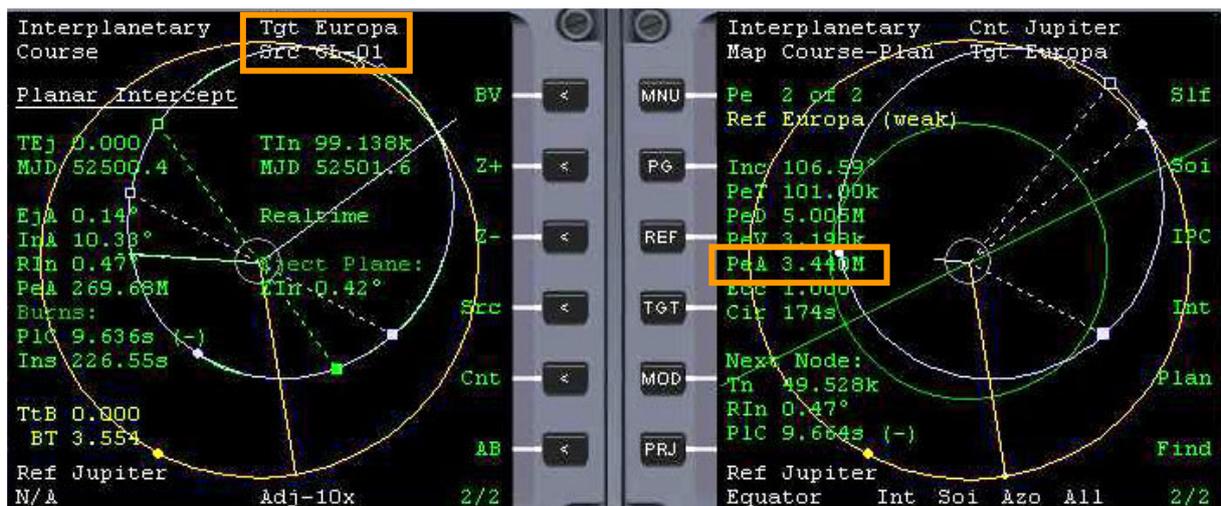
Target-Intercept nous donne une solution en $TIn - Tej = 111500$ s soit 1.3 jours avec un temps de combustion acceptable de 500 s

$EIn = 0.88^\circ$ est petit et nous ne ferons pas de correction de plan comme nous l'avons fait avant. Il suffit de régler TEj pour que le point d'éjection soit bien placé (flèche blanche)



Il ne reste plus qu'à passer en AutoBurn et à attendre l'allumage.
On peut accélérer jusqu'à 1000X avant l'allumage
Dépense en carburant 29%

Sur le MFD de droite, remplacer Orbit-Eject par Map



Sur **Planar Intercept** sélectionner **X** pour la source ce qui nous fixe sur GL-01 car avant le départ c'est la planète qui est assimilée au vaisseau

Maintenant que l'allumage a été fait, il est important que la source soit le vaisseau sinon le module Map affiche "Invalid Burn Data" en mode Plan

Sur **Map** prendre Europa comme référence et sélectionner les options Disp, Int, et Pe 3 of 3 Ref Europa (projection Periapsis en utilisant Sel)

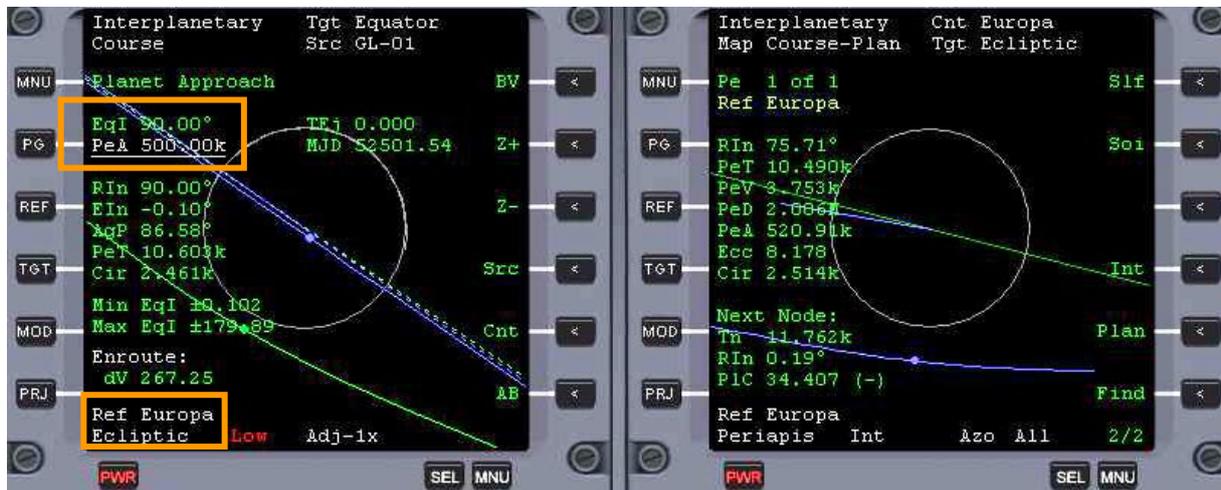
On peut voir sur Map que l'altitude prévue au periapsis est $PeA = 3.041M$ ce qui n'est pas trop



Nous pouvons continuer le voyage sans essayer de correction supplémentaire en route.

Attendons d'être assez près pour faire une correction d'approche quand PeT sur Map $< 10k$. Plus on est près plus la correction est précise mais plus grande est la dépense en carburant. On peut éventuellement faire une première correction assez loin vers 30k par exemple puis une à 5k.

Sur le MFD à gauche, ouvrir **Planet Approach**
Sur le MFD de droite se mettre en **mode Map**



Notre altitude prévue au tgt près est toujours de plus de 2M (22100 km) et nous allons la réduire à 500k pour mieux voir.

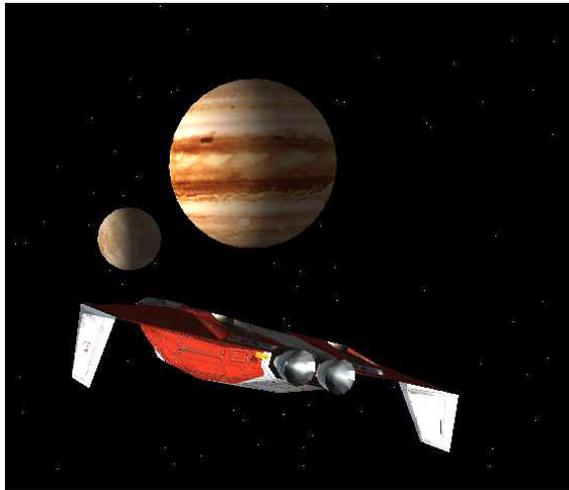
Pour nous amuser nous allons choisir une inclinaison de 90° de notre orbite sur le plan équatorial de Europa. Ceci nous permettra de nous insérer en orbite circumpolaire pour favoriser nos observations. Il n'y a plus qu'à faire Auto Burn pour la correction ce qui allumera pour 18 s environ et nous coûtera 1,1% de carburant.

Au Periapsis il suffit de vous circulariser par la méthode qui vous plaira le plus en utilisant le sous-module Orbit- Insert du module Course, le module Orbital, ou le MFD Orbit standard. Le temps de combustion de l'ordre de 156 s nous consomme 9,7 % de carburant.

Attention ! Si on utilise le module Orbit-Insert, on ne peut prendre Europa comme référence que si on est assez près de celle-ci (PeT <700k) sinon c'est Jupiter qui est prépondérant en influence et c'est sur lui qu'on circulariserait.

Quand le module Orbit Insert affiche en jaune le texte "Invalid source or reference...Auto configure with (TGT)" c'est que l'on est entré dans la zone d'influence d'Europa.

Faire TGT et entrer Europa comme objectif puis passer en allumage automatique par AB en passant en page 2 par PG



En approche d'Europa à T- 5k



En orbite autour d'Europa

Le voyage est réussi ! Nous n'avons même pas eu besoin de correction en route.
Nous tournons à 500k d'altitude et nous avons utilisé 40% du carburant.
Vous pourrez faire le voyage de retour.

A retenir

Faire attention à bien sélectionner la source dans le mode Target Intercept
Pour aller d'une planète à une autre, la source doit être la planète de départ tant que le vaisseau est dans sa sphère d'influence SOI de celle-ci

Quand on a quitté la sphère d'influence SOI de la planète de départ, il faut sélectionner le vaisseau comme source en le désignant par X ou par son nom dans le choix fait par Src

Pour ne pas avoir l'affichage intempestif, il vaut mieux passer le module Map en mode normal (mode Plan désélectionné) pendant l'allumage

Le module Orbit-Insert autour d'une planète est opérationnel seulement quand le vaisseau est entré dans sa sphère d'influence SOI

Faire attention à bien sélectionner la planète de référence autour de laquelle on veut orbiter. Il se peut que l'on ait comme référence en ouvrant le module prématurément, la planète dont l'influence est prépondérante comme le soleil par exemple et l'erreur est catastrophique !

8 – DE LA TERRE A VENUS ET RETOUR

Maintenant, un petit voyage vers une planète inférieure dont l'orbite est plus proche du soleil que la notre. Il faut choisir une bonne fenêtre de tir ou il va faire chaud près du soleil !

Nous allons constater qu'il est un peu plus délicat de naviguer à proximité du soleil et d'atteindre ce type de planète dont la vitesse sur orbite est élevée et qu'il faut dépenser pas mal de carburant

Le scénario
12 – De la Terre à Venus.scn
vous place le 15 octobre 2005 à 0h

On peut utiliser directement Orbit-Eject pour calculer la trajectoire. Mercure a une orbite plus basse que la notre et pour échapper à l'attraction de la Terre on prendrait **Orbit-Eject en mode Lower Orbit couplé en mod Op-mode Shared avec Map**

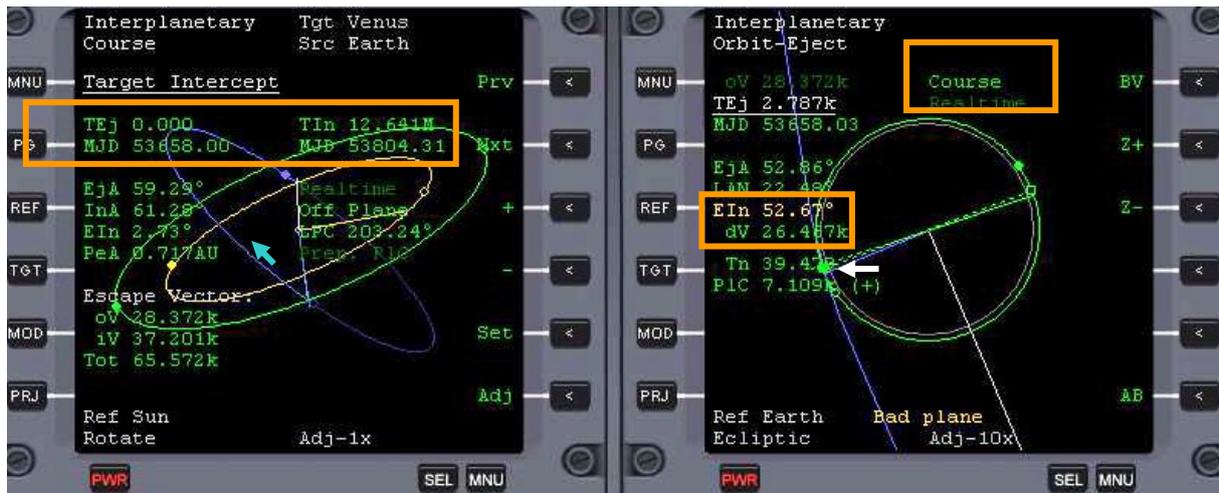
Nous allons utiliser une autre méthode pour trouver plus facilement la solution optimale

- **Ouvrir Target Intercept** avec Venus comme objectif
- **Ouvrir Orbit Eject** sans oublier de coupler en Op mode Shared et choisir le mode Course pour le lier à Target Intercept
- **Régler TEj** pour placer correctement le point d'éjection

Target Intercept nous donne la valeur de $\Delta v = 28.372k$ (augmentation de vitesse nécessaire à l'éjection) et la communique à Orbit-Eject. Cette valeur correspond à un temps de combustion de 1482 secondes qui est prohibitif (faire BV dans Orbit-Eject pour le voir)

Si on fait tourner Target Intercept en mode Rotate on voit que la trajectoire en bleu (flèche bleue) est très en dehors du plan orbital. EIn sur Orbit Eject est très important et nécessiterait trop de carburant pour être réduit.

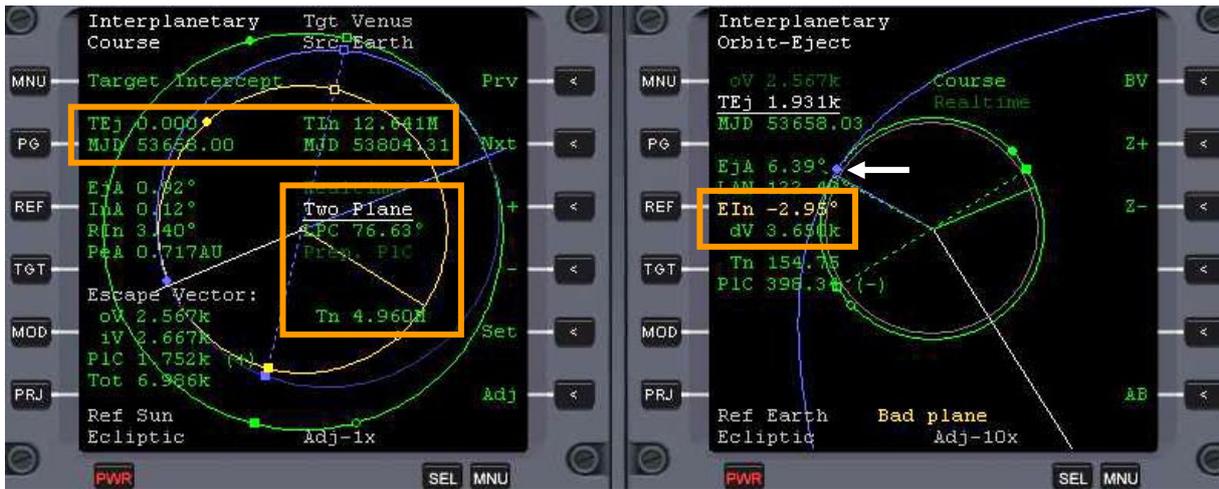
L'arrivée est prévue à $MJD = 53804.3$ ce qui donne un temps de voyage estimé égal à $MJD(TIn) - MJD(TEj) = 146,3$ jours soit un peu moins que 5 mois ce qui est normal



On peut voir que cette solution n'est pas intéressante vu le temps de combustion. Elle nous fait également arriver en trajectoire presque polaire.

Il vaut mieux adopter une solution **Two Plane** qui nous placera dans le plan de l'objectif en deuxième partie du voyage et sera plus économique puisque nous allons suivre successivement le plan orbital de la Terre puis celui de Venus.

Sélectionner Off Plane dans Target Intercept et utiliser + pour afficher Two Plane



On atteindra le point nodal de changement de plan à $T_n = 4.960M$ un peu avant la moitié du voyage.

Se mettre en AutoBurn sur Orbit-Eject et attendre l'allumage qui va se produire à 1931 s pour une durée BT = 266 s (on peut accélérer à 1000X sans problème jusqu'à l'allumage)

Quand Orbit-Eject affiche "Have a nice voyage" nous sortons de la zone d'influence de la Terre. Il faut alors prendre le vaisseau comme source sur le module Target Intercept (sélectionner Src dans la page 2 et entrer X)

Remplacer Orbit-Eject par Map en prenant Venus comme objectif. Faire Int, Disp et sélectionner Pe 2 of 3 Ref Venus si ce n'est pas le cas.



Nous pouvons constater que la distance PeA prévue pour le Periapsis est importante et qu'une correction va s'imposer pour pouvoir réaliser une bonne approche.

Nous allons corriger au prochain nœud donné par Target Intercept ou Map pour nous placer dans le plan Orbital de Venus. Il se situe à $T_n = 4.878M$.

Pour avoir le deuxième allumage automatique il faut:

- Sélectionner **Prep. Pic** puis appuyer sur + pour valider
- Passer sur **AB** en page 2

Le temps jusqu'au prochain nœud ou se situera l'affichage est affiché et il n'y a plus qu'à accélérer le temps au maximum pour atteindre ce point et avoir un allumage automatique de 120s.

La distance PeA lue sur Map est réduite à 5.575M ce qui est très bien.



Nous ferons une autre correction en approche quand PeT sur Map est de l'ordre de 500k et nous sommes dans la sphère d'influence de Venus

- Ouvrir **Planet Approach** avec Ref Venus
- Régler PeA à 1M pour ne pas être trop près de Venus qui nous éblouirait.
- Conserver EqI qui nous donne une insertion rétrograde (pourquoi pas ?)
- Allumer en AutoBurn sur Planet Approach (combustion de moins de 6 s comme on peut voir avec BV)

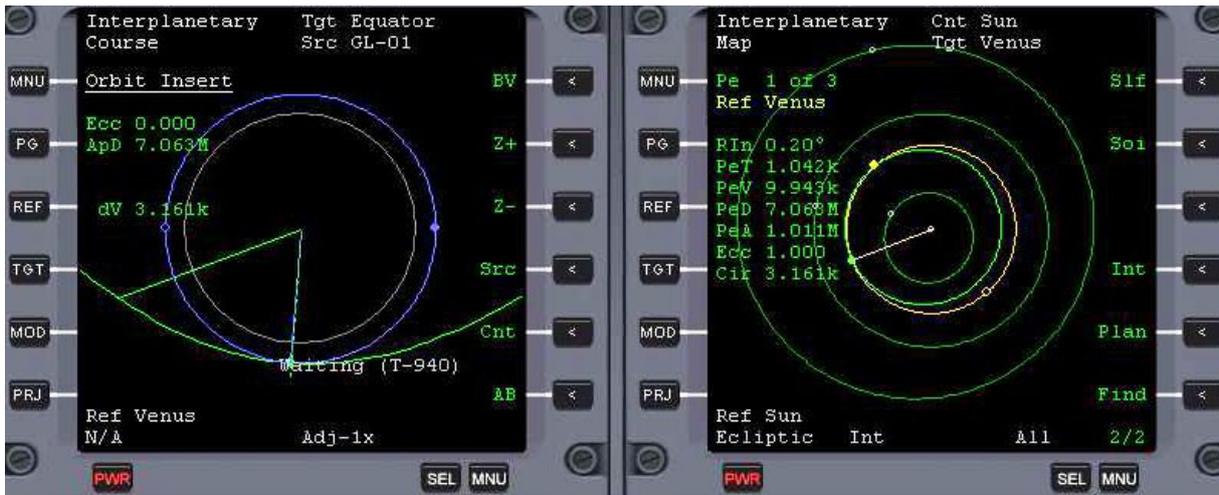
Après cette correction, il n'y a plus qu'à continuer notre route.

Comme le soleil est un élément très perturbateur il convient de faire une deuxième correction avec Planet Approach lorsque PeT atteint 50k sur Map. (on peut modifier EqI et PeA si on le désire)



Arrivée prévue à MJD = 53803.07. Nous avons gagné un peu plus d'un jour.

Nous sommes presque arrivés. Pour la mise en orbite nous utiliserons Orbit-Insert en allumage automatique. Ne le sélectionner que quand PeT est inférieur à 900k sinon il ne donne rien. L'allumage dure environ 202 s



Voyage terminé en 145 jours (arrivée à MJD = 53803.6 le 9 Mars 2006 à 14h40 TU). Il y a une très belle vue avec le soleil. Malheureusement Orbiter ne le fait pas grossir quand on se rapproche ! Il nous reste 62 % du carburant.

**Vous pourrez faire le retour en partant du scénario
12 – De Venus à la Terre
qui vous place avec le même vaisseau le 14 novembre 2005 qui est une bonne fenêtre**

Le retour

Attention à ne pas gaspiller le carburant ! Le retour avec mise en orbite à 500k par exemple est faisable avec plus de 10% de carburant restant pour déorbiter et atterrir. On pourrait calculer comme pour l'aller mais pour nous entrainer à une autre technique, nous allons utiliser une solution calculée directement **avec Orbit-Eject en mode Higher orbit** (puisque l'on "remonte" vers une planète extérieure) couplé en **Op-Shared** au module **Map**

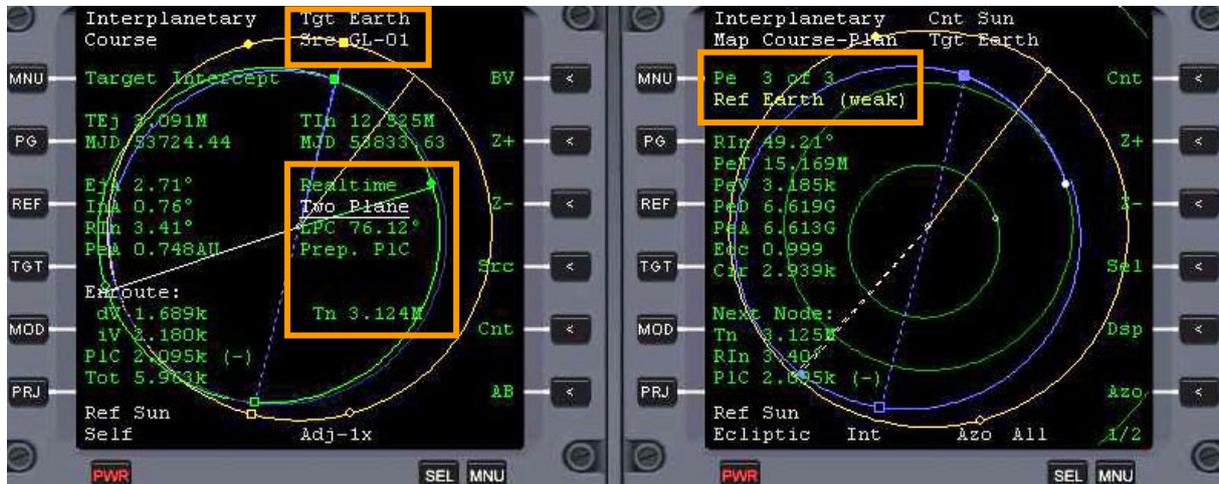


- Sur **Map** faire **TGT** et entrer **Earth** puis faire **Dsp** puis **Sel** pour afficher Pe3 of 3 Ref Earth puis **PG** pour changer de page et faire **Int** et **Plan** pour se coupler
- Sur **Orbit-Eject** faire varier **oV** pour réduire **PeA** sur **Map** au minimum puis faire varier **TEj** pour ajuster le point d'éjection comme nous l'avons déjà vu
- Passer en allumage auto par **AB**. Allumage d'environ 327 s

PeA à une valeur élevée d'environ 8G (24 fois la distance Terre-Lune) mais ce n'est pas grave, nous corrigerons en route.

Après l'allumage accélérer le temps et attendre qu'Orbit-Eject affiche "Have a nice voyage" pour nous signaler que nous sommes sorti de la SOI de Venus et **remplacer Orbit-Eject par Target Intercept**

- Passer en mode **Two Plane** pour avoir une trajectoire économique dans les plans orbitaux. Il faudra faire un changement de plan PIC à $T_n = 3.124M$
- Préparer le changement en sélectionnant **Prep. PIC** et en faisant + pour valider
- Passer en allumage auto par **AB**



Il n'y a plus qu'à attendre ! L'allumage prend environ 100 s et PeA se réduit à moins de 100M

En fait à partir de là il n'y a qu'à continuer à avancer. Ensuite il faut passer en Planet Approach et faire une correction de PeA vers PeT = 300k puis une finale éventuellement vers 10k pour la précision.

Pour finir, une mise en orbite avec Orbit Insert et nous voilà en orbite le 7 avril 2006 vers 5 h 30. Il reste 23,8 % de carburant. Le voyage a duré 144 jours environ. C'est la classe et c'est économique !

A retenir

Si on tire vers une planète ayant une orbite plus près du soleil que celle de la source il faut utiliser Orbit Eject en mode Lower Orbit

Si on tire vers une planète ayant une orbite plus éloignée du soleil que celle de la source il faut utiliser Orbit Eject en mode Higher Orbit

En mettant Target Intercept en mode Two Plane puis en validant Prep. PIC en faisant + , on peut préparer un allumage automatique au nœud commun des plans orbitaux en passant sur AB. Ceci permet une approche précise et économique de la planète de destination

9 - DE LA TERRE A MERCURE

Un départ le 14 janvier 2005 (MJD = 53384) est favorable avec une arrivée prévue vers le 23 avril 2005 (MJD = 53488) soit 104 jours.

Le scénario

13 – Départ pour Mercure.scn
vous place le 14 janvier 2005 à 0h

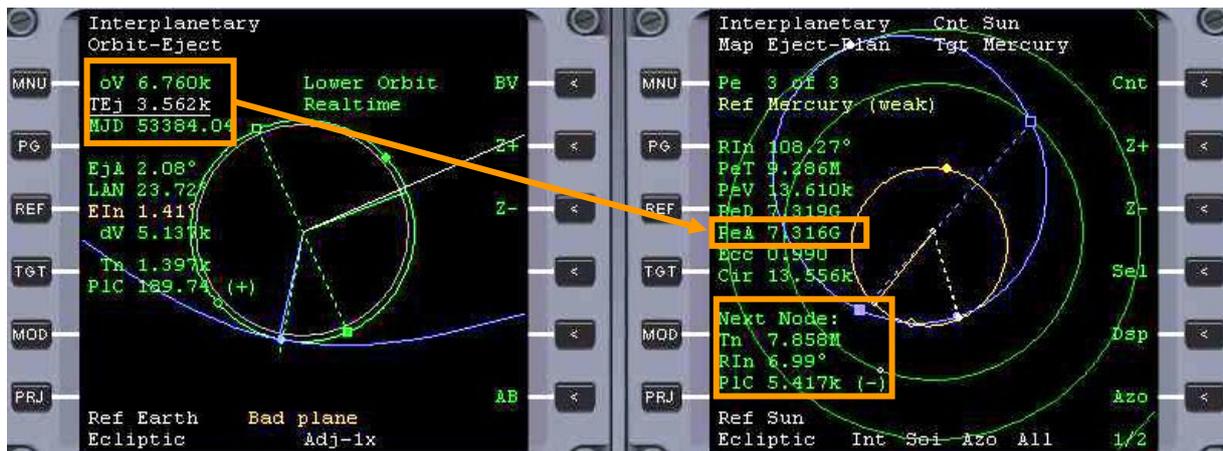
Nous allons utiliser Target Intercept pour calculer la trajectoire pour nous entrainer. Mercure a une orbite plus basse que la notre et pour échapper à l'attraction de la Terre nous utiliserons **Orbit-Eject en mode Lower Orbit** couplé en mod Op-mode Shared avec **Map**

Sur le module Map désigner l'objectif → TGT puis entrer Mercury et choisir Dsp, Int et Plan pour suivre l'influence des réglages faits sur Orbit-Eject

- Augmenter Δv en surveillant PeA pour réduire celui-ci le plus possible.
- Augmenter TEj pour faire coïncider le point d'éjection avec le rayon vert pointillé

Et l'on a la solution de tir ci-dessous.

C'est cette solution qui nous serait proposée d'entrée par Target Intercept si nous procédions comme pour le trajet Io-Europa, ce qui nous montre bien que ce module optimise.



Passer en Auto Burn et attendre l'allumage qui va durer 369 s

Il nous reste 76% de carburant. Il faut faire attention pour la suite !

- Passer sur Target Intercept avec GL-01 comme source (comme pour les exemples précédents) et se placer en mode Two Plane pour préparer le changement de plan à $Tn = 4.119M$ (figure ci après)
- Passer Map en TGT → Mercury et faire Dsp, Int et Plan pour voir ce qui se passera

La consommation est critique car la mise en orbite va être onéreuse en carburant vue la vitesse à l'arrivée sur Mercure en raison du voisinage du soleil.

Il est donc nécessaire de se placer dans le plan de la planète pour consommer le moins possible pour se circulariser.

- Sélectionner **Prep.PIC** puis faire + pour valider
- **AB** pour passer en allumage automatique

Il n'y a plus qu'à accélérer le temps jusqu'à l'allumage qui durera 384 s environ.

Il restera 52 % du carburant !



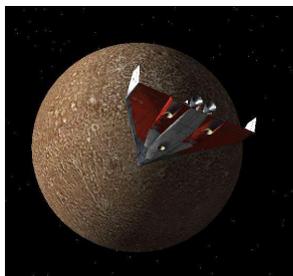
Nous ferons deux corrections avec Planet Approach comme nous l'avons déjà fait.
Le soleil ayant une forte influence on peut corriger assez près vers 100k et 10k pour une meilleure précision à la mise en orbite.

On gardera EqI et on réglera PeA à 500k par exemple pour s'insérer en orbite assez basse. La vitesse pour satelliser étant d'autant plus élevée que l'orbite est basse, nous économiserons du carburant pour ralentir et nous mettre en orbite.
Exemple pour la correction à 100k



Les deux corrections consomment peu car nous sommes bien placé dans le plan de l'orbite. Le total des deux allumages dure moins de 25 s et il nous reste un peu plus de 50 % du carburant.

Pour finir, il faut faire la mise en orbite avec Orbit-Insert. Comme nous arrivons vite (plus de 12km/s), il faudra allumer pendant un peu moins de 485 s.



Nous sommes en orbite le 8 mai 2005 et il nous reste un peu plus de 20% du carburant...
Si nous ne trouvons pas de pompe le retour est impossible.

Nous avons mis 112 jours au lieu de 104 jours pour économiser le carburant.

Une petite image de Mercure pour finir. Je vous attends en orbite !
Amenez quelques bidon de fuel

10 – UTILISATION DE SLING-SHOT

C'est "l'effet de fronde" On se sert de l'attraction et de la vitesse d'une planète intermédiaire pour modifier la trajectoire du vaisseau et l'envoyer vers une autre planète en dépensant moins de carburant.

Il est assez difficile d'utiliser cet effet car il faut que les positions des planètes soient favorables pour obtenir le résultat escompté.

Je vous donne ici la façon de l'utiliser avec comme exemple se servir de Jupiter pour atteindre Saturne.

J'ai utilisé pour cet exemple le tutorial de FlyBoy (merci à lui) que vous pouvez télécharger sur le site de Jarmo Nikkanen. Il part de la situation réelle de Voyager 2

Le scénario

15 – Slingshot Jupiter-Saturn.scn

vous place dans la position convenable d'approche de Jupiter le 15 avril 1979

Phase 1 – Correction de l'approche de la planète intermédiaire

Comme nous sommes sur une orbite héliocentrique, la première chose à faire est d'attendre d'être assez près de Jupiter pour que son attraction commence à se faire sentir à 20%.

- Ouvrir à droite le MFD Orbit standard et prendre Jupiter comme référence.
- Ouvrir sur le MFD de gauche le module Planet Approach et prendre Jupiter comme référence (vous aurez sûrement Sun à l'ouverture)
- Sur le MFD Orbit, faire avancer le temps jusqu'à ce que G=0.20 (si on change la référence par Sun on peut voir que G=0.8 ce qui est normal puisque l'influence du soleil est encore prépondérante à 20 %)



Maintenant, il faut ouvrir le module **Map** en Op-Mode Shared (couplé sur le MFD Planet Approach) sur le MFD de droite, en **prenant comme objectif (TGT) Saturn** qui est notre destination finale après le slingshot



Afficher les orbites avec Dsp, faire Int et s'assurer que la référence du Periapsis est bien celle de Saturne

Nous voyons trois choses importantes sur Map (voir ci-dessus)

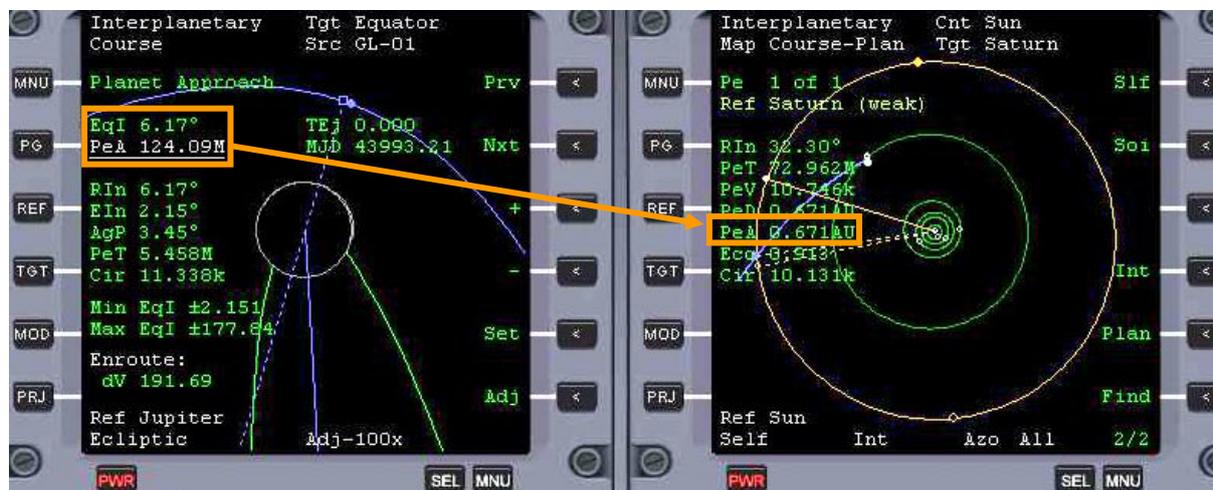
- La trajectoire que nous avons actuellement (voir flèche verte)
- Le point où se trouve Saturne en ce moment au bout du rayon jaune plein (voir flèche jaune)
- Le point où se trouvera Saturne au bout du rayon jaune pointillé (voir flèche blanche) quand nous couperions son orbite

PeA = 1.865AU (AU = distance moyenne Terre – Soleil =150 millions de km) et sur cette trajectoire, nous passerions bien loin de Saturne

La première chose à faire est de corriger l'approche sur Jupiter pour se rapprocher de Saturne.

- Passer Map en mode Plan

- Changer EqI pour avoir une insertion Prograde sur Jupiter (pour bénéficier de sa vitesse sur orbite en se faisant entraîner par elle pour accélérer)
On prendra $6^{\circ}17'$ pour se conformer à la valeur pour Voyager ce qui est possible puisque $\text{Min} = 2.51^{\circ}$. Toute autre valeur entre 0 et 90° peut être prise (sens prograde)
- Faire varier PeA pour diminuer le plus possible la distance **PeA lue sur Map**



On obtient quelque chose comme ce qui est représenté ci-dessus. Il faut faire des ajustements progressifs sur PeA en faisant varier le coefficient multiplicateur Adj. On peut après un premier réglage de PeA faire varier EqI pour affiner.

De toute façon il est inutile de tenter l'impossible à ce stade et une valeur de PeA sur Map inférieure à 1AU est déjà suffisante.

Il ne reste plus qu'à faire l'AutoBurn AB sur Planet approach pour moins de 13 s en suivant l'évolution de la trajectoire sur Map que l'on repasse avant en mode normal (supprimer Plan) et la première correction est faite.

Phase 2 – Passage de oV à SlingShot

Rouvrir le MFD Orbit standard à droite et avec Jupiter comme référence faire avancer le temps jusqu'à ce que $G = 0.5$ soit affiché en jaune. Ceci montre que nous sommes entré dans la zone où l'influence de Jupiter devient prioritaire sur celle du soleil.

Si on change la référence Jupiter par Sun on voit $G = 0.5$ affiché en rouge ce qui le montre bien que l'influence du soleil n'est plus prioritaire.

- Ouvrir à gauche le module **Course – Target Intercept** avec **Saturn** comme objectif
- Ouvrir à droite le module **Sling Shot en mode Op-Shared** et en choisissant Course pour la transmission de données

Nous voulons savoir quel est le vecteur d'échappement oV qu'il va nous falloir pour rejoindre Saturne avec les conditions de la trajectoire que nous venons de rectifier.

Nous choisissons un calcul avec Target Intercept en mode Off-Plane car les plans ne sont sûrement pas alignés



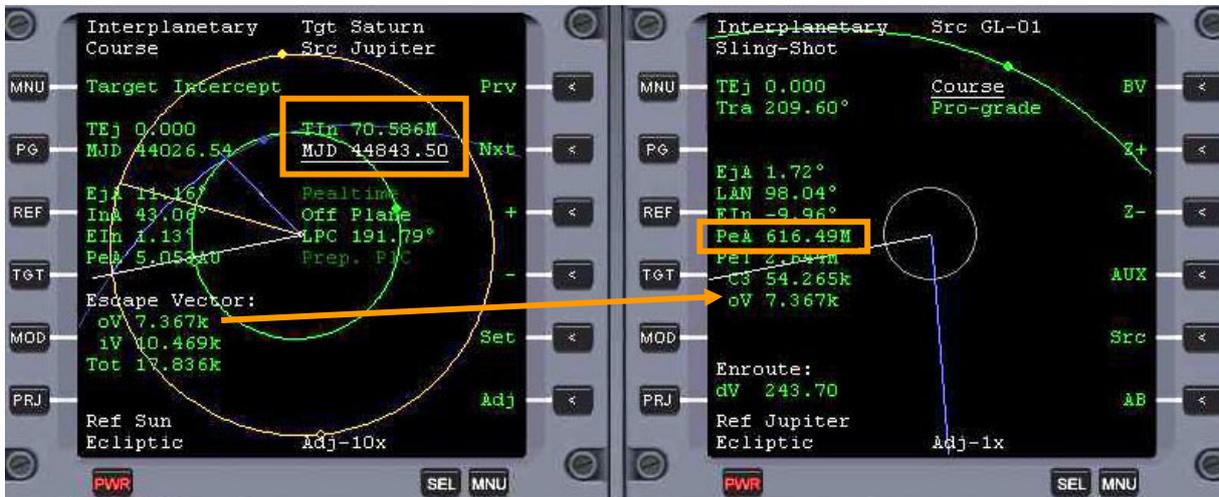
Remarquez que la source dans Course est la planète Jupiter et non le vaisseau

$oV = 2.753k$ est répercuté dans Sling Shot et nous donne avec celui-ci un temps de combustion $ABT = 252$ s (aller en page 2 et faire BV) et ceci ne semble pas très avantageux puisque nous espérons une aide de l'effet de fronde pour nous faire économiser le carburant.

Phase 3 – Correction du Sling Shot

Il faut réduire ABT . Pour cela nous allons rectifier la date d'arrivée prévue car **le module Course optimise le trajet mais ne regarde pas à la dépense en carburant.**

Modifier MJD (ou TIn) pour diminuer ABT à la valeur souhaitée ou donner la date d'arrivée si on veut la fixer.



Dans notre exemple, Voyager 2 est arrivé à Saturne en $MJD = 44843.5$ et c'est ce que nous allons fixer.

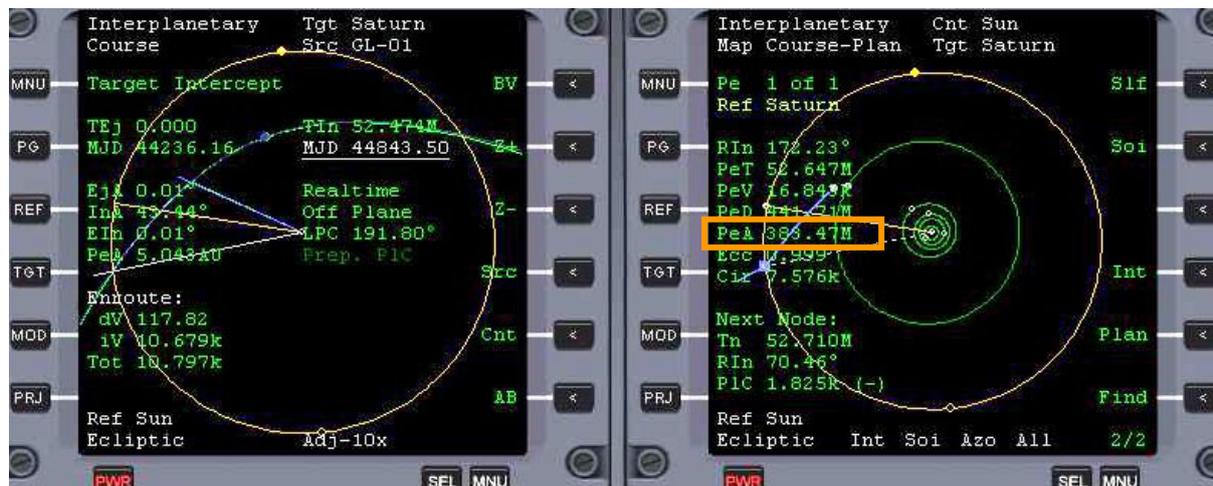
Et voilà le travail ! ABT est inférieur à 16 s et on gagne énormément en temps de voyage Il ne reste plus qu'à faire un AutoBurn avec AB sur Sling Shot (avec BV sur page 2)

Avec si peu de dépense nous avons pu porter oV de 2.753K à 7.367k. Jupiter nous a bien aidé avec sa vitesse orbitale de 8.053k qui nous a communiqué une grande partie de l'impulsion dont nous avons besoin.

Notre PeA sera de l'ordre de 600M (moins de deux fois Terre-Lune et c'est excellent pour un si long voyage.

Avec un temps d'allumage total $BT < 29$ s (13 + 16) nous avons pu modifier notre trajectoire vers Saturne et à arriver très près. Merci à l'effet de fronde !

Dès que $G = 0.5$ est affiché en rouge sur un MFD Orbit référencé sur Jupiter (on peut ouvrir un MFD externe pour suivre) son attraction n'est plus prépondérante et nous pouvons passer Target Intercept avec le vaisseau GL-01 comme source et suivre la trajectoire sur Map ouvert à droite



PeA prévu de 383M c'est à peu près la distance Terre-Lune et c'est superbe pour un tel voyage ! Plus tard il faudra peut être corriger comme nous avons appris à le faire.

C'est parti pour un voyage de 5200000 s soit 601 jours. Nous pouvons nous mettre en hibernation !

N'oubliez pas d'admirer Jupiter et ses Lunes au passage avant de vous endormir et surtout, réveillez vous en approche de Saturne.



Je suis allé jusqu'au bout et avec une seule correction en Planet Approach à PeT = 1M j'ai pu me mettre en orbite Eql = 70° à PeA = 500M pour bien profiter du paysage.

Il me restait après toutes les manoeuvres 36 % du carburant sur les 66% au départ

Bravo à IMFD !

A retenir pour le Sling-Shot

On se sert d'une planète intermédiaire pour qu'elle nous communique une accélération d'appoint pour rejoindre une planète cible

- Il faut en un premier temps quand on entre sous influence à $G=0.2$ corriger Eql et PeA en approche de la planète intermédiaire pour avoir une distance minimum prévue à l'approche de la planète cible (moins de 1AU si possible). Faire ensuite l'allumage correctif
- Quand on entre dans la zone d'influence $G=0.5$ de la planète intermédiaire on communique au module Sling-Shot le vecteur dV calculé dans la situation actuelle par le module Target Intercept en mode Off-Plane avec la planète cible comme objectif
- On agit sur le temps d'arrivée TIn prévu pour l'objectif pour diminuer le temps de combustion ABT dans le module Sling-Shot. Faire ensuite l'allumage correctif
- On peut éventuellement faire une correction de trajectoire en route mais en principe ce n'est pas nécessaire
- On corrige en final en Planet Approach à TIn < 1M par exemple de la planète cible pour ne pas trop dépenser (on peut faire une dernière correction plus tard si nécessaire)

11 – UTILISATION DE BASE- APPROACH

Ce module est très pratique pour se synchroniser avec une base soit pour se mettre en orbite soit pour faire une rentrée.

Nous allons faire un exercice en partant d'une approche de la Lune pour rejoindre Brighton Beach

Le scénario

15 – DG Approche Lune

vous place avec le DG en approche à 33M de la Lune

Ouvrir Planet Approach sur un MFD et la Map standard avec Tgt Brighton Beach sur l'autre



On peut voir sur Planet Approach que l'inclinaison équatoriale de notre orbite est $EqI = 162.94^\circ$ et nous entrerions en rétrograde ce qui nous ferait atteindre approximativement la latitude maximum de $180 - 163 = 17^\circ$

Nous voulons atteindre Brighton Beach qui est à $41.32^\circ N$ et pour passer au mieux au dessus de la base il faudrait corriger EqI pour avoir en arrondi $180 - 42 = 138$.

Il est bien plus favorable d'utiliser Base Approach avec son option Orbit Insert pour faire une insertion en orbite à l'altitude qui nous conviendra sur une orbite qui passera sur la base désignée



Ouvrir Base Approach et prendre Moon comme référence, Brighton Beach comme objectif et l'option Orbit Insert

Prenons une altitude d'insertion de 20k qui nous permettra de préparer l'alunissage

Faire l'AutoBurn avec AB en passant en page 2 avec PG. Temps d'allumage $ABT < 13$ s (vérifier avec BV)



Si on ouvre le module Orbit Insert avec Moon comme référence on peut circulariser à l'altitude prévue pour PeA en allumant en automatique par AB
Après la combustion on voit sur Map que notre orbite passe sur la base et se fait dans le sens rétrograde (est-ouest)

On peut aussi utiliser le **module Orbital** option Circularize de IMFD pour effectuer cette opération. Il faut lancer l'allumage en faisant AB quand PeT est voisin de 0.
On peut aussi utiliser le **module Orbit standard** pour déclencher l'allumage en position rétrograde quand PeT est voisin de 0.

Le scénario

16 – En orbite lunaire

vous place avec le DG en orbite à 20k de la Lune

Je me suis mis à 20 k d'altitude en circulaire pour que vous puissiez tester le MFD remarquable qu'est LandMFD si vous le possédez.

- Map standard sur Target Brighton Beach à droite
- A gauche SEL pour ouvrir LandMFD puis Shift+0 (zéro) pour enclencher le pilote automatique et c'est parti pour un super spectacle !

Si vous n'avez pas LandMFD, pour vous permettre quand même d'admirer Brighton Beach de près, nous allons utiliser l'option Re-Entry de Base Approach en partant de notre orbite rétrograde à 20k



- Sélectionner l'option Re-Entry et le mode Retrograde (sens de l'orbite)
- Sélectionner Alt et mettre 0 puisque la Lune n'a pas d'atmosphère.
- Sélectionner Ant et mettre 0 puisqu'il n'y a pas d'atmosphère et qu'il est inutile d'anticiper
- Garder 3° de ReA pour faire une approche de type avion
- Sélectionner Hint et faire + pour avoir une solution (Hint donne le temps total depuis le départ jusqu'à l'arrivée)
- Faire l'Auto Burn (passer sur la page 2)

On peut également régler le temps d'éjection TEj si on le désire pour ajuster ABT

Succès garanti ! Vous arriver droit sur Brighton Beach mais à une belle vitesse d'environ 1650 m/s ! Trajectoire parfaite, mais quel beau crash...
Il faudrait prendre des dispositions pour ralentir comme c'est expliqué dans d'autres tutoriaux.

Vous pourrez aussi utiliser Base Approach en mode Re-Entry (old) qui correspond à TEI-Approach des versions antérieures



On peut régler l'anticipation, l'altitude et le temps MJD d'arrivée pour jouer sur ReA
 En agissant sur MJD essentiellement on peut faire varier ReA qui doit avoir une valeur positive
 On peut également jouer un peu sur le temps TEj pour retarder l'allumage si on le veut.
 Dans tous les réglages il est important de surveiller ABT (par BV) et surtout ReA qui doit rester positif

12 – UTILISATION DE TANGENTIAL TRANSFERT

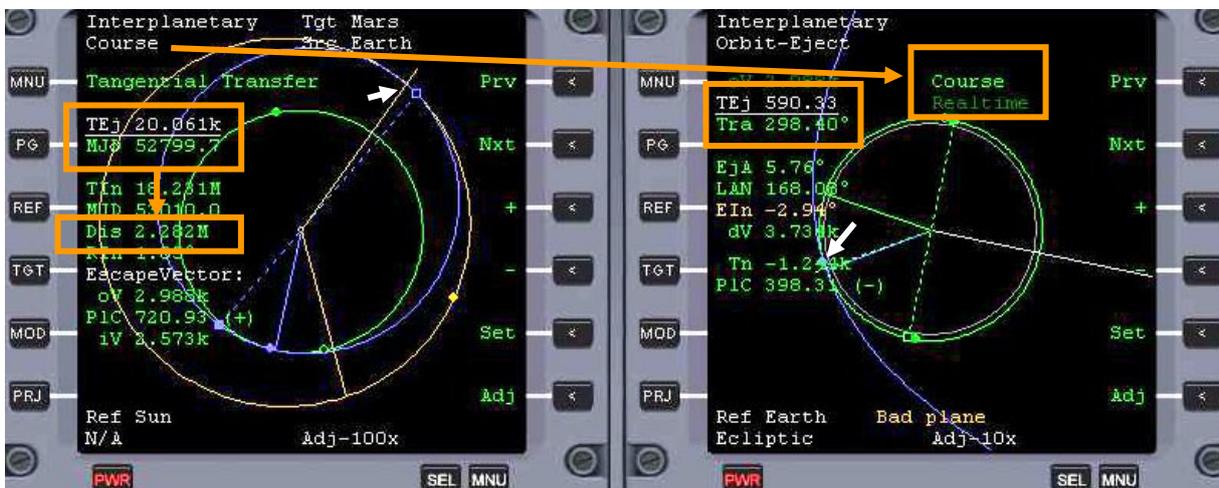
Ce module permet le calcul d'une trajectoire tangentielle entre les orbites de deux corps dépendant d'un même corps de référence. Par exemple Terre-Mars (référence Sun)
 Une orbite de transfert est calculée. Elle est tangente avec l'orbite de la source et l'orbite de l'objectif (rappelons que deux courbes sont tangentes quand elles ne se coupent pas et se touchent en un seul point)
 Les plans orbitaux doivent être alignés
 L'orbite de la source peut être hyperbolique (courbe ouverte) mais l'orbite de l'objectif doit être elliptique ou circulaire.

Le scénario

17 – Mars en tangential

vous place avec le DG en orbite alignée avec Mars à MJD = 52799.5

- Ouvrir Tangential Transfer avec Mars comme objectif
- Ouvrir Orbit Eject couplé en mode Op-Shared et choisir Course pour recevoir les données du premier MFD
- Essayer de réduire Dis en augmentant TEj sur Tangential transfert
- Régler TEj sur Orbit Eject pour bien placer le point d'éjection comme nous savons le faire



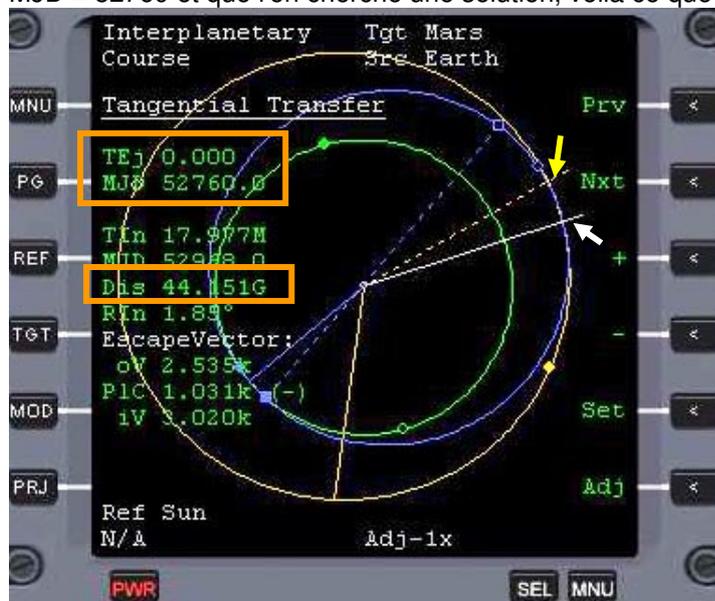
Il ne reste plus qu'à passer en allumage auto par AB et c'est parti !

Utilisation pour le calcul d'une fenêtre de tir favorable

La précision de calcul ne nous permet pas d'arriver de façon rigoureuse au point de tangence prévu et ce mode de transfert n'est pas particulièrement avantageux.

Il permet cependant de déterminer une fenêtre de tir favorable et de préparer un scénario de la façon suivante.

Si dans le scénario 17, on se place par exemple deux mois avant la date en modifiant MJD pour faire MJD = 52760 et que l'on cherche une solution, voilà ce que l'on a



Le rayon blanc (flèche blanche) marque la ligne de rencontre prévue
Le rayon jaune pointillé (flèche jaune) marque le point où se trouverait l'objectif à ce moment si on partait à MJD = 52760.

On peut voir que Dis serait très grand et >44G (130 fois Terre-Lune)

Il faut augmenter TEj(ou MJD) pour faire coïncider les deux lignes ce qui doit donner une distance Dis de rencontre minimum.
La valeur de MJD obtenue nous donnera une fenêtre de tir

On obtient avec cet exemple un départ à TEj = 52800.1 avec Dis = 1.6M

Il ne reste plus qu'à faire notre scénario avec un MJD un peu antérieur de un demi jour par exemple MJD = 52799.6 pour pouvoir préparer le tir et ne pas trop attendre le départ

Faites un test en partant du scénario 17 mais en entrant Venus comme cible. En faisant coïncider les lignes et en ajustant pour avoir Dis minimum on obtient MJD = 53075.1 qui donne le 10 mars 2004 ce qui est effectivement une bonne fenêtre de tir.

Si vous continuez à avancer le temps la prochaine coïncidence des rayons se produit à MJD = 53663 qui donne le 20 octobre 2005 et ainsi de suite.

13 – UTILISATION DE SURFACE LAUNCH

Ce nouveau module fait à partir de la surface la même chose que les modules Orbit Eject et Off-Plane Intercept

Il peut être utilisé pour un lancement dans une orbite interplanétaire générée par les modules Course, Base Approach ou Slingshot

Dans le cas de la Lune ou d'un satellite de la Terre, il est utilisé dans un mode particulier Lunar Off Plane

Le scénario

18 – Surface Launch

vous place avec le DG au départ à KSC piste 15 (cap 160°)

Le tir idéal se fait plein Est à 90° pour bénéficier au maximum de la rotation de la Terre mais KSC n'a pas de piste dans cet axe. Nous partirons au mieux au cap 150° et nous corrigerons dans la montée en suivant les instructions du module Surface Launch.

J'es^ère que vous savez piloter un Delta Glider ?

13.1 – Cas particulier de départ pour la Lune

- Ouvrir à gauche le module **Target Intercept en mode Two Plane** avec objectif Moon comme nous avons déjà fait pour calculer l'orbite d'insertion lunaire et se préparer

- Ouvrir à droite le module **Surface Launch** en faisant **PWR → SEL → Interplanetary → MNU → Surface Launch** → faire **+** pour sélectionner **Lunar Off-Plane** → **TGT** et entrer **Moon**



Il faudrait lancer dans 6225 s au cap 90°. Ce n'est pas tout à fait notre cap au départ mais nous corrigerons après le décollage.

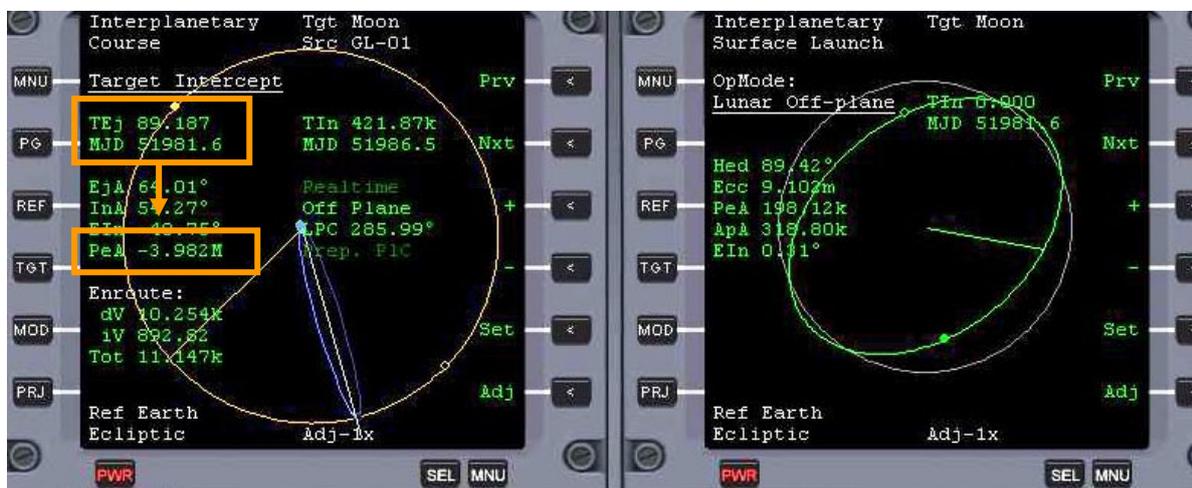
- Avancer dans le temps pour avoir **Time = 0**
- Allumer le réacteur principal et décoller quand la vitesse est suffisante, monter un peu et rentrer le train
- En utilisant les touches 4 et 6 du pavé numérique, virer à gauche pour aller au cap indiqué par la valeur de Hed (données "en montée") environ puis stabiliser (Alt+H permet de changer la couleur des échelles sur le HUD pour faciliter leur lecture)
- Monter à Pitch 80° pour atteindre une altitude de 80k ou l'atmosphère se raréfie

Pendant la montée il faut contrôler deux paramètres :

- En faisant varier le cap autour de la valeur Hed donnée (touches 1 et 3 en rotation), **il faut amener Eln le plus près possible de 0 et au moins inférieur à 1**
- Il faut surveiller la valeur de ApA et réduire progressivement le pitch pour la stabiliser à une valeur comprise entre 200 et 300 k qui nous mettra sur une orbite assez basse pour laisser PeA augmenter.
- Quand PeA égale une valeur au moins égale à 150k, couper le moteur. Réduire la poussée quand PeA avoisine 0 car ensuite PeA évolue très vite

Si on fait correctement les réglages, on doit être sur une orbite avec Pea et ApA supérieurs à 150k et Eln voisin de zéro.

Ce sont surtout la valeur minimum pour PeA et Eln voisin de zéro qui sont importants



Nous voilà arrivé sur une orbite avec un $PeA = 198$ k et $EIn = 0.31$ ce qui est correct il ne reste plus qu'à utiliser Target Intercept pour lancer en mode Two Plane!

Attention à augmenter TEj pour que PeA soit au moins supérieur à 150k ensuite passer sur AB. Ne pas oublier en fin du premier allumage de sélectionner Prep Pic et de le valider avec + pour préparer le deuxième AB et en route pour la Lune.

Je me suis posé à Brighton Beach en utilisant Base Approach puis LandMFD et il me restait 25% du carburant. Pas mal n'est ce pas ?

13.2 – Cas général de départ pour une autre planète

Pour cet exercice Nous choisirons Mars qui est assez près.

- Ouvrir Target Intercept avec objectif Mars dans le MFD à gauche
- Ouvrir Surface Launch en mode Op Shared et choisir Course-Program pour recevoir les données du module Course



Avancer le temps jusqu'à ce que Time = 0 et décoller en orientant au cap donné par Hed de façon à avoir EIn le plus près de 0 possible en fin de montée.

Ensuite procéder comme précédemment pour ajuster ApA et PeA.

Quand l'orbite est établie, passer le module de droite sur Orbit-Eject, régler le point d'éjection et allumer en AB.

Le voyage vers Mars commence et il n'y a plus qu'à faire les corrections nécessaires avant l'arrivée..

14 – CONCLUSION

J'espère que cet aperçu vous donnera envie de tester IMFD et de découvrir vous-même toutes les possibilités.

Vous excuserez les petites erreurs. Normalement j'ai essayé tout ce que j'ai décrit et il ne doit pas y avoir de grosses anomalies, mais on ne sait jamais !

Bonne chance !

Papyref
Octobre 2006

ANNEXE

Voici quelques dates favorables de lancement que vous pouvez utiliser pour vos scénarios
 Les dates d'arrivée sont prévisionnelles et calculées au plus court
 Les temps arrondis à 10000X donnent à peu près la durée d'une mission sur Orbiter

Départ de	Date	MJD	Arrivée sur	Date	MJD	Durée jours	Temps à 10000X
Terre	15/01/2005	53384	 Mercure	28/04/2005	53488	104	1 mn 30 s
 Mercure	23/10/2005	53671	 Terre	12/02/2006	53778	107	
 Terre	15/10/2005	53658	 Venus	09/09/2006	53803	145	2 mn 5 s
 Venus	14/11/2005	53688	 Terre	08/04/2006	53833	145	
 Terre	07/07/2005	53558	 Mars	22/03/2006	53816	258	3 mn 42 s
 Mars	02/05/2005	53492	 Terre	17/01/2006	53752	260	
 Terre	20/01/2006	53755	 Jupiter	14/10/2008	54753	998	15mn
 Jupiter	12/04/2008	54568	 Terre	05/01/2011	55566	998	
 Terre	04/10/2005	53647	 Saturne	21/10/2011	55855	2208	32mn
 Saturne	30/06/2005	53551	 Terre	17/07/2011	55759	2208	
 Terre	04/05/2005	53494	 Uranus	18/05/2021	59352	5858	1h 24mn
 Uranus	11/02/2005	53412	 Terre	25/02/2021	59270	5858	
 Terre	13/04/2005	53473	 Neptune	24/11/2035	64655	11182	2h 41mn
 Neptune	25/06/2005	53576	 Terre	06/02/2036	64729	11153	

Ces dates donnent une bonne approche pour un fenêtre de lancement et un jour d'arrivée prévu, mais elles ne sont pas forcément très rigoureuse.

On peut s'en écarter un peu mais il vaut mieux en rester proche pour un bon résultat.

Pour la Lune la fenêtre se présente deux fois par jour et IMFD donne une excellente approche.

Vous pouvez trouver une feuille de calcul sur Excel nommée Hohmann.xls sur le site

<http://clowder.net/hop/railroad/sched.html>

Elle permet d'obtenir les fenêtres de tir en désignant la planète de départ et la planète d'arrivée

Merci à son auteur !