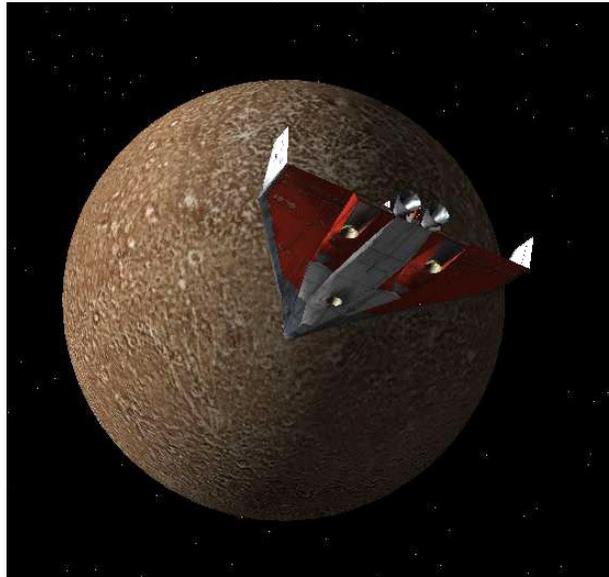


Utilisation de IMFD version 5.3

2^{ème} partie – Exercices

Par Papyref
Mai 2009



INDEX

0 - Objet	page 02
1 - Généralités	page 02
2 - De la Terre à la Lune	page 07
3 - De la Lune à la Terre	page 17
4 - De la Terre à la Lune (variante)	page 21
5 - De la Terre à Mars	page 22
6 - De Mars à la Terre	page 29
7 - De Io à Europa	page 35
8 - De la Terre à Venus et retour	page 40
9 - De la Terre à Mercure et retour	page 45
10 - Utilisation de Sling-Shot	page 49
11 - Utilisation de Base Approach	page 53
12 - Utilisation de Tangential Transfert	page 56
13 - Utilisation de Surface Launch	page 58
14 – Le vecteur vitesse	page 61
14 – Conclusion	page 63
Quelques fenêtres de lancement	page 63
Principe de l'orbite de Hohmann	page 64

0 – OBJET

Cette note à pour objet de vous faire réaliser quelques exercices qui vous aideront pour utiliser IMFD en version 5.3

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 2006 P1.

Il est bon avant de faire ces exercices de lire la première partie de cette note qui développe l'utilisation théorique des modules et de 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 LazyD a télécharger sur le site http://www.aovi93.dsl.pipex.com/orbiter_addons.htm ou plus récent LolaMFD de LazyD a télécharger sur le site http://www.orbithangar.com/search_quick.php?text=lola

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

1- GENERALITES

Nous utiliserons le Delta Glider standard dont le tableau de bord possède des touches fonctionnelles qui facilitent les actions et qui convient bien pour des exercices

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.

Bien sûr vous pouvez utiliser le superbe DG IV de notre ami Dan Steph mais il vous impose sa propre gestion d'exploitation qui peut vous gêner en cours d'exercice (perte d'oxygène par exemple) et je pense qu'il vaut mieux utiliser le Delta Glider standard pour se familiariser avec IMFD.

Nous partirons normalement depuis une orbite d'attente autour de la planète de référence

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 de départ enregistrés.

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

Les textes en italiques donnent des précisions et ne sont pas essentiels pour l'exercice

IMFD paraît complexe mais il n'est pas très difficile à utiliser une fois que l'on en a compris les mécanismes. L'utilisateur averti en mécanique spatiale pourra utiliser des données mises à disposition pour réaliser des manœuvres complexes s'il le désire.

Ne vous découragez pas et vous serez conquis par IMFD comme je le suis.

Dans les exercices j'essaie de vous donner le mode opératoire mais aussi de vous faire comprendre pourquoi on fait ainsi. J'espère que ce sera profitable et que vous deviendrez rapidement un expert IMFD

Bonne route !

1.1 - Rappels des règles de base pour exploiter IMFD (voir partie Théorie)

Les touches à gauche du module sont toujours les mêmes. On les actionne en cliquant dessus ou par un raccourci clavier (liste des raccourcis donnée en faisant clic sur la touche MNU en dessous). Elles comprennent pour un module ouvert:

- MNU** Appel du menu principal pour changer de module ou choisir des options.
Cas particulier pour le module Course où il faut sélectionner le nom du module actif et faire + pour revenir au menu de choix des sous modules.
- PG** Changement de la page pour afficher d'autres choix de commandes
- REF** Désignation de la planète ou satellite de référence
- TGT** Désignation de l'objectif
- MOD** Changement du mode d'affichage des données
- PRJ** Changement du mode d'affichage de la projection de l'orbite

Les touches à droite du module permettent des commandes ou des choix dont les noms sont affichés sur l'écran du MFD à leur gauche. Elles peuvent être différentes suivant le module utilisé, et elles se trouvent sur deux pages que l'on permute avec la touche PG.

Les touches Prv et Nxt permettent de se déplacer et de sélectionner un élément modifiable. On peut ensuite le modifier en utilisant les touches + ou -.

Pour une donnée modifiable on peut utiliser la touche Adj qui permet une incrémentation ou décrémentation de 1x, 10x ou 100x lorsqu'on clique sur + ou -. Un clic maintenu sur + ou - permet une incrémentation ou décrémentation rapide.

Une donnée peut être modifiée en utilisant la touche Set et en entrant la valeur désirée conformément aux règles d'écriture en utilisant ou non des coefficients multiplicateurs puis en validant par Enter.

MJD ou GET peut être affiché en ouvrant la rubrique Configuration du menu principal et en modifiant la valeur de Mission Timer pour le départ de GET (par défaut c'est le MJD du scénario).

Un temps sous forme MJD (Tin, TEj) peut être entré avec Set en tapant la valeur désirée et en validant par Enter ou sous la forme UT jj-mmm-aaaa hh:mm:ss.s/10. Le temps sur 24 heures hh:mm:ss.s/10 est optionnel.

Un temps de mission GET peut être entré sous la forme GET hh:mn:ss.s/10 ou en utilisant + et - et Adj (100x pour modifier les heures, 10x pour modifier les minutes, 1x pour modifier les secondes).

Pour le module Map, on peut ouvrir le menu de configuration spécifique en utilisant la touche MOD puis modifier le Time Limit pour afficher plus que le trajet calculé. Par exemple pour Terre-Lune aller retour on entrera 700k pour couvrir largement le voyage.

Op-Mode dans le menu principal d'un module permet de le coupler à un autre MFD qui lui transmettra des données. Lorsqu'on choisit le mode Shared, on entre le numéro d'identification du module qui envoie l'information (0 pour le module de gauche, 1 pour le module de droite, 10 pour le MFD externe).

Attention si un MFD est couplé en OpMode Shared sur un autre, le deuxième ne doit pas être couplé inversement. Il ne doit y avoir qu'un MFD en OpMode Shared.

L'affichage en 3D des trajectoires est possible pour les modules Target Intercept, Planet Approach et Delta Velocity. On l'arme et on fait tourner la trajectoire en bougeant la souris et en tenant Shift gauche+W pour le MFD de gauche et Shift droit +L pour le MFD de droite. Pour désarmer il faut revenir à un autre mode de projection avec PRJ.

Les trajectoires sont d'autant meilleures si les plans orbitaux sont presque alignés ($RIn < 1^\circ$)

Vous trouverez tous les détails dans la partie Théorie.

1.2 - Principes de base pour les calculs de trajectoire les insertions et les corrections.

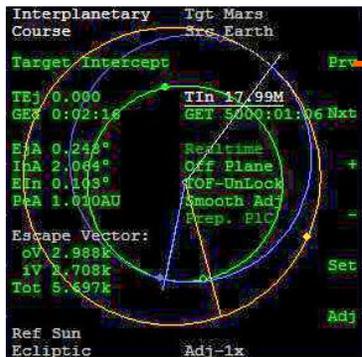
On se place en général en orbite d'attente autour de la planète d'où l'on part et on fait ensuite le calcul de trajectoire vers l'objectif.

Il faut de préférence lancer pour la mise en orbite à un moment donnant la mise en un plan orbital d'inclinaison la plus près possible de celle du plan de la cible et également que la distance entre les deux planètes soit la plus faible possible (pour les voyages interplanétaires essentiellement) C'est la fenêtre de lancement que nous essayerons de trouver dans nos exercices

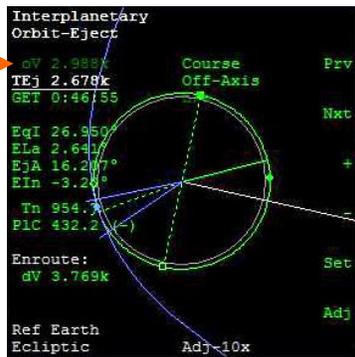
Calcul de la trajectoire et de l'allumage pour l'injection en orbite de transfert

1. Pour aller d'une planète à une autre avec référence commune pour leur orbite (ex Terre-Mars référence Soleil ou Io-Europa référence Jupiter)

C'est la planète de départ qui est prise comme Source pour le calcul et l'allumage du vaisseau doit être **toujours réalisé** à partir d'Orbit Eject (une planète n'a pas de moteur !)



Calcul par Target Intercept avec TGT = objectif et mode Off-Plane en général



Allumage par Orbit Eject couplé en Op-Mode Shared (ID =0) en mode Course et Off-Axis

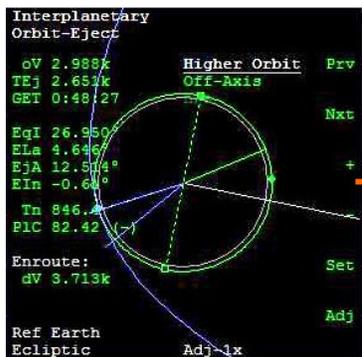
On cherche à avoir le plus petit temps de transfert $T_{in} - T_{ej}$ avec un temps de combustion raisonnable

On ajuste T_{in} et T_{ej} sur Target Intercept

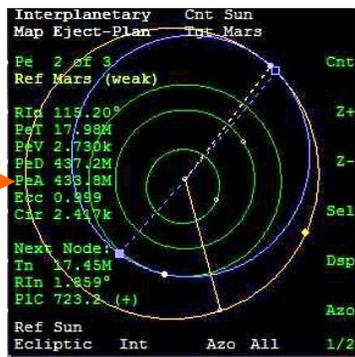
On ajuste T_{ej} sur Orbit Eject pour bien placer le point d'allumage

Orbit Eject couplé reçoit les données dV de Target Intercept

Variante possible mais moins recommandée



Régler l'allumage en faisant varier oV
Avec T_{ej} placer correctement le point d'allumage
Allumage par Orbit-Eject



Map couplé en Op-Mode Shared TGT = Objectif
Surveillance en mode plan du PeA de l'orbite au périapsis de l'objectif

On cherche à réduire le plus possible PeA référence Objectif sur Map en faisant varier oV sur Orbit Eject

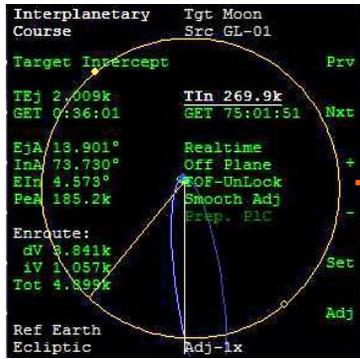
Prendre Higher Orbit si on va à l'extérieur de l'orbite de départ (ex Terre-Mars) et Lower Orbit si on va à l'intérieur (ex Jupiter-Mars)

Map couplé reçoit les données pour tracer la trajectoire et permet le réglage au mieux de PeA

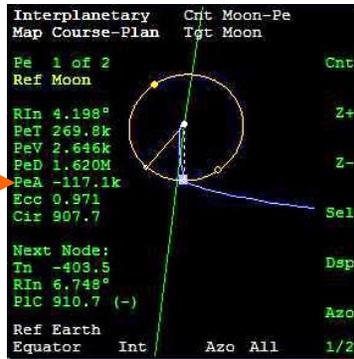
Ce cas s'applique si on va d'un satellite à un autre pour des planètes différentes les références n'étant pas les mêmes. Ex Io référence Jupiter – Titan référence Saturne

2. Pour aller d'une planète vers un de ses satellites (réel ou artificiel) ex Terre- Lune/ISS ou Jupiter - Io

C'est le vaisseau qui est pris comme source puisque sa référence (planète de départ) est la même que celle de l'objectif. L'allumage se fait alors par le module Course



Régler Tin et TEj pour avoir le meilleur temps de transfert et de combustion possible
Surveiller PeA



Surveiller PeA de l'orbite au périapsis de l'objectif

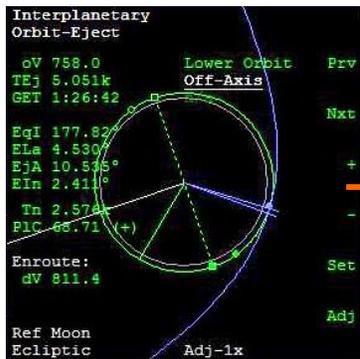
On cherche à avoir le plus petit temps de transfert Tin – Tej avec un temps de combustion raisonnable

On règle Tin et TEj pour avoir PeA sur Map satisfaisant tout en surveillant PeA et BT sur Course

Map couplé reçoit les données pour tracer la trajectoire et permet le réglage au mieux de PeA

3. Pour aller d'un satellite (réel ou artificiel) vers sa planète de référence ex Lune-Terre ou Phobos-Mars

C'est le satellite qui est pris comme source puisque le vaisseau n'a pas la même référence que l'objectif (le vaisseau par exemple tourne autour de la Lune et la Terre autour du soleil)



Régler l'allumage en faisant varier oV
Avec TEj placer correctement le point d'allumage
Allumage par Orbit-Eject



Map couplé en Op-Mode
Shared TGT = Objectif
Surveillance en mode plan du PeA de l'orbite au périapsis de l'objectif

On cherche à réduire le plus possible PeA référence Objectif sur Map en faisant varier oV sur Orbit Eject

Prendre Lower Orbit puisqu'on va à l'intérieur de l'orbite du départ (ex Lune-Terre)

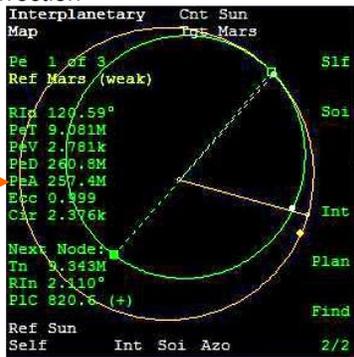
Map couplé reçoit les données pour tracer la trajectoire et permet le réglage au mieux de PeA

Corrections en cours de route

Effectuées à partir de Target Intercept couplé à Map pour contrôler la trajectoire et juger de la nécessité et de l'efficacité de la correction



Prendre le vaisseau comme source sur Target Intercept
Faire l'allumage



Contrôle des éléments de l'orbite au périapsis de l'objectif

Les données initiales TEj et Tin sont conservées et il suffit de faire un allumage correctif si PeA n'est pas convenable

Map couplé reçoit les données pour tracer la trajectoire et permet le contrôle de PeA

Corrections en approche d'une planète

Effectuées avec Planet Approach ou Base Approach à une distance de l'objectif comprise entre 3xSOI et SOI (SOI est la sphère d'influence de l'objectif - voir explication plus loin)



Base Approach permet une insertion en orbite avec passage sur la base désignée ou une Rentrée sur cette base

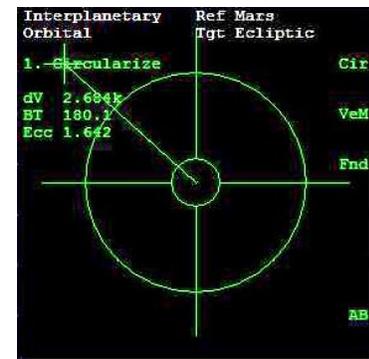
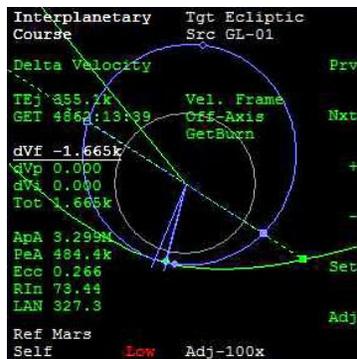
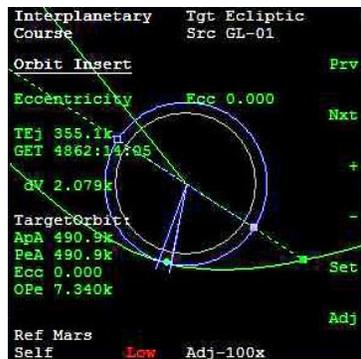
Prendre Ref = planète objectif
Régler l'inclinaison équatoriale
EqI désirée dans les limites permises
Régler le periapsis désiré
Faire l'allumage

Prendre Ref = planète objectif
Prendre Tgt = Base
Régler l'altitude de mise en orbite (on peut aussi utiliser un mode Reentry)

Insertion en orbite

Trois modules sont utilisables en dehors de Base Approach si on ne cherche pas à viser une base

- Si on veut s'insérer au Periapsis prévu avec ou sans excentricité, on utilise Orbit-Insert du module Course
- Si on veut s'insérer en orbite elliptique en réglant PeA et/ou ApA on utilise Delta Velocity du module Course
- Si on veut s'insérer en circulaire à un moment donné à l'altitude ou on se trouve on utilise Orbital en mode Circularize



Prendre Ref = planète objectif
Faire AB

Prendre Ref = planète objectif
Régler dVf, dVp, dVi et TEj pour régler ApA et PeA
Faire AB

Prendre Ref = planète objectif
Faire AB quand on se trouve à l'altitude désirée

Attention – L'erreur classique en utilisant les modules IMFD est de ne pas choisir la planète objectif comme référence. Elle n'est pas forcément sélectionnée automatiquement et il faut penser à vérifier et modifier si nécessaire. Vue son influence primordiale c'est souvent le Soleil (Sun) qui est pris comme référence à l'ouverture.

Une deuxième erreur fréquente consiste à oublier de changer la source sur Target Intercept quand on quitte la SOI de la planète de départ.

Soyez prudent si vous voulez des bons résultats et ne pas penser qu'IMFD ne marche pas !

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" ?

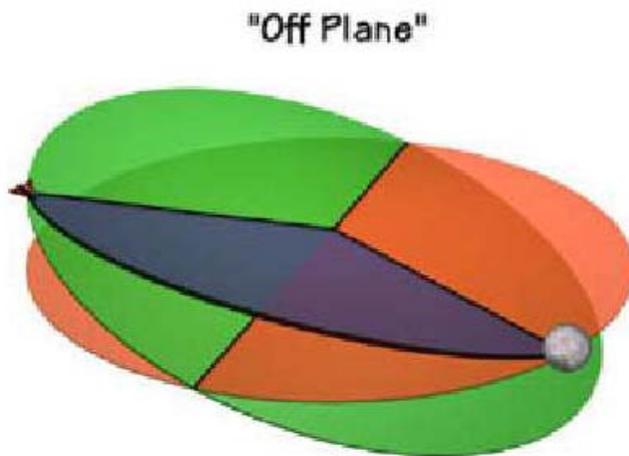
Nous allons utiliser divers modules pour le voyage et cet exercice sera plus détaillé que les suivants pour y expliquer des notions de base servant dans la suite.

Charger le scénario 01 – Depart pour la Lune.scn

Ce scénario permet après le dédockage de Mir de se trouver en orbite dans un plan orbital assez proche de celui de la Lune à quelques degrés près.

Faire CTRL+D pour dédockier puis fermer le cône par K

Pour aller de la Terre à son satellite, nous utiliserons le mode Off-Plane du Module Target Intercept car il permet le transfert même si les plans orbitaux ne sont pas très bien alignés et le trajet est court. Ce module convient car comme la Lune qui est son satellite, nous n'échappons pas à l'influence de la Terre qui est notre planète de référence sinon il faudrait utiliser Orbit Eject



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 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 les modes Two Plane, Source Plane ou Target Plane

2.1- Recherche d'une solution de tir économique avec Target-Intercept

Sur le MFD de gauche, ouvrir le module Target Intercept qui va permettre de chercher l'orbite de transfert HTO la plus économique et sur MFD de droite, ouvrir le module Map qui permettra le contrôle des réglages.

Voici le détail des manoeuvres que je ne donnerai plus par la suite (se reporter à la partie théorique)

Pour ouvrir chaque MFD:

- **PWR** si il n'y a pas de MFD affiché (Shift gauche + Echap ou Shift droit + Echap marchent également)
- **SEL** (plusieurs fois si nécessaire) pour chercher Interplanetary
- **Sélectionner** Interplanetary pour ouvrir le MFD
- **MNU** pour ouvrir le menu

Pour le MFD de gauche

- **Prv/Nxt** pour sélectionner **Course**
- **Prv/Nxt** pour sélectionner **Target Intercept**
- **SET** puis **TGT** et entrer Moon pour sélectionner l'objectif
- **Sélectionner le mode Off-plane** si il ne l'est pas

Pour le MFD de droite

- **PG** pour sélectionner **OpMode** et entrer 0 (zéro) pour se coupler au premier MFD
- **Prv/Nxt** pour sélectionner **Map**
- **MOD** trois fois pour afficher la page de configuration et entrer 800k pour Time Limit pour avoir au moins deux fois le temps du trajet (normalement il fera moins de 300k) puis faire **MOD** pour revenir à l'affichage de Map. **Essentiel pour bien afficher la trajectoire aller-retour**
- **TGT** et entrer Moon pour avoir Map avec la Lune comme objectif
- **Cnt** et entrer p-moon pour centrer Map sur le periapsis de la trajectoire au niveau de la Lune
- **Dsp** pour avoir l'affichage des orbites
- **PG** pour ouvrir la page 2/2
- **Soi** pour afficher les sphères d'influence de la Terre et la Lune
- **Int** pour afficher l'intersection
- **Plan** pour se coupler au premier MFD qui nous envoie les résultats de calcul
- **Sel** et sélectionner Pe 1 of 3 ref Moon pour avoir la distance au périlune

Tout ceci paraît compliqué mais c'est logique et on s'habitue vite à ces opérations.

Un mot sur les sphères d'influence SOI dont les limites s'affichent comme des cercles pointillés sur Map si on active SOI:

Pour la planète que l'on quitte (ci dessous la Terre), la SOI donne la distance à laquelle elle n'a plus que 50% d'influence sur le vaisseau. On a $G=0.5$ affiché en jaune sur le MFD Orbit standard avec cette planète en référence. C'est en général à cette distance qu'on fait la première correction en course si nécessaire. Le soleil devient prépondérant



Pour la planète vers laquelle on se dirige (ci dessous la Lune), la SOI donne la distance à partir de laquelle elle a 20% d'influence sur le vaisseau. On a $G=0.2$ affiché en rouge sur le MFD Orbit standard avec cette planète en référence. C'est en général à cette distance qu'on fait la deuxième correction en course si nécessaire



Revenons à la solution figurée ci dessous donnée à l'ouverture par IMFD. On pourrait afficher MJD en prenant l'option proposée dans Mission Timer du menu Global Configuration (voir Théorie)



On obtient une solution de tir à $TE_j = 2.025k$ (2043 s) avec un temps de combustion $BT = 727$ s (on peut l'avoir en changeant de page par PG puis en faisant BV)

Les plans d'orbite font un angle $EIn = 2.38^\circ$ au point prévu pour l'éjection ce qui veut dire qu'on bénéficiera moins de la rotation de la planète sur son orbite pour limiter la consommation.

Le temps de voyage est la différence entre les temps pour l'éjection et l'arrivée ce qui donne $427600 - 2025 = 425575$ s soit 4,92 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 !

IMFD nous calcule une orbite de Hohmann idéale mais elle ne donne pas une solution optimum.

On pourrait accepter cette solution mais elle est coûteuse en carburant, le temps de voyage est long, et plus ennuyeux encore, on passerait loin de la Lune puisque PeA sur Map = 27.6M ce qui imposerait une correction en route également coûteuse en carburant.

- Nous allons 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 lue sur Course au départ de la Terre !

Pour cette solution, l'altitude calculée du periapsis à la Terre PeA est de 300.8 k (300800 m) ce qui nous garantit de ne pas rentrer dans l'atmosphère.

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 après le départ trop proche de l'atmosphère et même couper la terre et alors c'est la catastrophe !

Attention à PeA au départ !

Quand on fait un réglage il faut être très attentif à s'assurer que la valeur de PeA reste si possible positive et supérieure à 150k (hauteur de sécurité pour la Terre) Bien entendu cette valeur minimum dépend de la planète autour de laquelle on orbite. Elle ne pose pas de problème pour une planète sans atmosphère.

Il faut noter que PeA peut être petit voir même négatif si les conditions de tir le permettent comme nous l'exposons ci après.

*Exemples idéal (en grossissant en faisant **PG** pour être sur la page 2 puis **Z+**)*



Le point de tir est bien placé.

PeA = 186.7k

On ne risque pas de pénétrer dans l'atmosphère

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

Dans notre cas, ce point pourrait se trouver plus près de la planète et son altitude négative car on part en orbite d'échappement bleue suivant la flèche bleue à partir du point de tir (on tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans le sens prograde)

On avance le temps TEj par exemple et le point de tir donne PeA = - 440 k (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)

Cette solution est cependant valable puisque après le tir on ne passe pas par le périapsis de l'orbite de transfert

Ca y est vous avez tout compris ? Il ne nous reste plus qu'à chercher une bonne solution.

2.2 – Reprise de la solution en mode Realtime

Le mode Realtime permet de trouver une solution en optimisant la consommation et le temps de trajet mais il ne permet pas de régler finement le PeA à la Lune et l'inclinaison équatoriale de l'orbite par rapport à l'objectif.

Ce mode convient quand on a un temps assez faible d'allumage pour des corrections en route mais n'est pas très bien adapté pour une mise sur orbite de transfert ou le temps d'allumage est de l'ordre de 200 à 300 secondes.

Nous allons cependant l'utiliser pour trouver une solution approchée et nous affinerons ensuite en mode Off-Axis.

Ci-dessous nous avons optimisé la consommation de l'exemple 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 pour surveiller PeA puis repasser en page 1
- Réglage du temps d'arrivée Tin pour que BT **soit le plus petit possible** (utiliser Prv, Nxt, + et - et modifier AdJ si nécessaire) **ET** que PeA lunaire lu sur Map soit proche de l'altitude désirée à l'insertion. Pour un aller lunaire, Tin est de l'ordre de 260k en général et on peut entrer cette valeur directement pour aller plus vite.
- Réglage de TEj **si nécessaire** pour placer le point d'éjection correctement (utiliser Prv, Nxt, + et - et modifier AdJ si nécessaire) – voir explication ci avant

Astuces pour faire le réglage de BT

Sélectionner Tin en page 1 avec Adj=100x

Faire PG et passer en page 2/2

Faire BV pour afficher BT puis PG pour revenir en page 1/2

En utilisant + et - on peut faire varier Tin qui reste sélectionné (mais on ne le voit pas) et surveiller la variation de BT

On peut aussi rester en page 1/2 et faire varier Tin pour diminuer dV le plus possible

Plus simple encore ! Utiliser External MFD que l'on appelle par CTRL+F4 et sur lequel on affiche le même MFD en mode BV que celui sur lequel on modifie les données. On peut de cette façon contrôler facilement l'évolution de BT.

Il faut s'assurer que PeA sur Map à une valeur proche de celle souhaitée. A ce stade, il est inutile d'essayer de régler PeA finement car il va varier dans le temps.

Ci-dessous une solution donnant BT de l'ordre de 280s

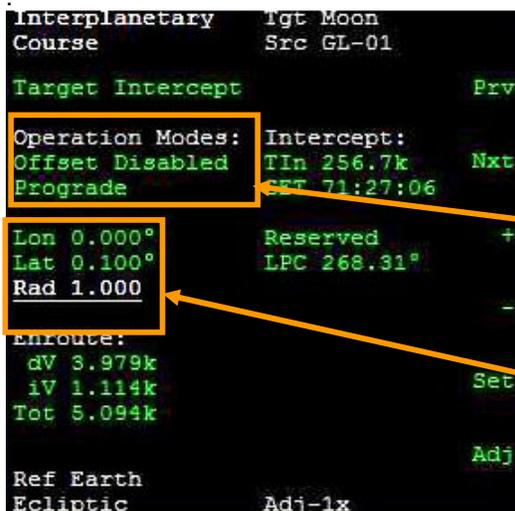


Il reste à passer en allumage automatique par AB en page 2 sur Target-Intercept et à attendre le départ. On peut accélérer le temps jusqu'à 100x. La lune est à nous mais sans correction nous la percuterons. Nous verrons alors comment corriger pour avoir une orbite précise pour insertion en orbite.

2.3 – Affinage de la solution en mode Off-Axis

La solution en mode Realtime ne permet pas de régler l'inclinaison de l'orbite de transfert et finement l'altitude d'insertion. Elle permet simplement de choisir un temps de départ TEj et un temps d'arrivée Tin pour avoir un BT et un temps de transit conformes à ce que nous souhaitons.

Si on veut pouvoir agir sur PeA et Eql à l'arrivée à la Lune il faut utiliser le mode Off-Axis (lire la partie Théorie de IMFD pour en savoir plus sur ce mode)



- Faire le réglage comme ci avant en mode Realtime
- **Sur Course, sélectionner Realtime avec Prv/Nxt et changer le mode en Off-Axis avec +**
- Sur Course, faire MOD pour afficher la page Operation modes
- **Sélectionner Offset Disabled et le changer en Vel. Frame en utilisant +**

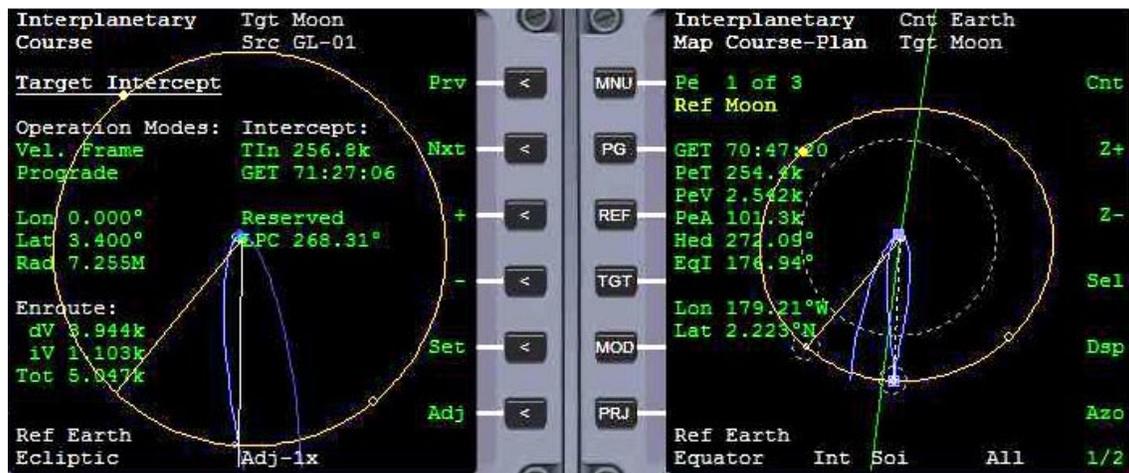
Quand Vel. Frame est sélectionné on peut régler les trois paramètres Rad, Lat et Lon pour ajuster la trajectoire en déplaçant son péricée qui est calculé en mode Realtime pour être au centre de l'objectif (voir la partie Théorie de IMFD)
On peut ainsi régler PeA et Eql lus sur Map

Rad est la distance en m du péricée par rapport au centre de l'objectif qui permet d'agir sur PeA
Lat et Lon sont la latitude et la longitude du nouveau péricée dans le système lié à l'objectif

Il faut surtout retenir que Lat permet d'agir sur l'inclinaison équatoriale Eql de l'orbite par rapport au plan équatorial de l'objectif.

Lon n'est à utiliser que si on a un impératif précis pour l'instant d'arrivée au périégée de l'objectif. Vous en trouverez un exemple dans ma note Missions Apollo avec AMSO - page 9
Pour simplifier nous ne nous en servons pas ici.

- S'assurer que le mode Off-Axis est bien sélectionné sur Course et que le mode Vel;Frame est bien sélectionné (Offset doit clignoter sur Course)
- Faire MOD si nécessaire sur Course pour afficher la trajectoire
- Utiliser Z+ pour agrandir au départ de la Terre et pouvoir vérifier que la trajectoire ne rentrera pas dans l'atmosphère après l'allumage (voir page 8)
- Faire MOD sur Map pour afficher la page donnant les valeurs PeA et Eql
- En suivant l'évolution sur Map régler Rad pour avoir PeA à la valeur souhaitée puis régler Lat pour avoir Eql à la valeur la plus proche possible de celle que l'on désire
- Reprendre le réglage de Rad pour corriger PeA qui peut avoir bougé un peu

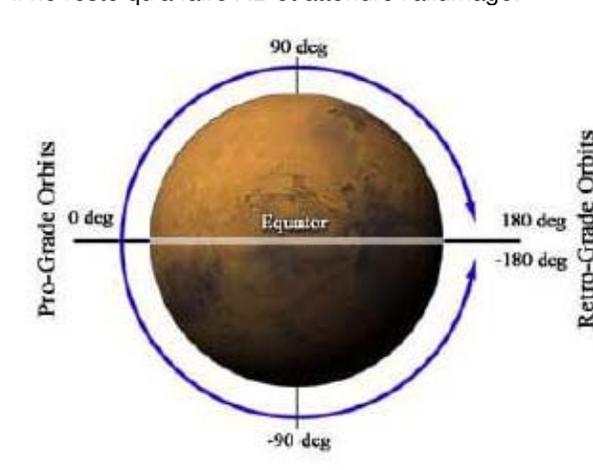


Ci-dessus la solution obtenue en cherchant à avoir PeA proche de 100k et Eql proche de 177° (faire MOD sur Map pour changer l'affichage et avoir Eql) qui nous insérera en orbite rétrograde inclinée de 3° sur l'équateur lunaire.

On peut voir en utilisant Sel sur Map le PeA (Pe 3 of 3 ref Earth) prévu en retour balistique

BT=287 s ce qui est raisonnable. Le temps de voyage de l'ordre de 256800s soit 2,97 jours. Nous n'aurons pas trop le temps de nous ennuyer avant l'arrivée !

Il ne reste qu'à faire AB et attendre l'allumage.



Rappelons pour Eql que :

- Si Eql est compris entre +90° et -90° en passant par 0° l'insertion se fera en mode Prograde de l'est vers l'ouest (par exemple +40° ou -60°)
- Si Eql est compris entre +90° et -90° en passant par 180° l'insertion se fera en mode Retrograde de l'ouest vers l'est (par exemple +170° ou -95°)
- +90° ou -90° correspond à une insertion en orbite polaire
- +180° ou -180° correspond à une insertion en orbite équatoriale

L'étendue de réglage pour Eql dépend du moment du lancement. Il n'est pas forcément possible de le régler comme on le voudrait à ce stade mais on pourra corriger en route.

L'altitude PeA obtenue à l'arrivée peut être légèrement différente de la valeur de réglage, en général quelques km en dessous.
Il conviendra de faire une correction comme nous allons le voir plus loin.

En résumé, pour calculer l'orbite :

- 1 - Ouvrir Course en mode Target Intercept et désigner l'objectif. Se placer en mode Realtime
- 2 - Coupler Map en OpMode Shared, donner l'objectif en référence et passer en mode Plan
- 3 - Agir sur TIn pour avoir PeA lu sur Map proche de l'altitude d'insertion souhaitée.
- 4 - Agir si il le faut sur TEj pour respecter la contrainte pour PeA au départ
- 5 - Passer sur Course en mode Off-Axis et activer le mode Offset et Vel. Frame
- 6 - Agir sur le positionnement du PeA à l'arrivée et sur l'inclinaison équatoriale EqI en modifiant Rad et Lat

2.1 - Correction en route

Nous allons faire une correction de trajectoire quand nous quittons la SOI de la Terre ($G < 0.5$ - voir page 6) en utilisant le module Target Intercept en mode Realtime qui convient pour les allumages de corrections de courte durée. (on passe en REF = Moon pour bien visualiser)
On se trouve à environ 160M de la Lune. PeA en particulier doit avoir varié.

- **Sélectionner Off-Axis et passer en Realtime (Important !) en utilisant +. Garder le mode Vel.Frame activé**
- Augmenter TEj sur Course (faire MOD si nécessaire) pour avoir 300 de façon à laisser un temps au vaisseau pour bien se positionner avant l'allumage
- Régler à nouveau Rad et Lat pour réajuster PeA et EqI lus sur Map, qui ont peut être un peu varié
- Faire l'allumage par AB



L'allumage prend moins de 1s ce qui montre la faible importance de la correction.

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.

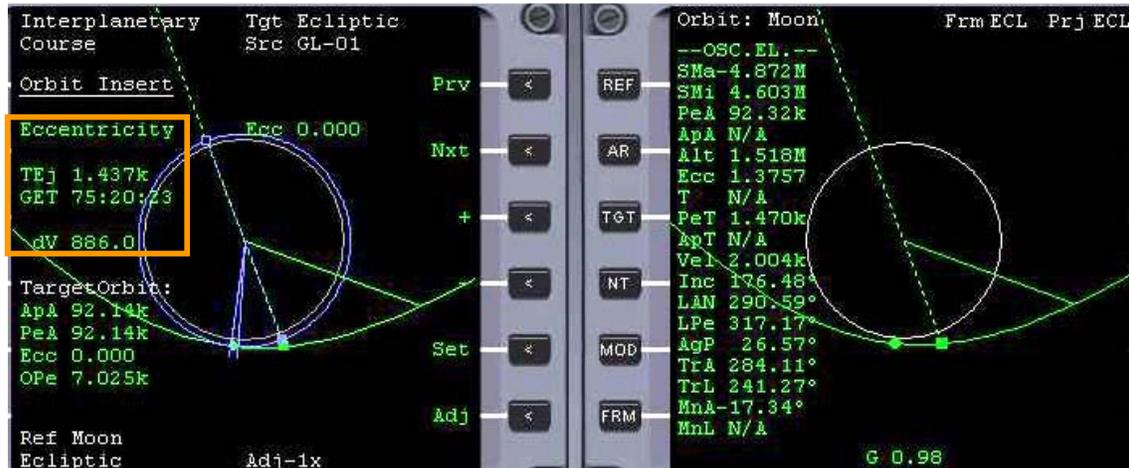
Il faut attendre que l'influence de la Lune soit supérieure à 0,40. On peut le voir en ouvrant le module Orbit standard sur le MFD de droite ou G est affiché ou attendre que le MFD Target Intercept affiche Invalid Source or reference... qui arrive à ce moment. Il faut faire alors Menu (touche en haut à droite) pour aller au menu Course et pouvoir sélectionner Orbit Insert.

- Choisir Orbit Insert
- **Set** pour valider le choix
- **Faire REF et choisir Moon si ce n'est pas le cas (Important !)**
- 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 aussi entrer une valeur différente de 0 pour l'excentricité si on veut une orbite elliptique.

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



Sur notre exemple on voit que l'on aura une orbite circulaire à un peu plus de 92.4k
Nous souhaitons 100k. Ce n'est pas trop mal après ce grand voyage !

On obtient en final une orbite quasi équatoriale, rétrograde (Est-Ouest) et circulaire à une altitude de 92.4k

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

2.5 – Mise en orbite lunaire elliptique

C'est le genre d'orbite utilisée dans les missions Apollo.

On peut réaliser ce type d'orbite en utilisant le module **Delta Velocity** au lieu de Orbit Insert bien que celui-ci permette de fixer une valeur d'excentricité..

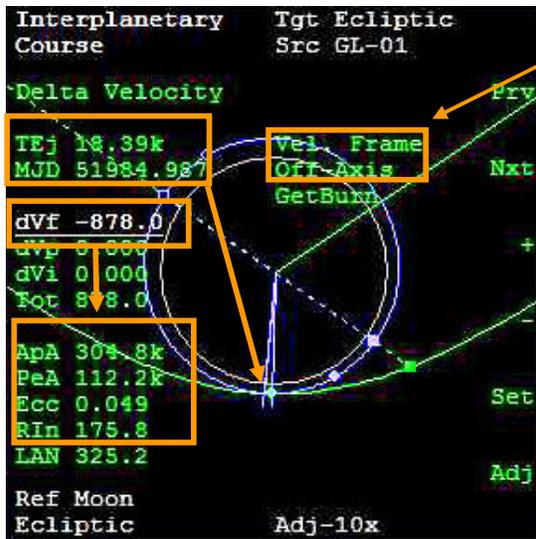
Ce module permet de faire varier en plus ou en moins trois composantes du vecteur vitesse suivant trois directions.

dVf positif donne une poussée en direction prograde et négatif il donne une poussée en direction rétrograde.

dVp donne une poussée perpendiculaire au plan d'orbite équivalent à N- si la valeur est positive et à N+ si la valeur est négative

dVi donne une poussée dans le plan de l'orbite vers l'intérieur de celle-ci si il est positif et vers l'extérieur si il est négatif. Il rend l'orbite asymétrique

On utilise le module comme avec Orbit Insert quand la Lune a une influence supérieure à 0.4.



- Se mettre en mode Vel.frame
- Faire varier TEj pour amener le point d'allumage à peu près au périgée en amenant le rayon bleu sur le point vert.. PeA doit être le plus petit possible
- Faire varier dVf en valeur négative pour diminuer Ecc jusqu'à ce que ApA soit proche de la valeur désirée (ici nous avons pris 300k environ pour notre ApA)
- Retoucher TEj si PeA a un peu varié et à nouveau dVf si ApA a un peu varié.

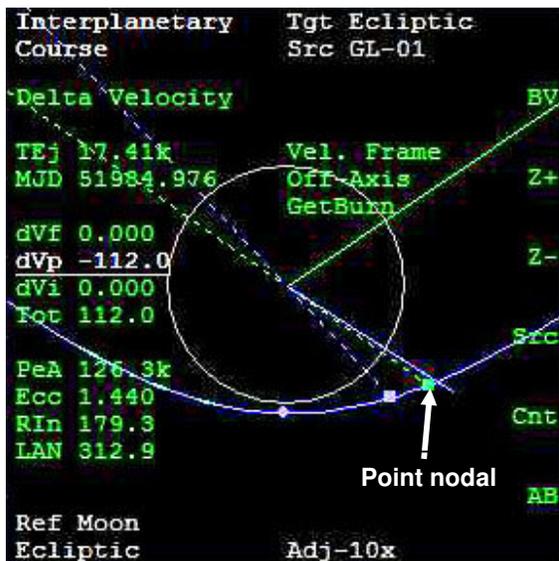
On obtient une orbite qui est figurée en bleu. Il ne reste plus qu'à passer en page 2 avec PG pour lancer AB

Attention ! Les données (ApA, PeA...) ne s'affichent que si TEj est au moins égal à 3s

Amélioration de l'inclinaison RIn du plan orbital

Delta Velocity permet aussi de le faire. Le meilleur moment pour l'allumage est lorsqu'on se trouve à un point nodal.

En reprenant l'approche au point où la Lune a une influence supérieure à 0.4 on trouve un point nodal sous forme de **carré vert** plein avant le périgée.



Faire varier TEj pour amener le point d'allumage au point nodal en faisant passer le rayon bleu par le carré vert

S'assurer que dVf = 0

Faire varier dVp pour obtenir la valeur désirée pour RIn (ici allumage N-)

Nous avons pris ici RIn = 179.3 pour passer juste au dessus de Tranquillity qui a une latitude nord sur la Lune de 0,69° (180-0,69=179,31)

Il reste à préparer l'allumage en passant en page 2 par PG et en faisant AB

Nous réalignons de 5° pour moins de 8 s d'allumage. Ça vaut le coup !

Ensuite on peut remettre dVp à 0 et préparer l'insertion en orbite comme nous l'avons vu ci avant.

Delta Velocity peut être utilisé au départ par exemple si on veut aligner le plan orbital. Ce n'est pas nécessaire si l'on a quelques degrés d'erreur comme dans notre cas comme nous utilisons Off Plane Intercept, mais ça peut être utile dans certains cas.

Voilà comment procéder

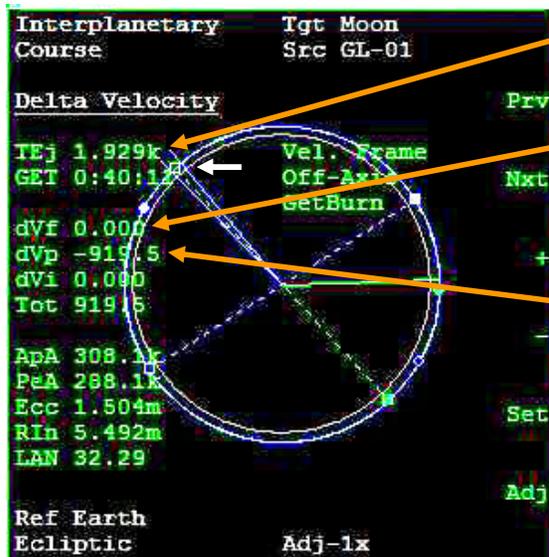
Repartons de la situation de départ en chargeant le scénario 01 – Départ pour la Lune.scn et larguons le Delta Glider

- Ouvrir Delta Velocity
- Faire TGT et entrer Moon pour désigner l'objectif
- S'assurer que Tej n'est pas nul en affichant 200 à 300 s si il le faut
- Utiliser Z+ plusieurs fois pour grossir la figure en zoomant sur la Terre
- Ouvrir Align Plane avec TGT = Moon sur l'autre MFD pour comparer



On voit que Rinc = 6,75 sur Align Plane se retrouve sur Delta Velocity (avec 3 décimales)
 On retrouve aussi la ligne nodale sur Delta Velocity en pointillé bleu, avec à chaque extrémité un carré bleu plein signalant le point ascendant AN et un carré bleu creux signalant le point descendant DN

Voilà qui est génial. Nous allons pouvoir aligner les plans orbitaux avec une grande précision et en automatique sans utiliser Align Plane !



Augmenter TEj pour amener le rayon bleu sur la ligne pointillée (on amène le futur point d'allumage sur le point nodal descendant.

Mettre DVf à 0 sinon on applique un petit peu de poussée prograde (il est à 10 par défaut)
 Les données (ApA, PeA...) disparaissent temporairement puisqu'on impose aucune variation de vitesse.

Modifier dVp pour appliquer une poussée Normale + ou - pour diminuer RIn le plus possible

Quand on ne peut plus diminuer RIn, retoucher un peu TEj pour le réduire encore

Répéter les opérations dVp, TEj jusqu'à avoir la valeur la plus faible possible pour RIn

Ci-dessus nous avons RIn = 5.492m, ce qui veut dire que l'écart relatif des plans serait de 0,005492 ° (m donne des millièmes) En fait il varie et il ne descendra qu'à 0,1 environ après allumage ce qui est déjà très bien.

Il n'y a plus qu'à lancer l'allumage automatique en faisant AB sur la page 2 appelée par PG.

Attention ! Ce réalignement prend 70 s d'allumage. N'oubliez pas qu'il vaut mieux soigner le lancement pour ne pas avoir si possible à faire ce genre d'opération en orbite circulaire basse. Un réalignement n'est pas du tout économique pour plus de quelques degrés.

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 Target-Intercept ne convient pas car nous sommes en orbite autour de la Lune et la Terre qui est la cible est en orbite autour du soleil (pas le même corps de référence).

Nous couplerons le module Map à Orbit Eject pour suivre les modifications de trajectoire.

3.1 – Recherche de la solution de tir

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

Nous sommes en orbite circulaire à 100k d'altitude

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**

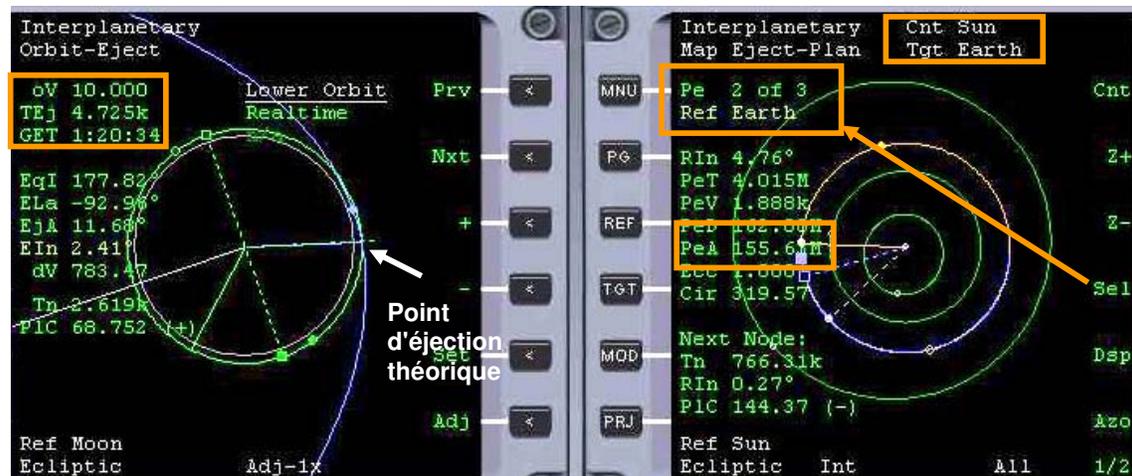
Le mode Lower Orbit nous donne une orbite d'éjection dans le sens opposé au déplacement de la planète autour du soleil.

Il est adapté pour partir vers "l'intérieur" de notre orbite et dans ce cas particulier pour le transfert Lune-Terre

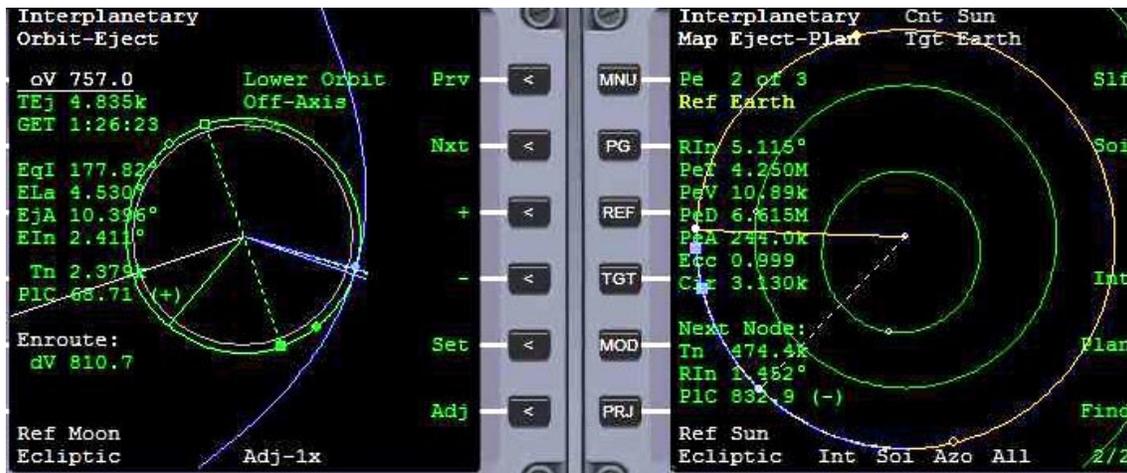
Sur le MFD de droite, afficher le module Map en OpMode Shared pour pouvoir contrôler la trajectoire d'approche en faisant:

- **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
- **TGT** puis entrer Earth comme objectif
- **Utiliser Sel** pour sélectionner Pe 2 of 3 Ref Earth pour que PeA corresponde au périégée de l'orbite à la Terre
- **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



- **Régler TEj** pour amener (si il ne s'y trouve pas déjà) le point d'éjection au point théorique correct. Se mettre en mode Off-Axis préférable pour une ejection
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 en page 8 avec un petit ennui en moins car il n'y a pas d'atmosphère
- **Augmenter oV** qui est la vitesse d'éjection pour avoir PeA sur Map réglé à la valeur la plus proche de la valeur désirée (réglage approché seulement possible) Ici nous avons pris 250k environ pour une mise en orbite à altitude moyenne. Ne pas oublier d'utiliser Adj pour faciliter le réglage
- **Régler à nouveau TEj** pour ramener le point d'éjection à la position correcte car il va probablement bouger.
- **Régler à nouveau finement oV** (Adj =1x) pour ajuster PeA le mieux possible.



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

Voilà le travail ! Avec un **AB** de moins de 54 s au départ (on peut le voir en faisant **BV**) nous allons pouvoir regagner notre Terre.

3.2 – Correction en route

Après l'allumage et en cours de route, **PeA** varie et il faudra une 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 sur 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 la latitude 28°52N. Nous prendrons ces valeurs pour l'approche.

Nous utiliserons le module **Planet Approach**. (nous aurions aussi pu l'utiliser à l'aller)

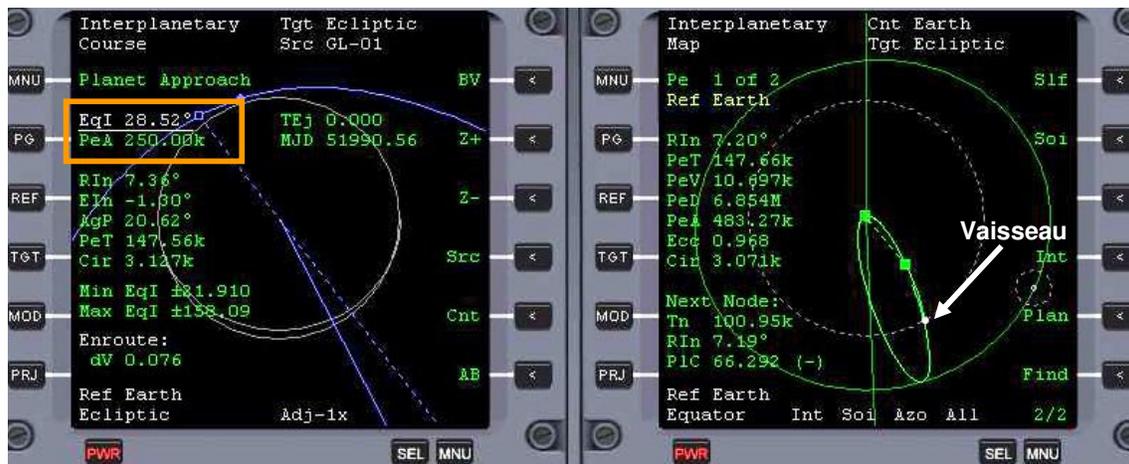
- Ouvrir Planet Approach en remplacement de Orbit Eject
- Faire **REF** puis entrer **Earth** (**attention c'est important d'avoir la bonne référence !**)
- Sélectionner **EqI** et **PeA** et entrer les valeurs 28.52 et 250k

Rappelons qu'une Latitude se rentre en positif si elle est Nord(N) et en négatif si elle est Sud(S) et qu'une Longitude se rentre en positif si elle est Est (E) et en négatif si elle est Ouest(W)

- Faire REF sur Map et entrer Earth pour centrer sur la Terre
- Contrôler sur Map le moment où le vaisseau entre dans la sphère d'influence (cercle en pointillé) et lancer l'Auto Burn sur le module Planet Approach

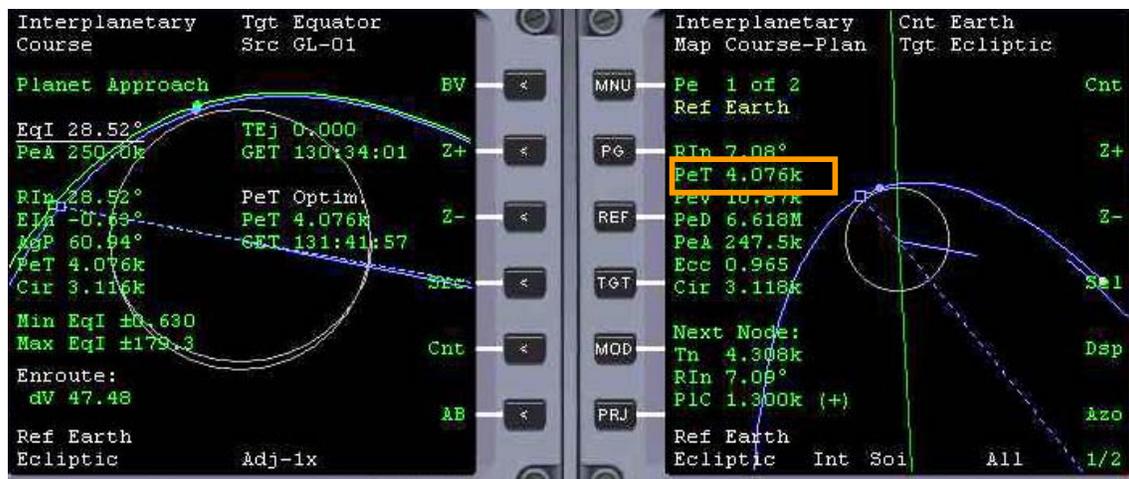
Min EqI et Max EqI donnent en + et en – la plage des valeurs admissibles pour le réglage de EqI.

Elle varie au fur et à mesure de l'approche comme on peut le voir sur les deux figures qui suivent.



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

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. Éviter de passer en accéléré pendant un allumage court.



3.3 – Correction en approche

En arrivant près de la Terre à une distance d'environ 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 Planet Approach et c'est bon ! PeA = 250k environ et la trajectoire a une inclinaison qui permettra de passer au dessus de Cape Canaveral Le temps d'allumage est inférieur à 4s.

3.4 – Mise en orbite terrestre

Insérer avec Orbit Insert ou Delta Velocity comme nous l'avons fait pour la Lune au § 2.5 et nous avons une orbite qui peut passer sur le Cape à 250 km d'altitude après quelques tours. Nous sommes de retour au bercail et il ne restera plus qu'à atterrir mais c'est une autre histoire !

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 (prendre au moins 150k) 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 3 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 en route avec le module Target Intercept

Les scénarios

03 - Correction MCC Lune-Terre

04 – En orbite terrestre

vous placent dans ces situations et peuvent vous servir pour faire d'autres essais

3.5 - Variante pour les corrections

Comme nous sommes près de la Terre (distance < 3xSOI) et sous son influence (comme la Lune) nous pouvons utiliser aussi le module Base Approach pour faire les corrections.

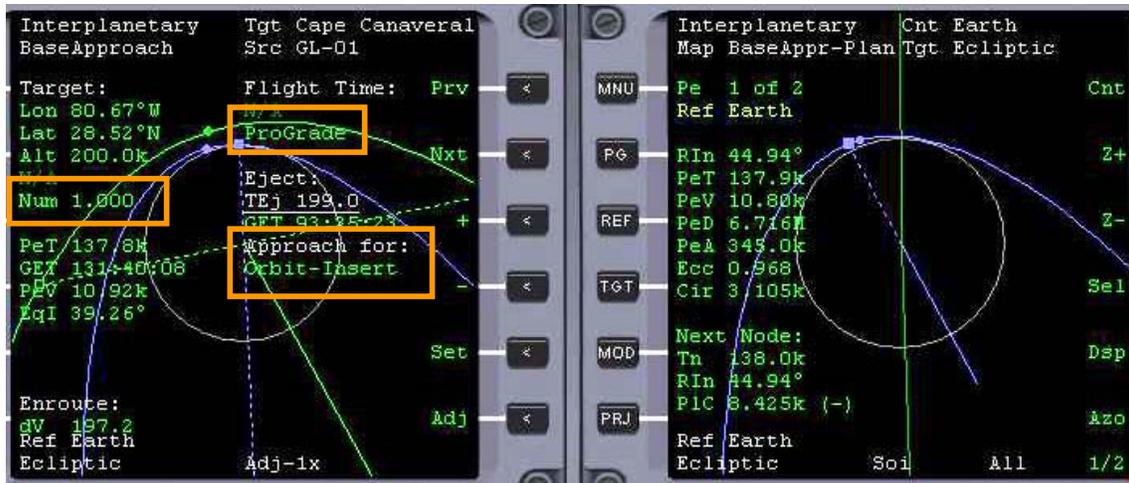
Il permet d'atteindre une base (nous prendrons Cape Canaveral pour l'exemple) en se synchronisant sur elle à l'altitude désirée après un nombre de tour que l'on peut fixer.

Deux choses sont possibles;

- Utiliser Base-Approach en mode **Orbit Insert** pour une simple mise en Orbite
- Utiliser Base-Approach en mode **ReEntry** pour prévoir une orbite de rentrée et régler la pente de pénétration en atmosphère si il y en a une.

Nous utiliserons le Mode Orbit-Insert. Nous verrons plus loin pour le mode ReEntry

- Ouvrir **Base-Approach** quand on pénètre dans la SOI de la Terre
- Faire **TGT** et entrer Cape Canaveral puis valider par Enter ou, sélectionner tour à tour Lon et Lat en faisant ensuite Set pour entrer les valeurs correctes (voir page 16 pour le signe)
- **Sélectionner Alt** et entrer l'altitude désirée soit en utilisant + et – soit en utilisant Set pour entrer directement la valeur. 200k permet de rester au dessus de l'atmosphère



- Faire une deuxième correction vers PeT=4000 puis une mise en orbite circulaire comme nous l'avons déjà fait après Planet-Approach (§ 3.4)

Notre trajectoire passera au dessus de la base après le nombre de tours spécifiés avec Num comme on peut le voir en ouvrant Map standard

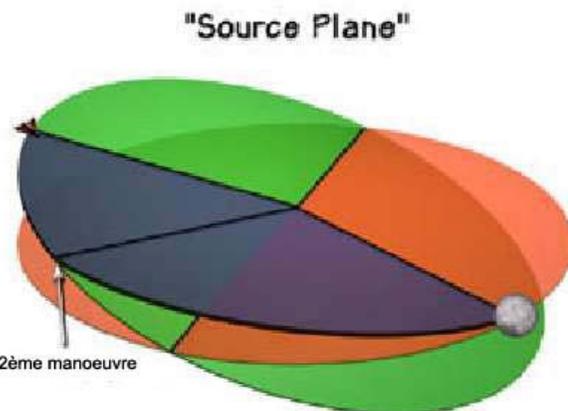
On peut prendre pour Num une valeur différente de 0 pour se synchroniser après un ou plusieurs tours si on le désire.

Comme signalé plus haut il est bon de prendre environ 200s pour TEj avant de lancer l'allumage pour que le vaisseau ait le temps de se positionner à T-180s (voir nota page 17)

On peut choisir une insertion en mode Prograde ou Retrograde.

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

Nous utiliserons cette variante de transfert pour nous entraîner bien qu'elle ne soit pas vraiment adaptée à un voyage Terre-Lune



La source suit son orbite pendant un certain temps puis une deuxième manoeuvre permet un changement de plan pour rejoindre l'objectif par une orbite de type Off-Plane Intercept

De façon normale, la deuxième manoeuvre se fait 90° avant le point d'interception de l'objectif

*Dès la fin du premier allumage, on peut se préparer à l'allumage automatique du deuxième en utilisant **Prep PIC***

Charger le scénario 01 – Départ pour la Lune et dédoker le DG

- Ouvrir à gauche Target Intercept comme en 2.1 mais en choisissant le mode Source-Plane



La solution proposée est bonne mais donne un temps de voyage de 5 jours, ce qui est long. On peut diminuer Tin si on le désire

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

Tn est le temps pour atteindre le deuxième point d'allumage.

On peut réduire Tin en surveillant BT pour qu'il reste raisonnable

Il faut que Tn soit supérieur à la valeur de TEj augmentée du premier temps d'allumage + 180 si on ne veut pas risquer un disfonctionnement, car on ferait un allumage PIC avant d'arrêter le précédent.

Cet exemple n'est pas à suivre normalement pour un si petit voyage mais c'est pour le sport ! Il suffira de faire une correction près de l'arrivée avec Planet Approach ou Base Approach pour ne pas percuter la Lune puis de faire une insertion en orbite.

5 - DE LA TERRE A MARS

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

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

Nous verrons à l'occasion du retour de Mars comment trouver une fenêtre de tir favorable.

Le scénario

05 – Départ pour Mars

vous place le 9 juin 2003 en fin de journée, dédocké de Mir et prêt à partir

5.1 – Solution de tir

Nous voyageons entre deux planètes orbitant autour d'une même référence (le Soleil) et nous pouvons chercher la solution avec Target Intercept et faire l'allumage avec le module Orbit-Eject couplé à Target Intercept.

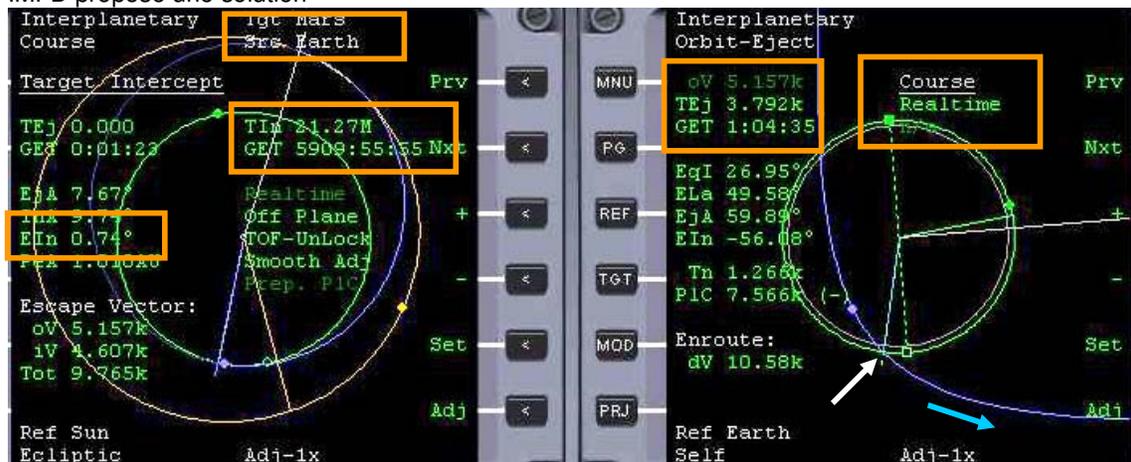
Sur le MFD à gauche, ouvrir le module Target Intercept en faisant:

- **PWR (ou Shift gauche+Echap) → SEL (n fois) → Interplanetary → MNU** → sélection du module Target-Intercept → Set
- **Faire TGT et entrer Mars**
- **Choisir le mode Off-Plane** qui convient à ce type de voyage et n'impose pas un alignement des plans

Sur le MFD à droite, ouvrir le module Orbit-Eject en faisant:

- **PWR (ou Shift droit+Echap) → SEL (n fois) → Interplanetary → MNU**
- **PG** et entrer 0 pour coupler au premier MFD en OpMode Shared
- **Sélectionner Orbit-Eject** pour ouvrir le module
- **Choisir le mode Course** pour définir la source des données de tir et Off-Axis

IMFD propose une solution



Que remarque t-on ?

La source Src pour calculer la trajectoire est Earth (la Terre). Ça peut paraître bizarre mais pour IMFD le calcul se fait entre deux corps gravitant autour d'un même astre de référence qui est ici Sun (le Soleil) donc il considère que le vaisseau est la Terre. C'est ce qui explique qu'on ne peut pas utiliser BV sur Target Intercept puisque la Terre n'a pas de moteur. Quand on va de la Terre à la Lune il prend le vaisseau comme source puis qu'il gravite comme la Lune autour de la Terre qui est la référence.

Le temps du voyage $T_{in}=21.27M=21270000s$ soit environ 246 jours (1jour=86400s) ou 8 mois ce qui est long pour un voyage optimisé à la distance la plus courte possible

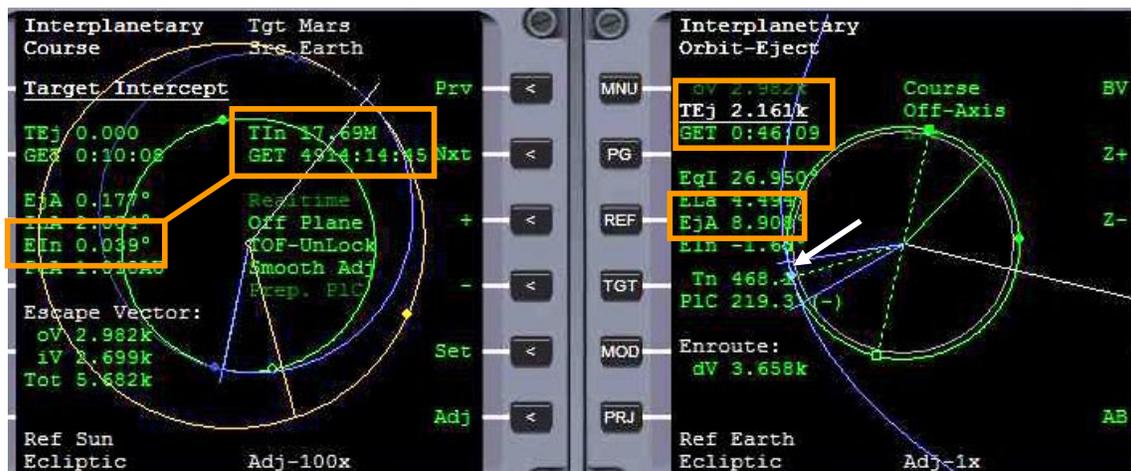
EIn est différent de 0, ce qui veut dire que les plans orbitaux ne sont pas très alignés

On peut voir en faisant BV sur Orbit-Eject que le temps de combustion BT =710s

Le point d'allumage (flèche blanche) est placé automatiquement au bout du rayon pointillé et l'orbite en bleu ne coupe pas l'atmosphère puisqu'on part dans le sens de la flèche bleue.

Cette solution fonctionne mais n'optimise pas le temps de trajet et le temps de combustion et il va falloir faire des ajustements pour optimiser:

- Faire varier Tin pour réduire BT le plus possible
- Faire varier TEj sur Orbit-Eject pour que le point d'éjection (flèche blanche) soit au bout du rayon vert pointillé. EjA est à sa valeur minimum à ce moment et le rayon bleu et le rayon vert sont superposés



Le temps du voyage est maintenant de 17.69M (17610000 s) ce qui donne environ 204 jours. Nous avons gagné 42 jours (on ne mourra pas de faim avec le surplus de nourriture !) et le temps d'allumage n'est plus que de 264s.

Il n'y a plus qu'à préparer l'allumage en faisant AB sur Orbit-Eject et Mars est à nous !

Faites l'essai sans faire de correction en route et vous passerez à moins de 300M de Mars (moins que la distance Terre Lune ce qui est plutôt bien.

Vous pouvez accélérer à 100000x

Le scénario

06 – Solution de tir pour Mars

vous place dans cette situation en attente de départ

5.2 – Correction à mi-course

Nous sommes en route et nous allons utiliser Target Intercept pour corriger à mi course

Orbit-Eject va afficher "Have a nice voyage" peut de temps après le départ et n'a plus aucune utilité Nous le remplacerons par le module Map avec Mars comme référence

Si vous avez lu mon explication page 21 vous avez vu que IMFD calcule la trajectoire entre deux corps gravitant autour d'un même corps de référence.

Maintenant que nous sommes en route notre vaisseau a une orbite héliocentrique (référence au soleil) de même que Mars et non plus une orbite autour de la Terre.

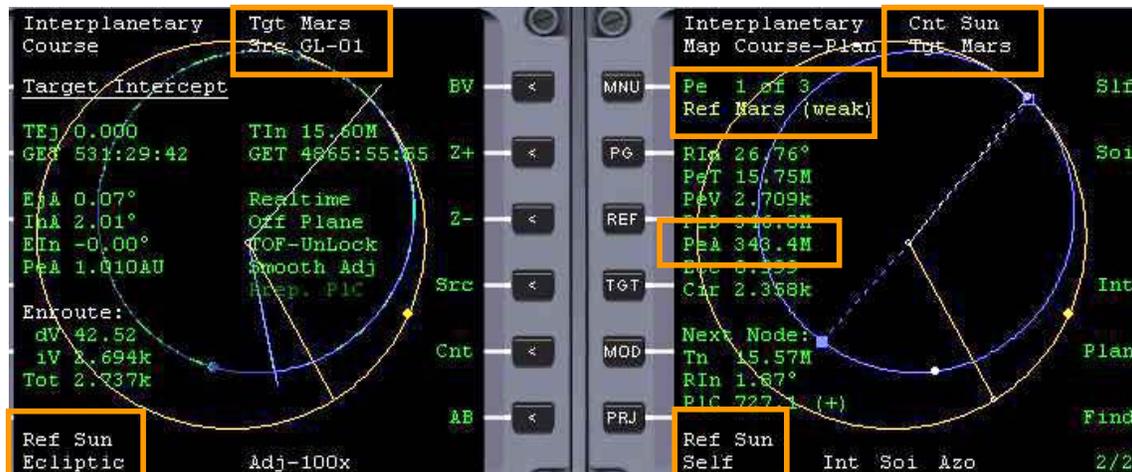
Sur Target Intercept on doit donc prendre le vaisseau comme source

- **Faire PG** pour être en deuxième page
- **Faire Src** pour choisir la source et entrer X (désigne le vaisseau par défaut. On peut aussi entrer son nom DG-01

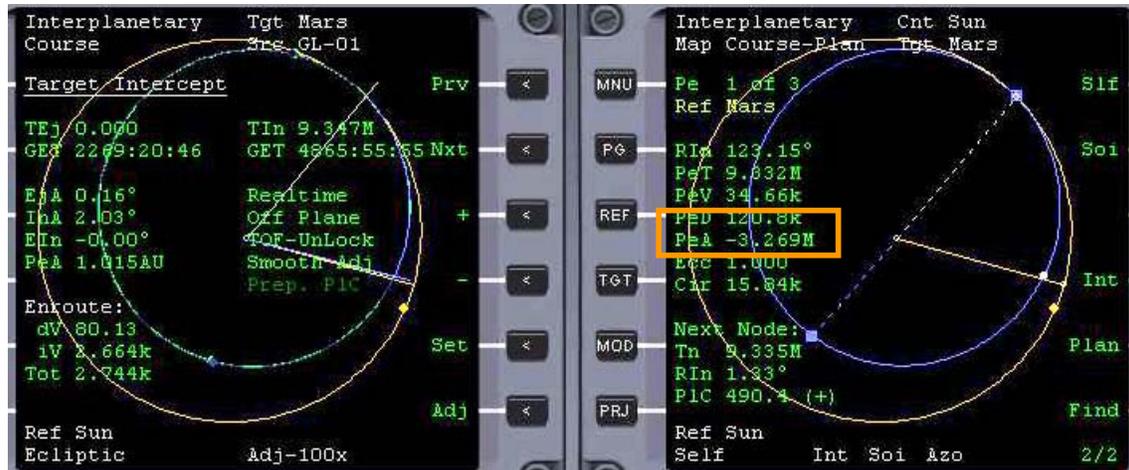
PeA va un peu se modifier en cours de trajet au fur et à mesure que la distance avant l'arrivée diminue et il ne faut pas s'inquiéter.

On voit par exemple sur la figure ci-dessous que PeA pour Pe 1 of 3 Ref Mars est de 340.4M et donc donné pour "Weak" au sens de faible ou trop éloigné.

C'est moins que la distance Terre-Lune mais nous allons corriger à mi course



Attendons que PeT sur Map soit aux alentours de 9M (le temps total prévu était de 17.7M environ) pour faire la correction. Nous sommes encore assez loin et elle ne coûtera pas trop cher en carburant.



Faire l'allumage par AB sans modifier les paramètres. $BT < 8s$ c'est économique !
 On peut voir sur Map que $PeA = -3.269M$ (chiffre négatif) ce qui veut dire que l'on impactera la planète.
 C'est normal car IMFD fait un calcul d'interception au centre.
 A ce point du voyage une correction ne serait même pas nécessaire car on ne peut pas à cette distance améliorer finement la précision d'approche.

Le scénario
07 – Mi course de Mars
 vous permettra de vous entraîner pour les corrections

5.3 – Correction en approche

Nous allons affiner l'approche en utilisant le module Planet-Approach qui nous permet de choisir une altitude d'insertion et une inclinaison Eql

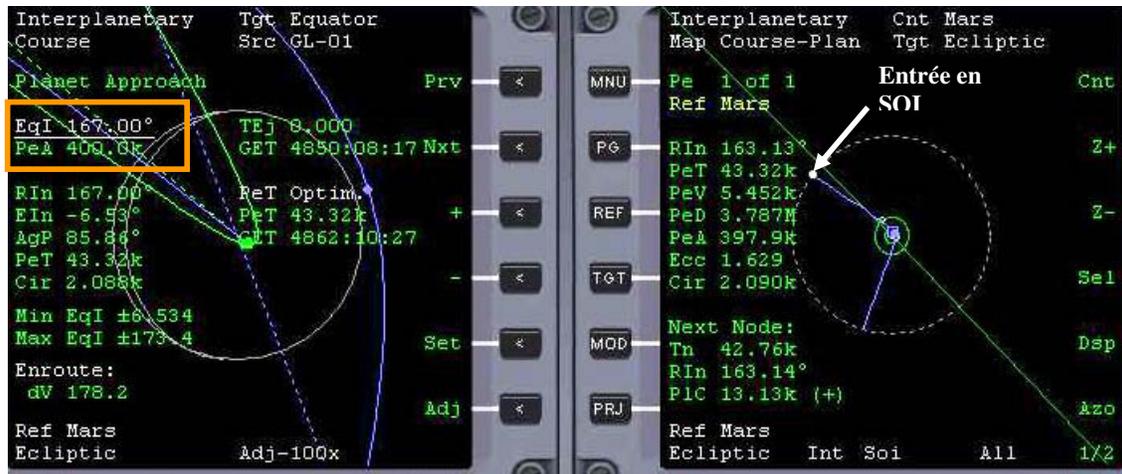
Il est préférable de faire la correction près de la planète au moment où on entre dans la SOI qui est le cercle pointillé sur Map. On se trouve alors à environ à la distance de 100M de Mars ($G=0.5$ sur le module Map standard avec référence Mars)

Pour économiser du carburant il est possible de faire une première correction à 2 ou 3 fois la SOI. On peut par exemple faire une correction quand on se trouve à 300M lu sur le HUD et faire une deuxième correction pour améliorer la précision quand on se trouve à 30M.

- **Ouvrir Planet Approach** à la place de Target Intercept
- **Faire REF et entrer Mars** si ce n'est pas le cas (vous aurez sûrement Sun)
Attention il est très important de s'assurer que l'on a la bonne planète en référence !
- **Sélectionner PeA** et entrer 400k (assez haut pour bien voir le panorama)
- **Sélectionner Eql** et entrer par exemple -167 pour une insertion rétrograde par le sud avec une orbite permettant d'atteindre la latitude $180-167=13^\circ$ suffisante pour se poser à la base Olympus (Latitude $12^\circ 74'$)
- Faire l'allumage par AB.
 On peut modifier TEj pour entrer 200s avant de faire AB pour que le vaisseau soit positionné et stabilisé avant l'allumage.

Une insertion rétrograde permet d'économiser du carburant à la mise en orbite car on bénéficie de l'attraction de la planète pour nous "ralentir", sa vitesse sur orbite diminuant notre vitesse relative d'arrivée.

Le scénario
08 – Approche de Mars vous permettra de vous entraîner pour les corrections



5.4 – Mise en orbite

La mise en orbite se fait en utilisant le module Orbit-Insert ou Delta Velocity comme nous l'avons fait pour la Lune.

En utilisant Orbit-Insert on réalise la mise en orbite circulaire sans aucun réglage à l'altitude du périhélie prévu. Le module est opérationnel à partir de l'entrée dans la SOI.

- Prv/Nxt pour sélectionner Planet Approach
- + pour revenir au menu Course
- Sélectionner Orbit-Insert et Set pour valider
- Faire REF et entrer Mars si ce n'est pas le cas (**Important**)
- Faire AB pour préparer l'allumage automatique



Il n'y a plus qu'à patienter pour l'insertion et notre orbite pourra passer au dessus de la base après quelques tours. BT<14s

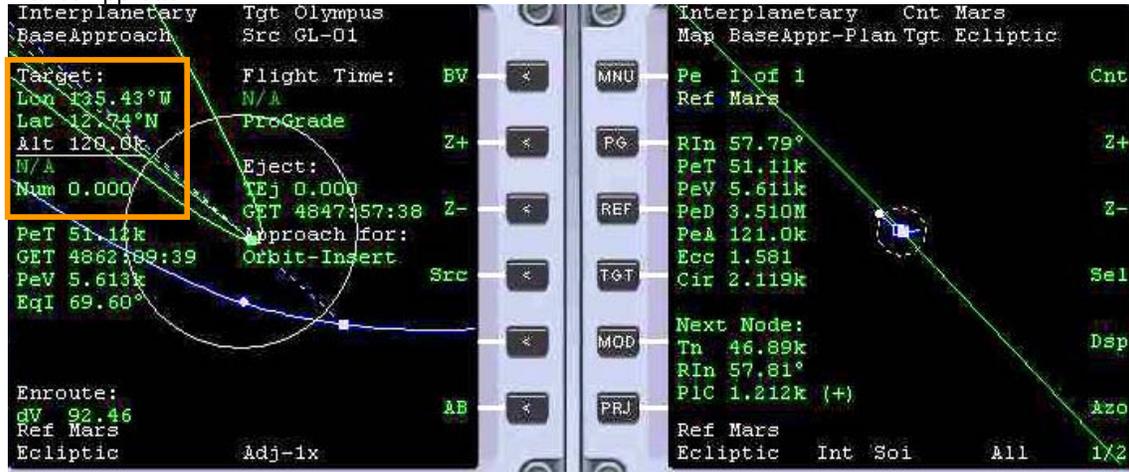
On peut aussi faire varier Ecc ou utiliser Delta Velocity pour l'insertion si l'on désire une orbite elliptique

Pour faciliter vos réglages n'oubliez pas d'utiliser Adj et le zoom par Z- et Z+. N'oubliez pas non plus qu'un clic maintenu sur + ou - pour un réglage permet d'avancer en boucle répétitive.

Le scénario 09 – En orbite martienne
 vous place en orbite pour admirer Mars et vous pouvez essayer de vous y poser. Il nous servira pour rechercher une fenêtre favorable pour le retour
 Nous sommes le 29 décembre 2003

5.5 – Variante pour l'approche

Si on désire une synchronisation avec une base au sol on peut utiliser Base-Approach au lieu de Planet-Approach.



Il faut sélectionner et régler Alt, Lon et Lat aux valeurs choisies. Ici Lat et Lon correspondent à la base Olympus. (on peut aussi faire TGT et entrer Olympus comme objectif)

Après cette correction on prépare l'insertion comme précédemment en utilisant Orbit-Insert pour avoir une orbite circulaire respectant bien la synchronisation.

Avec Num=0 le passage sur la base à lieu dès le premier tour. Essayez c'est superbe de précision !

5.5 – Autre façon pour chercher la solution de tir

Il y a une autre possibilité moins pratique pour trouver une solution qui consiste à utiliser Orbit-Eject pour les réglages en couplant Map pour voir le résultat.

Comme nous l'avons déjà dit, pour tirer vers une planète d'orbite extérieure à celle d'où l'on part, il faut utiliser le module **Orbit-Eject** en mode **Higher Orbit**

Nous couplerons le module Map en OpMode Shared avec ce module

Vous devez savoir faire les manœuvres maintenant et je simplifie !

- Charger le scénario 05 – Départ pour Mars
- Sur le MFD gauche ouvrir le module **Orbit-Eject** en mode Off-Axis qui convient pour un temps d'allumage assez long en éjection
- Sur le module MFD de droite, ouvrir le module **Map** couplé à Orbit-Eject en OpMode Shared, mettre en mode Plan avec Mars comme objectif et Pe 3 of 3 Ref Mars

Un mot sur l'orbite!

C'est une orbite héliocentrique autour du soleil (Sun) comme référence, elle est elliptique 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.

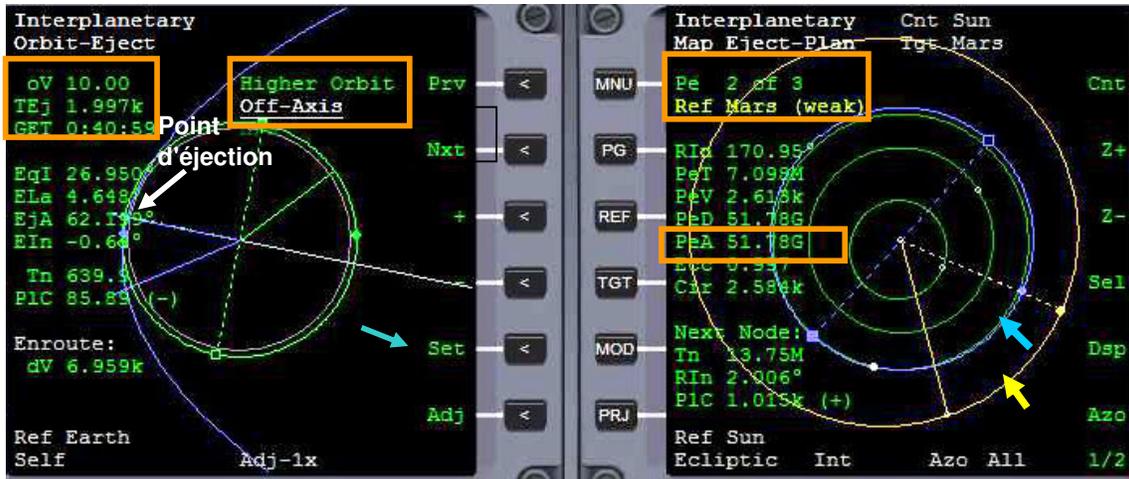
*C'est ce qui explique qu'avec **Sel** on peut afficher 3 valeurs: Pe ou Ap avec Ref Sun et Pe avec Ref Mars.*

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

Cette orbite elliptique par rapport au soleil devient une orbite hyperbolique ("ouverte") si on prend l'objectif comme référence.

On peut le voir en ouvrant le module Orbit standard pendant le trajet. Si le soleil est la référence l'orbite est elliptique avec PeA et ApA ayant une valeur finie. Si Mars est la référence, l'orbite est "ouverte"-on voit presque une droite) et ApA a pour valeur N/A ce qui veut dire qu'on ne peut pas lui en donner et qu'elle est considérée comme infinie.

On obtient sans réglages :



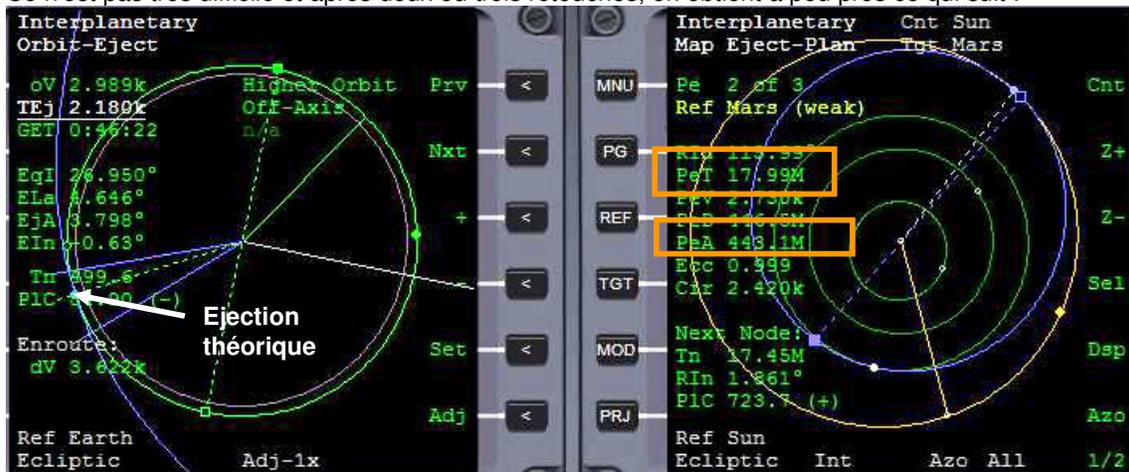
Sur Map on voit que l'orbite d'éjection (voir flèche bleue) ne coupe pas l'orbite de Mars (voir flèche jaune) ce qui est normal puisque oV dans Orbit Eject est seulement égal à 10 par défaut et nous n'avons pas encore prévu d'augmentation de la vitesse pour l'éjection.

PeA au Pe Ref Mars est donc très grand (>51G), ce qui n'est pas surprenant.

1G = 1000M = 1000000 km c'est à dire environ 2,6 fois la distance Terre-Lune

- **Sélectionner oV** et l'augmenter pour diminuer PeA sur Plan le plus possible au moins en dessous de 5G (**attention a bien avoir choisis Pe 1 of 3 Ref Mars**)
Sur un voyage aussi long que Terre-Mars une erreur de calcul initial sur PeA inférieure à 5G est acceptable et la correction en route sera facile, mais on peut faire mieux
Le rayon bleu correspondant au point où sera le vaisseau au point de rencontre devrait se superposer au rayon pointillé jaune qui correspond à la position de Mars à ce moment (idéal !)
- **Sélectionner TEj** et modifier le temps pour amener le point d'éjection au bout du rayon vert pointillé (flèche blanche ci-dessous) qui est la position calculée idéale. Le rayon vert pointillé se trouve alors à peu près au milieu du quadrant délimité par les deux rayons bleus et EjA doit être le plus petit possible
- Retoucher successivement oV et TEj (avec Adj=1x) pour réduire PeA au minimum possible

Ce n'est pas très difficile et 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 = 443.1M (443100 km) et le temps de transfert pour y arriver qui est PeT = 17.990M = 17990000 s = environ 208 jours (1 jour = 86400 s)
BT = 264 s

On passera en théorie à 443100 km de Mars (un peu plus que la distance Terre Lune) 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)

On peut considérer que si on obtient $PeA < 5G$, c'est déjà satisfaisant et on fera les corrections en route.

Le temps de voyage prévu sera de 208 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 avec le vecteur d'échappement dans le plan de notre orbite ce qui minimise le temps d'allumage.

On voit sur Orbit-Eject qu'à environ $Tn = 499$ s il faut faire un allumage en position NORMAL – (indiqué par (-))si on veut aligner. Faisons le en surveillant EIn . Allumer doucement, ça change vite !

Cette correction ne sert pas à grand-chose dans notre exemple mais c'est pour le sport.

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.

Il ne restera plus qu'à corriger comme précédemment....

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

- Ouvrir Orbit-Eject sur un MFD et choisir le mode Off-Axis
- 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 ou aller vers un satellite de la planète ou on se trouve
- Ouvrir Map sur l'autre MFD en le couplant en OpMode Shared et sélectionner l'objectif, le mode intersection Int et le mode Plan
- Réduire la valeur de l'altitude PeA lue sur Map au périégée de l'objectif 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
 - 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

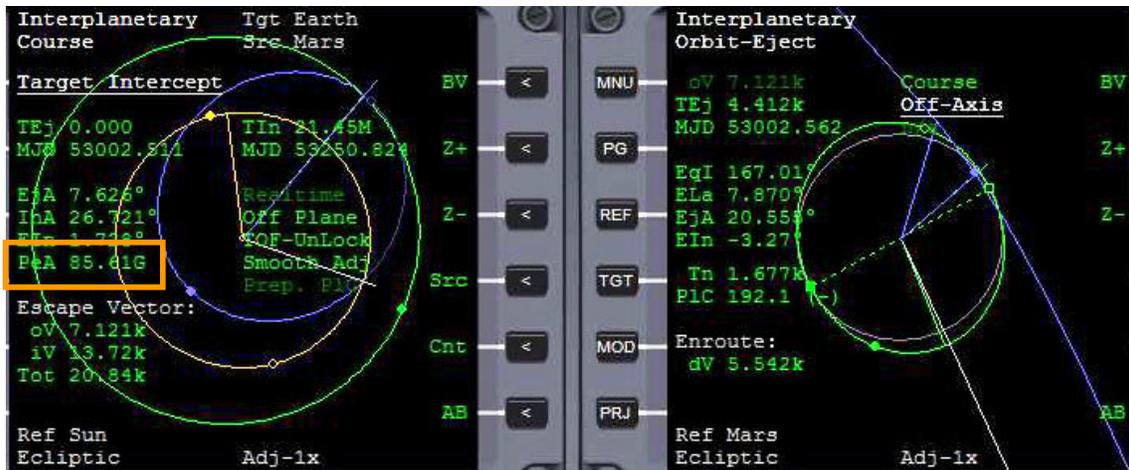
6.1 – Recherche de la solution de tir

Charger le scénario 09 – En orbite martienne à partir duquel nous allons chercher la solution la plus favorable

Je simplifie, vous devez maintenant connaître les manœuvres de base !

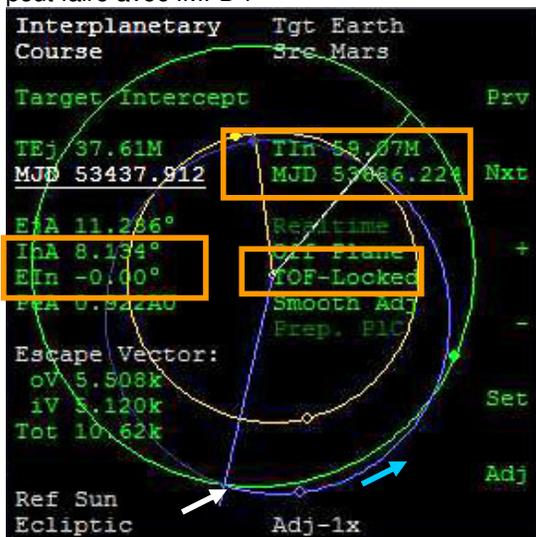
- Sur le MFD de gauche ouvrir Target Intercept en mode Off-Plane avec comme objectif Earth
- Sur le MFD de droite, ouvrir Orbit-eject en OpMode Shared ID = 0 (couplé sur Course) et en mode Off-Axis (allumage long)
- Passer en mode Course puisque nous voulons nous coupler au module du programme Course

Nous allons utiliser MJD au lieu de GET pour accélérer les réglages en modifiant Mission Timer dans le menu Global Configuration. (voir comment faire dans la partie Théorie)



Cette solution n'est pas mauvaise avec un temps de transport de 21.45M soit environ 248 jours et un temps d'allumage de 340s. Elle a cependant un inconvénient en dehors du fait que le voyage dure plus de 8 mois c'est qu'elle nous fait passer à la distance 85.6 G du soleil et nous aurions chaud pendant une grande partie du trajet (voyez l'orbite bleue qui est pendant 2/3 du trajet plus près du soleil que l'orbite terrestre)

Nous allons chercher quel serait l'instant le plus favorable pour le départ. Vous allez voir ce que l'on peut faire avec IMFD !



1^{ère} phase :

- Sélectionner TOF-Unlock et le changer en TOF-Locked pour garder constant l'écart Tin-TEj
- Faire varier Tin (ou MJD) en jouant sur Adj pour réduire EIn à 0 et avoir un tir plus économique dans le plan de l'objectif.

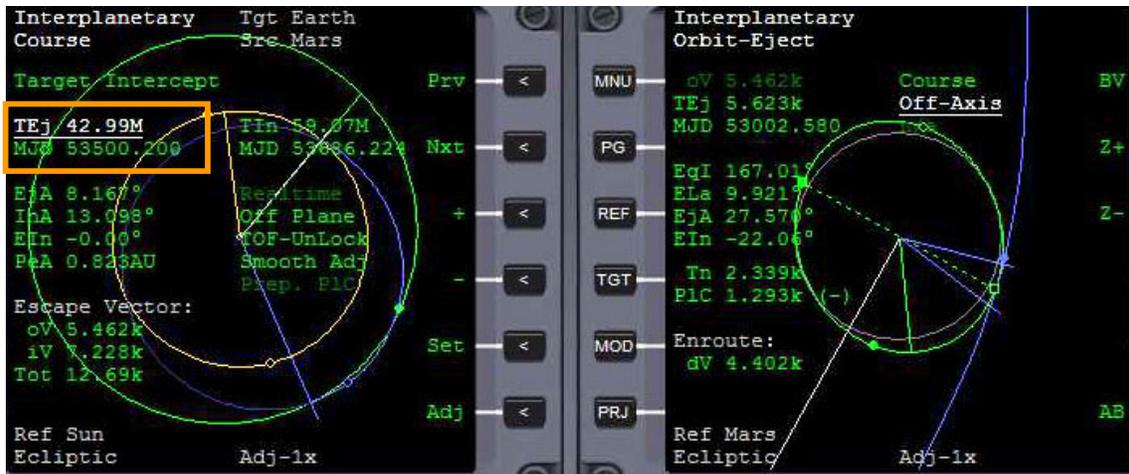
Il faut augmenter Tin suffisamment pour que la trajectoire ne coupe pas l'orbite de la Terre en jaune (on part de la flèche blanche dans le sens de la flèche bleue)

2^{ème} phase (figure suivante)

- Sélectionner TOF-Locked et le changer en TOF-Unlock
- Faire varier TEj pour que Tin-TEj soit de l'ordre de 14 à 17M. Un voyage prend normalement 5 à 6 mois dans des bonnes conditions.

Ici nous avons pris Tin-TEj #16M ce qui donne environ 185 jours.

On pourrait faire moins mais le temps d'allumage augmente et peut être grand. A vous de voir !



Cette solution est un lancement dans une fenêtre favorable pour un trajet réduit et un temps d'allumage assez faible. Dans le module Orbit-Eject on peut éventuellement faire un réglage pour que le point d'éjection soit bien placé (voir page 21) BT (appelé par BV) est de 273s environ.

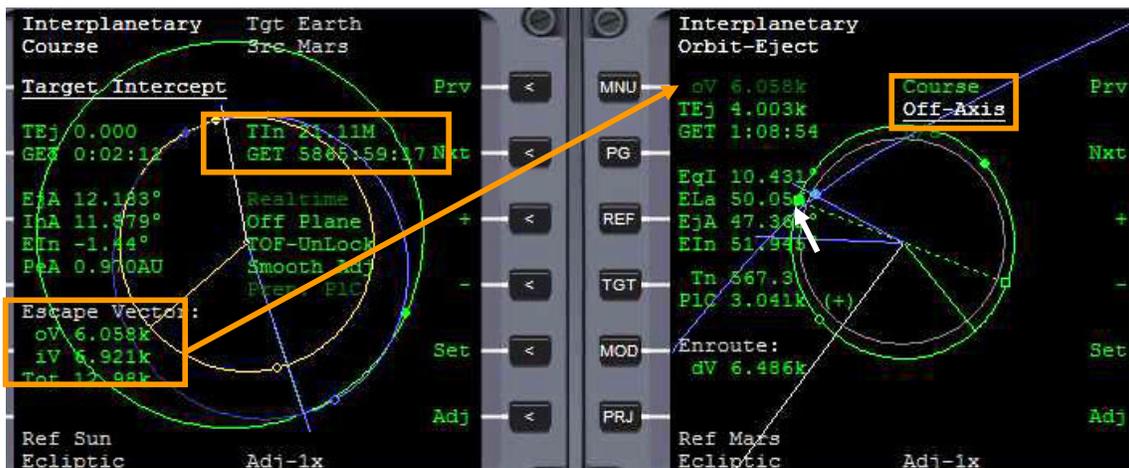
Si on voulait partir de cette situation, il faudrait attendre jusqu'à $TEj = 43M = 497$ jours # 16.6 mois avant de lancer ce qui serait fastidieux même en accéléré.

$MJD = 53501$ correspond au 31 mai 2005 comme on peut le voir en utilisant Data.exe qui se trouve dans le dossier Utils d'Orbiter et il suffit de créer un scénario avec $MJD = 53500$ pour être un jour avant le départ idéal et refaire le calcul de trajectoire.

Comme il serait long d'attendre le départ nous allons utiliser le scénario 10 – Retour de Mars vers la Terre Il nous place en orbite martienne le 30 mai 2005 pour chercher la solution

6.1 – Recherche de la solution

- 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 OpMode Shared et en mode Off-Axis
- Passer en mode Course puisque nous voulons nous coupler au module du programme Course.



Que voyons nous sur les MFD ?

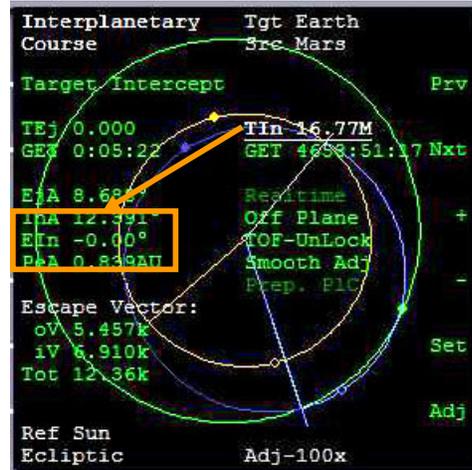
Temps de voyage $Tin = 21.11M$ donnant 244 jours de voyage avec un vecteur d'échappement $oV = 6.057k$ qui s'est transmis à Orbit-Eject (non modifiable en raison du mode Course)
 EIn n'est pas nul et le vecteur d'allumage n'est pas dans le plan de l'orbite

Le temps d'allumage calculé est BT=385s et du fait que Eln n'est pas nul il n'est pas optimisé. Comme nous l'avons déjà vu Src=Mars sur Target-Intercept comme si on lançait la planète de départ.

- **Sélectionner Tin et le modifier** pour réduire Eln à 0
- Sur Orbit Eject faire varier TEj pour que EjA soit le plus petit possible pour avoir le meilleur point d'allumage

Avec BV on peut voir que le temps BT d'allumage est inférieur à 251s
Le temps de voyage Tin = 16.77M = 194 jours d'où un gain de 50 jours.

- **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 et on a Sun comme planète de référence commune au vaisseau et à la Terre. **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 = 188.7M = 188700 km. Ceci parait beaucoup mais c'est une excellente précision car c'est moins que la distance Terre-Lune et nous corrigerons en route comme à l'aller

Temps prévu de parcours = 16740000 s soit 194 jours environ. Comme à l'aller, nous réduirons au moment des corrections si nous le désirons

6.2 – Correction à mi-course

On peut corriger à mi-course comme à l'aller quand Tin est d'environ 8.5M moitié du temps de 16.74M prévu au départ.

Il suffit de demander l'allumage automatique par AB sur Planet-Intercept sans rien changer.

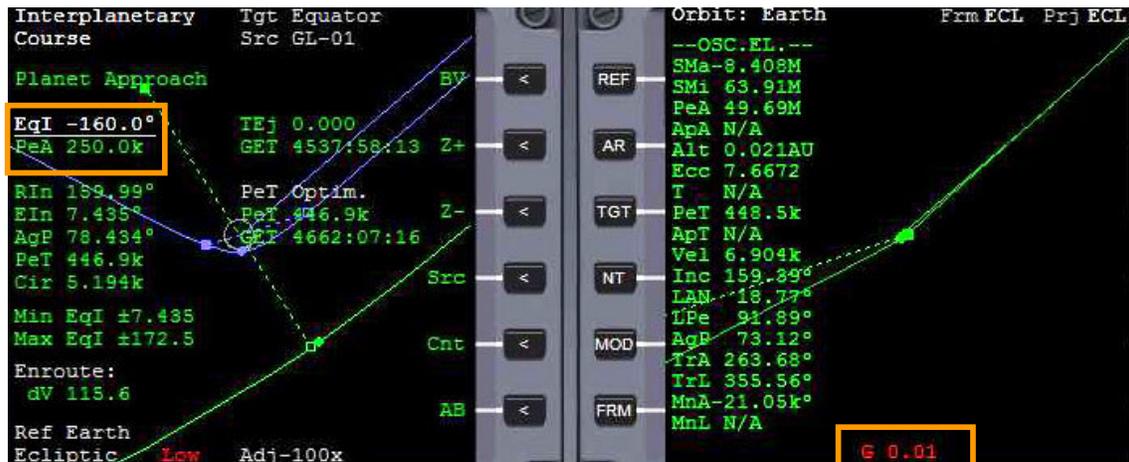
La correction donne BT < 3s

On pourrait faire varier Tin pour réduire PeA sur Map à une valeur proche de celle que l'on désire pour l'insertion mais nous sommes loin de l'arrivée. Une telle correction ne serait pas très efficace et consommerait du carburant inutilement.
Il vaut mieux faire une ou deux corrections en approche

6.3 – Corrections en approche

On fera la ou les corrections en utilisant Planet-Approach ou Base-Approach comme pour l'aller.
Bien s'assurer que la référence est Earth (elle sera probablement Sun à l'ouverture du module)
Ne pas prendre d'altitude d'insertion inférieure à 250k pour ne pas risquer de rentrer dans l'atmosphère.

Il est bien de faire une première correction quand la Terre commence à avoir un peu d'influence ($G > 0$ sur Orbit standard avec Earth en référence)



L'exemple ci-dessus donne un temps d'allumage BT<8s pour faire une approche à 250k avec une inclinaison EqI moyenne de -160° (j'ai pris une insertion rétrograde pour économiser du carburant pour la mise en orbite)

Ensuite il est bon de faire une deuxième correction quand $G=0.8$ ou plus car la Terre est assez perturbatrice pour la trajectoire avec ses aberrations de sphéricité et son satellite.

6.4 – Insertion en orbite

Utiliser Orbit-Insert ou Delta Velocity comme nous l'avons fait à l'aller.

6.5 – Variante pour la solution de tir

On peut utiliser Orbit-Eject en mode Lower Orbit (on va vers la Terre dont l'orbite est plus près du soleil) pour faire varier les données et le coupler à Map en Op-Mode Shared comme nous l'avons montré au paragraphe 5.5 page 25 mais ça ne donne pas un très bon résultat.

Nous allons plutôt utiliser **Target-Intercept en mode Two Plane et TGT=Earth**, couplé à Orbit-Eject en mode Course qui recueillera les données pour l'allumage.

Cette solution convient bien et évite de faire un alignement strict des plans orbitaux.



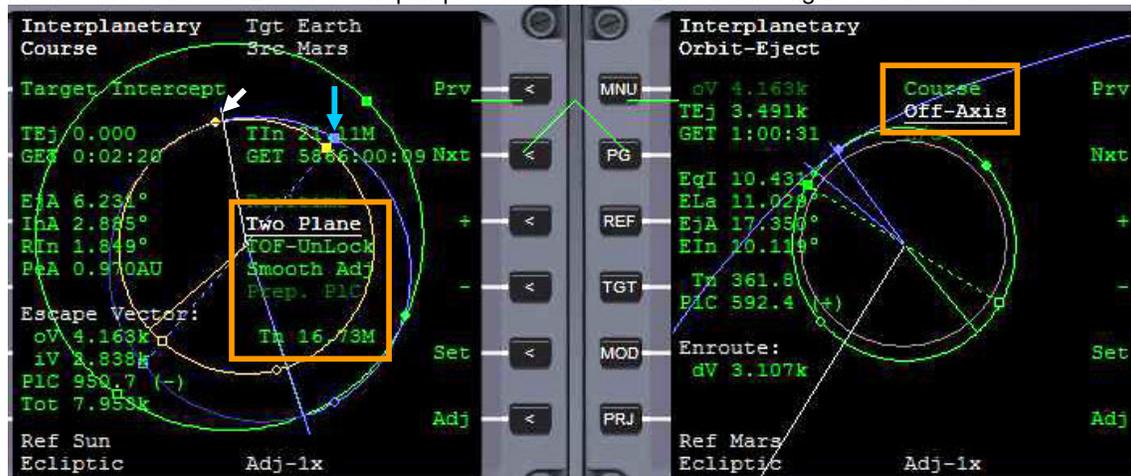
On suit le plan orbital de la planète de départ (en vert) puis le plan orbital de la planète objectif (en orange)
Le changement de plan se fait en un point nodal.

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.

Reprenons le scénario 10 – Retour de Mars vers la Terre et ouvrons les MFD comme nous l'avons fait en 6.1 mais en prenant le mode Two Plane pour Target Intercept

Maintenant vous savez faire et en quelques clics vous avez la solution figurée ci dessous



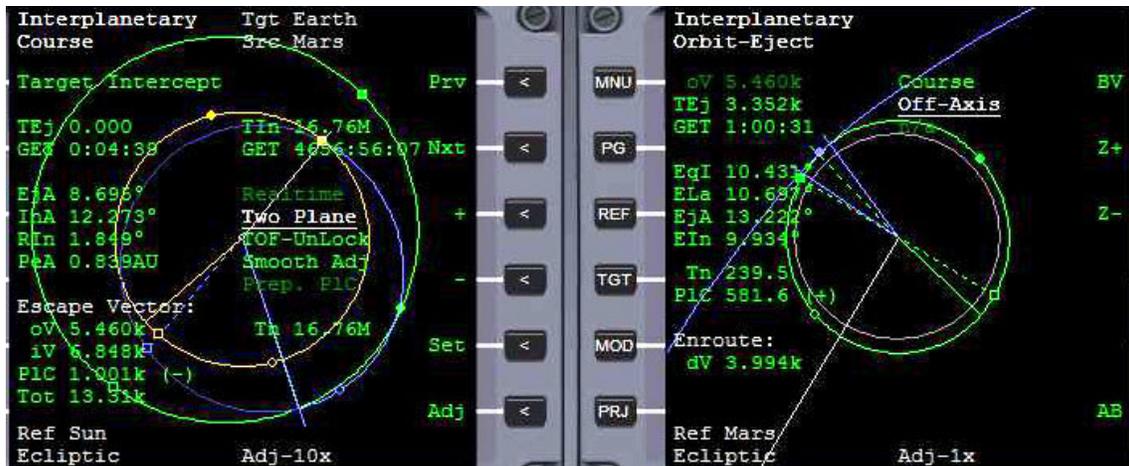
Temps de voyage $T_{in} = 21.11M$ et on voit $T_n = 16.71M$ qui veut dire que l'on atteint le point nodal de changement de plan à ce moment. Il faut sélectionner Prep.PIC et l'activer avec + après le premier allumage pour préparer à allumer en automatique au changement de plan en armant AB
Attention, une fois le premier allumage effectué (BT=197s), il faut penser à modifier Src pour prendre le vaisseau et non Mars comme source (voir explication page 30)

La ligne blanche indique le point de rencontre prévu (voir flèche blanche)
Le carré bleu plein (voir flèche bleue) situé à côté du carré jaune est le point nodal ou l'orbite calculée va rencontrer le plan de l'objectif

Rappelons qu'un carré plein signale un point nodal ascendant AN et qu'un carré creux signale un point nodal descendant DN par rapport au plan orbital de l'objectif.

Pour minimiser la consommation en carburant il est idéal de placer le point nodal sur l'objectif en modifiant T_{in} pour faire coïncider le point de rencontre avec le point nodal
Il suffit de donner à T_{in} la valeur de T_n ce qui à l'avantage de raccourcir considérablement le voyage
On est ramené au principe du mode Off-Plane mais on a pu placer avec précision le point nodal (voir figure suivante)
On peut repasser en mode Off-Plane pour avoir un allumage et un temps de trajet optimal.

Vous pouvez aussi essayer de chercher une solution en mode Source Plane ou Target Plane pour évaluer l'intérêt de ces solutions.



7 – DE IO A EUROPA

Charger le scénario 11.0 – De Io à Europa

7.1 – Recherche de la solution

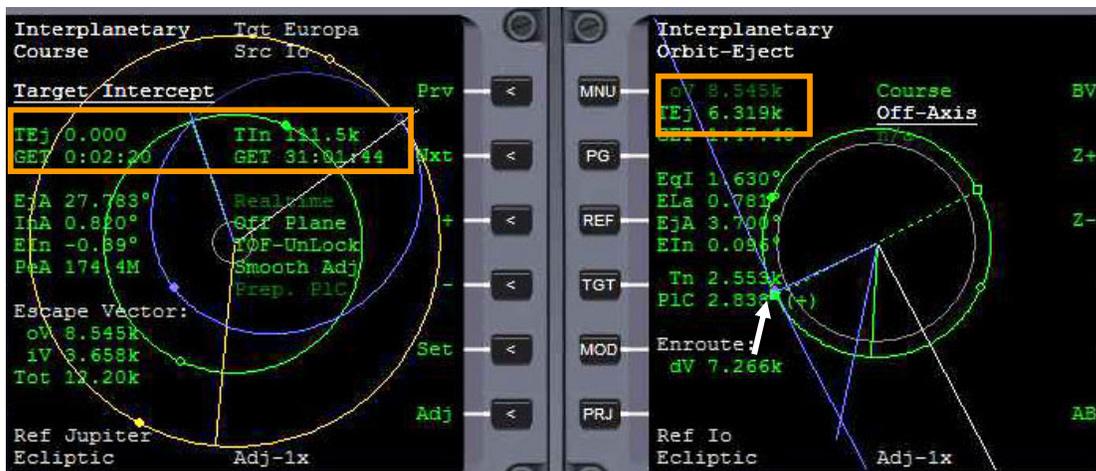
Nous allons utiliser le module **Orbit-Eject mode Off-Axis couplé en Op-Mode Shared** au module **Target Intercept en mode Off-Plane** pour trouver la solution de tir.

- Définir Europa comme Objectif sur Target Intercept

Target-Intercept nous donne une solution en $T_{In} - T_{Ej} = 111500$ s soit 1.3 jours avec un temps de combustion acceptable de 509 s

$E_{In} = 0.89^\circ$ est petit et nous ne ferons pas de correction de plan en allumant pour PIC en position N+ à $T_n = 2.953k$ (voir explication page 27)

Il suffit de régler T_{Ej} sur Orbit-Eject pour que le point d'éjection soit bien placé (flèche blanche) si il ne l'est pas.



Il ne reste plus qu'à passer en AutoBurn et à attendre l'allumage.

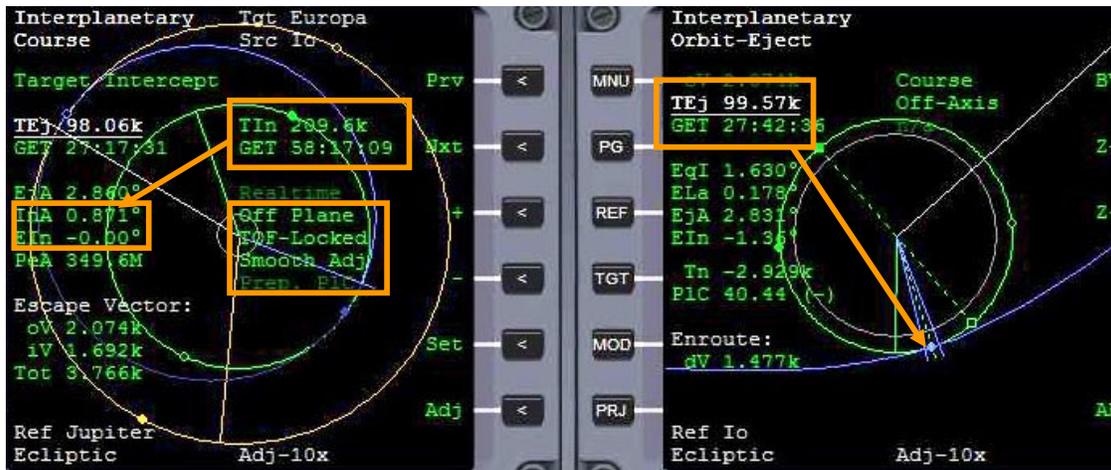
On peut accélérer jusqu'à 1000X avant l'allumage

Dépense en carburant 29%

Cette solution n'est pas économique en carburant. On peut optimiser car on voit que les deux planètes ne sont pas favorablement placées et nous devons contourner Jupiter en passant assez près à l'intérieur de l'orbite de Io. Nous allons procéder comme nous l'avons fait au paragraphe 6.1

- **Faire TOF-Locked** pour garder $T_{In} - T_{Ej}$ constant (on peut diminuer T_{In} au préalable si on le souhaite)

- **Faire varier Tin ou TEj** pour réduire EIn si possible à 0
- Ajuster **TEj sur Orbit-Eject** a la valeur de TEj prise sur le module Course. Modifier si nécessaire pour que le point de lancement soit bien placé
- **Faire AB sur Orbit-Eject** pour préparer l'allumage automatique.



Et voilà une solution pour laquelle BT<120s (presque 5 fois moins) pour une même durée de voyage !
On utilise 7.7% du carburant

L'orbite de transfert ne contourne plus Jupiter et nous n'avons pas besoin d'autant d'énergie pour échapper à son champ de gravité. Jupiter est très perturbatrice

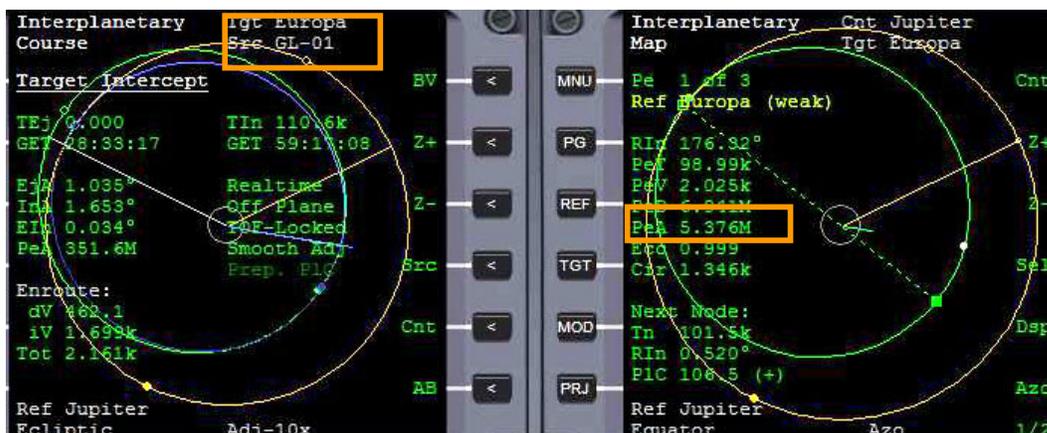
Il suffit de patienter 98060s soit un peu plus de 11 jours avant le lancement mais ça vaut la peine surtout que l'on peut accélérer le temps !

Cet exemple montre bien l'importance d'avoir une position favorable pour la source et l'objectif au moment du tir.

7.2 – Corrections

- **Sur le MFD de droite, remplacer Orbit-Eject par Map**, prendre Europa comme objectif et sélectionner les options Disp, Int, et Pe 3 of 3 Ref Europa (projection Periapsis en utilisant Sel)
- **Sur Target-Intercept sélectionner X pour la source** (attendre un peu pour ne pas être sous l'influence de Io majoritaire) 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
Repasser en mode TOF-Unlock



On peut voir sur Map que l'altitude prévue au periapsis est $PeA = 5.376M$ 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 = environ 10k
 puis une quand $PeT < 1k$

Plus on est près plus la correction est précise mais plus grande est la dépense en carburant.
 Jupiter a un très gros champ de gravité et la SOI de Europa ($G > 0.5$) est très proche d'elle.

Sur le MFD à gauche, ouvrir **Planet Approach avec Ref = Europa (Important)**

Sur le MFD de droite se mettre en **mode Map** avec **TGT Europa**



Notre PeA prévu à ce moment sur Map est de 4.865M (4865 k) et nous allons la réduire à 500k pour mieux voir Europa.

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 48 s environ et nous coûtera 2,9% de carburant

Si PeA reste proche de 500k il n'est pas nécessaire de faire une autre correction car elle peut prendre plusieurs dizaines de secondes en raison du champ perturbateur de Jupiter et des autres lunes.

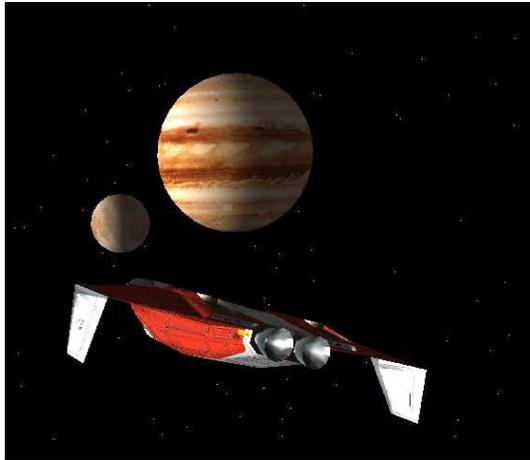
Au Periapsis il suffit de vous circulariser par la méthode qui vous plaira le plus en utilisant le sous module Orbit- Insert du module Course, le module Orbital, ou le MFD Orbit standard
 Le temps de combustion de l'ordre de 121 s nous consomme 7,5 % de carburant

Attention ! Si on ouvre le module Orbit-Insert, on n'aura 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 lui qui est en référence et sur lequel on circulariserait.

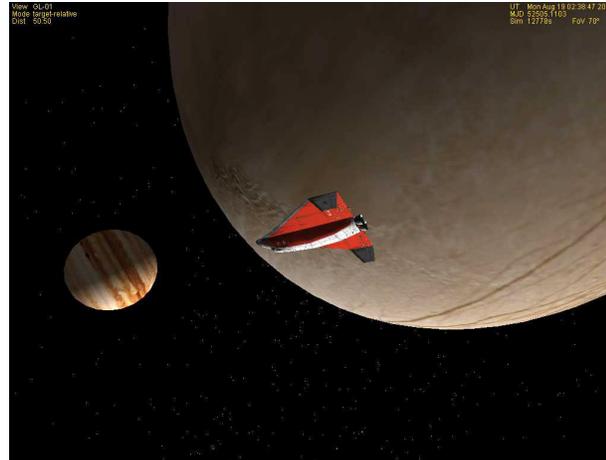
Entrer Europa comme référence

Si Jupiter est choisi comme référence, Orbit Insert affiche en jaune le texte "Invalid source or reference...Auto configure with (TGT)" quand on entre dans la zone d'influence d'Europa ou $G > 0.5$

Quand la référence est Europa, 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 il nous reste plus de 82% du carburant.
Vous pourrez faire le voyage de retour vers Io ou gagner un autre satellite ou essayer de regagner la Terre par exemple.

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 la 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

Quand on l'utilise, il vaut mieux passer le module Map en mode normal (mode Plan désélectionné) pendant l'allumage et le vol pour ne pas avoir d'affichage bizarre

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 ou Jupiter par exemple et l'erreur est catastrophique !

Il est très économique de réduire Eln le plus possible en modifiant le moment d'arrivée Tin tout en gardant Tin-TEj constant grâce à TOF-Locked

Les corrections d'approche sont efficaces et précises quand on est dans la SOI de l'objectif mais plus on est proche de lui plus elles sont coûteuses en carburant.
Il est souvent préférable de faire une première correction assez loin (à partir de 3xSOI) puis de refaire une ou deux corrections à plus courte distance surtout si la planète de référence a une grosse influence.

Les scénarios

11.1 - Solution Io à Europa, 11.2 - En approche d'Europa et 11.3 - En orbite autour d' Europa vous permettent de vous entraîner

7.3 – Comment faire si on veut aller vers une planète comme la Terre en partant d'Europa ?

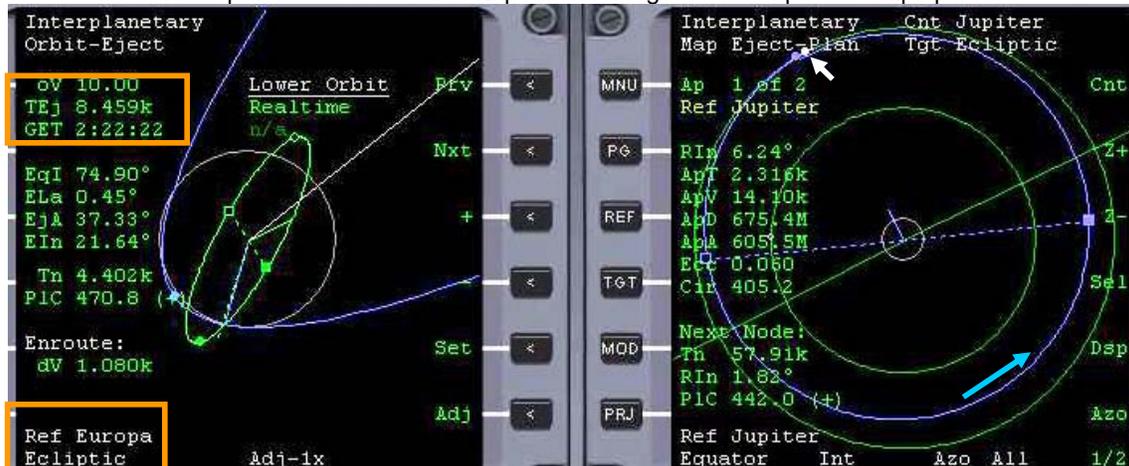
On ne peut pas utiliser Target-Intercept pour chercher la solution comme dans le cas du retour de la Lune (voir §3)

Nous sommes en orbite autour de Europa qui a Jupiter comme planète de référence et nous voulons aller vers la Terre qui a le Soleil comme planète de référence.

La planète de référence n'étant pas la même le module Target-Intercept ne convient pas. Si vous l'ouvrez en faisant TGT = Earth il calcule une trajectoire en prenant Jupiter comme source Src et elle est mauvaise.

Il faut utiliser le module Orbit-Eject couplé au module Map qui permettra de procéder en deux temps pour d'abord se mettre sous la dépendance de Jupiter ; puis de calculer la trajectoire entre Jupiter et la Terre :

- Créer une orbite autour de Jupiter en appliquant un peu de Δv pour échapper à l'influence de Europa et se mettre sous dépendance de Jupiter. Il suffit d'appliquer la valeur de $\Delta v=10$ qui est donnée par défaut et de faire AB pour l'allumage automatique au temps prévu.



Vous obtiendrez une belle orbite en bleu partant du point d'allumage (flèche blanche) avec un temps de combustion BT=74s (on voit que Jupiter tire fort !)

- Une fois l'allumage terminé, faire avancer le temps jusqu'à ce que Orbit-Eject passe en référence Jupiter à la place de Europa ce qui veut dire que nous avons échappé à la SOI de cette dernière.
- Nous pouvons maintenant utiliser Target-Intercept qui va calculer la trajectoire entre Jupiter et la Terre qui sont toutes les deux satellites du Soleil.
- On remplace Orbit-Eject à gauche par Target-Intercept avec TGT = Earth.
- La source Src étant Jupiter nous devons allumer avec Orbit-Eject ouvert à droite, couplé sur Target-Intercept en mode Course comme nous l'avons déjà fait (on est déjà en OpMode Shared puisqu'on remplace Plan)



Il reste à faire l'allumage en automatique par AB sur Orbit-Eject. BT=390s et nous sommes en route !

- Quand Orbit-Eject affiche " Have a nice voyage " on a échappé à la SOI de Jupiter et on peut prendre le DG comme Src pour Target-Intercept en faisant Src et en entrant X puis entrer Earth comme objectif. On ouvre Map dans le MFD de droite avec TGT=Earth.
- Ensuite on peut faire une correction à mi-parcours mais il est inutile de chercher à trop réduire PeA sur Map. Il change beaucoup en cours de route car la terre tourne et notre voyage dure 87510000s ce qui donne un peu plus de 3 ans avec ces réglages (en accéléré à 100000x, une année = 5 mn23s environ) **Ne vous inquiétez pas, PeA se réduira petit à petit quand nous nous rapprocherons de la Terre.**
- Corriger avec Planet-Approach quand on entre dans la SOI (ou même à 3xSOI) pour avoir une bonne altitude d'insertion comme par exemple 300k.
- Refaire une correction assez près quand la Terre à une influence $G > 0.8$ lue sur Orbit standard que l'on peut ouvrir à la place de Map.
- Insérer en orbite avec Orbit-Insert, Delta Velocity, Orbital ou même en utilisant Orbit standard.

Et c'est dans la poche ! Après mise en orbite il m'est resté presque 17% de carburant, de quoi pouvoir se poser...Essayez !

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 sinon 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 vous place le 15 octobre 2005 à 0h

8.1 – Solution de tir

Rafraîchissons nous la mémoire en révisant les différentes méthodes !

On peut utiliser Orbit-Eject pour calculer la trajectoire.

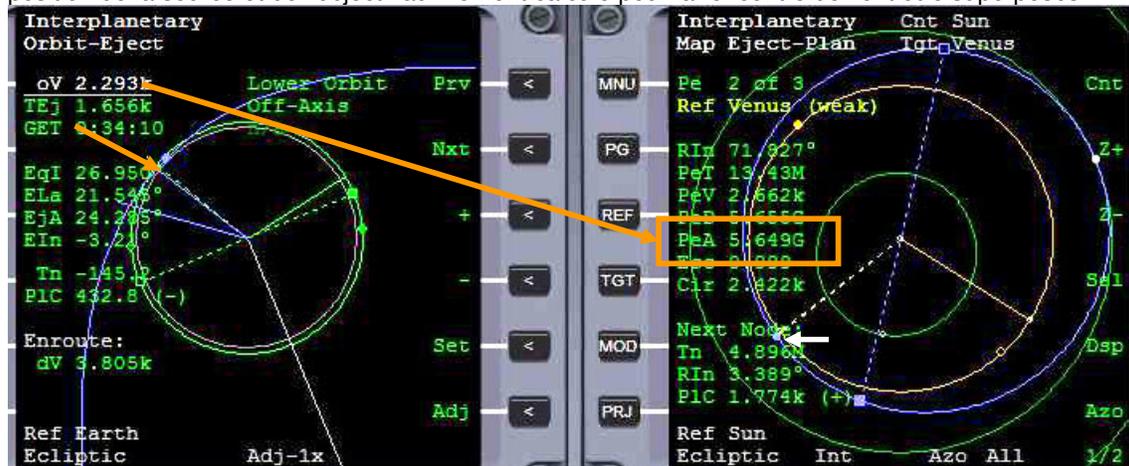
Mercuré a une orbite plus basse que la notre et pour échapper à l'attraction de la Terre on prend **Orbit-Eject en mode Lower Orbit** et on contrôle PeA avec **Map couplé en Op-mode Shared**

On fait varier Δv pour diminuer PeA le plus possible. Malheureusement on ne peut pas descendre à moins de 5.649G ce qui donne 5649000 de km soit environ 15 fois la distance Terre Lune ce qui est beaucoup ! Le soleil est perturbant....

On fait varier TEj si nécessaire pour bien placer le point d'éjection

Et on a une belle orbite bleue sur Map qui est tangente (ne touche qu'en un point sans couper) à l'orbite de la Terre (cercle extérieur) et à l'orbite de Venus (cercle intérieur)

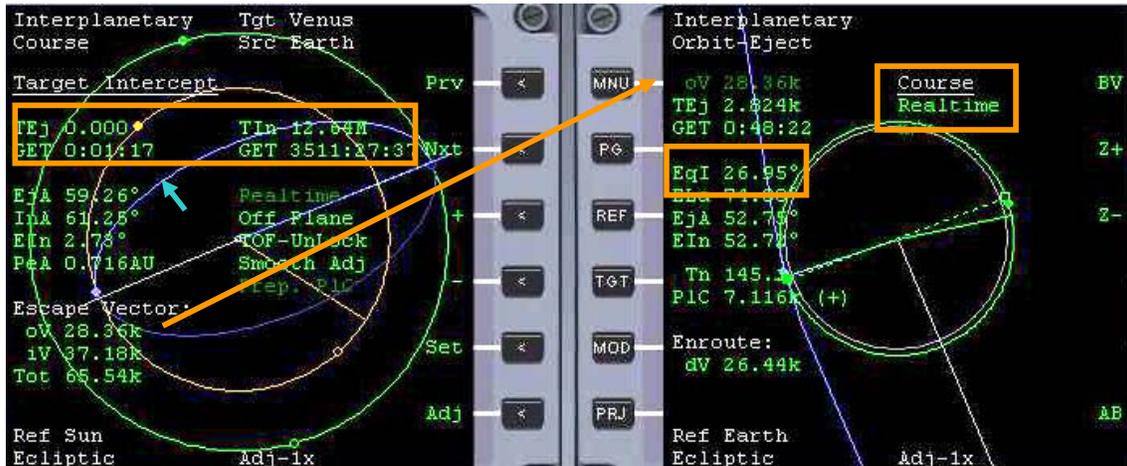
Au point de rencontre calculé (flèche blanche) les rayons pointillés blanc et jaune qui représente la position de la source et de l'objectif au moment calculé pour la rencontre doivent être superposés.



On obtient une solution avec $BT=278s$ mais la distance PeA est importante et il faudra utiliser pas mal de carburant ensuite pour corriger.

Il vaut mieux utiliser Target Intercept pour trouver plus facilement la solution optimale

- **Ouvrir Target Intercept** en mode Off-Plane avec Venus comme objectif
- **Ouvrir Orbit Eject** sans oublier de le coupler en OpMode Shared et choisir le mode Course pour le lier à Target Intercept



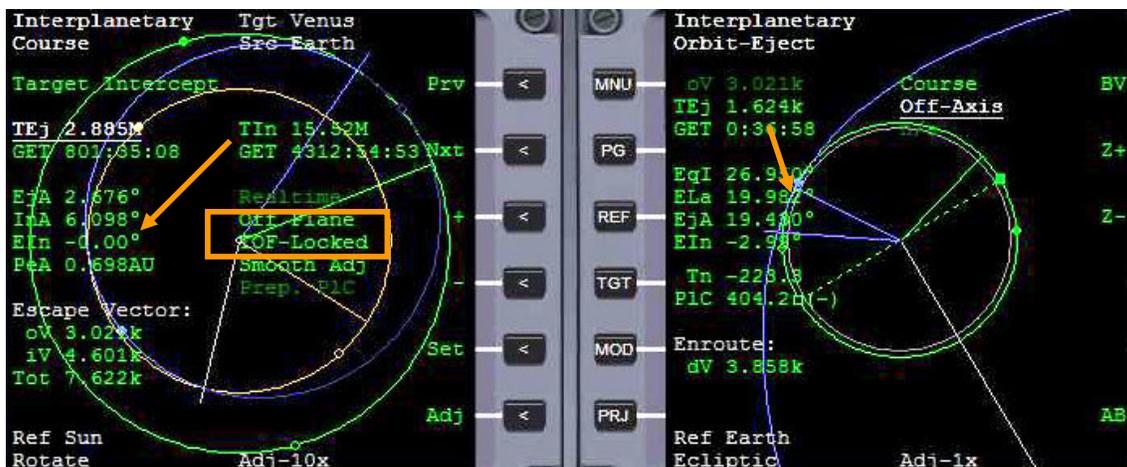
Target Intercept nous donne la valeur de $oV = 28.372k$ (augmentation de vitesse nécessaire à l'éjection) et la communique à Orbit-Eject (en haut à gauche non modifiable). Cette valeur correspond à un temps de combustion de 1482 secondes qui est prohibitif (faire BV dans Orbit-Eject pour le voir)

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

Le temps de voyage estimé égal à $Tin - TEj = 12640000s = 146$ jours environ soit environ 5 mois ce qui est normal.

EqI n'est pas mauvais et nous place sur une trajectoire à 26° assez proche du plan équatorial mais cette solution n'est pas intéressante vu le temps de combustion.

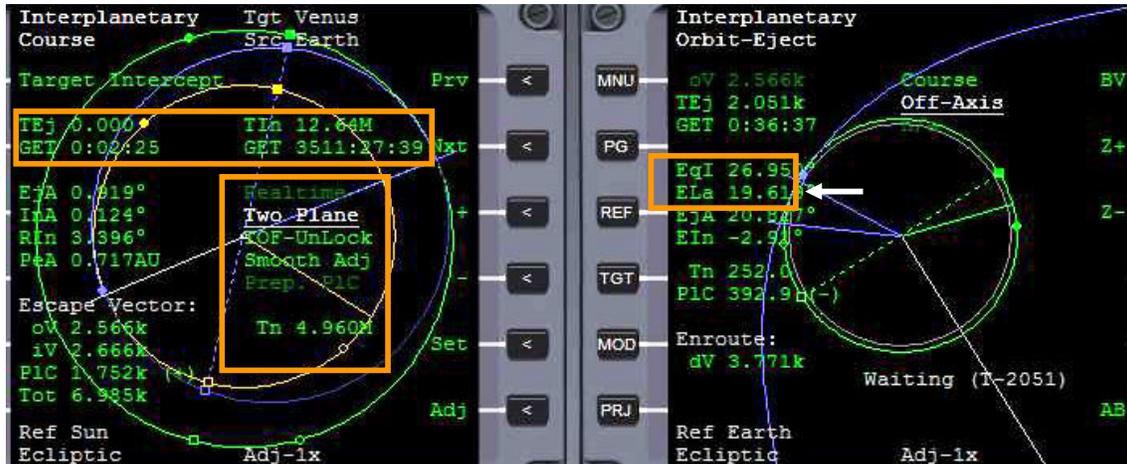
Comme nous l'avons fait il faut corriger en utilisant TOF-Locked pour garder l'intervalle $Tin-TEj$ constant (on pourrait au préalable le diminuer mais on augmentera le temps de combustion), puis faire varier Tin pour avoir $EIn=0$. Enfin si nécessaire on règle TEj sur Orbit-Eject après être passé en mode Off-Axis bien adapté pour l'injection sur Orbite pour bien placer le point d'allumage



Faites tourner l'orbite en mode 3D sur Target-Intercept et vous verrez la différence ! $BT = 280$ s c'est excellent ! Il n'y a plus qu'à faire AB sur Orbit-Eject

On peut aussi adopter une solution **Two Plane** qui nous placera dans le plan de l'objectif en deuxième partie du voyage et sera en final 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



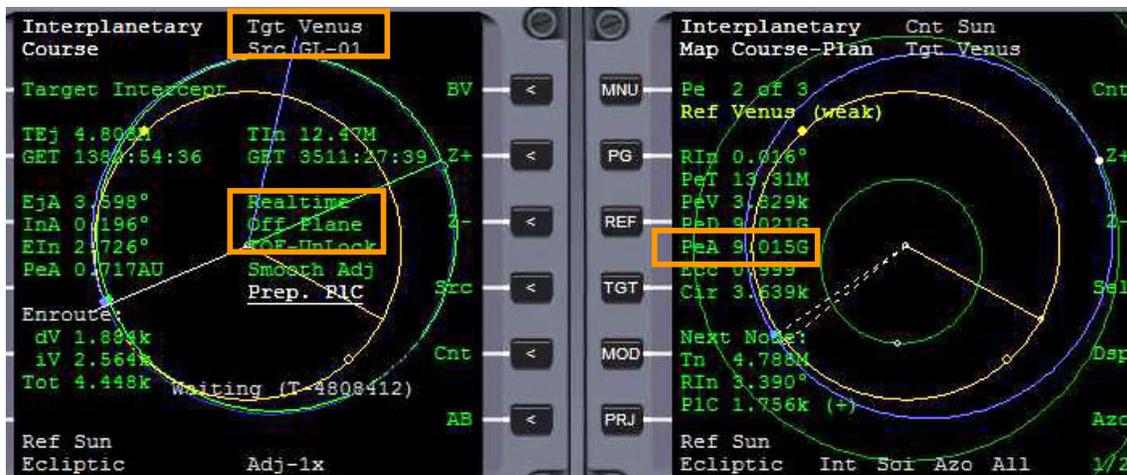
On obtient une solution comparable à celle proposée par IMFD en mode Off-Plane avec $T_{in}=12.64M$ et avec $BT=276s$. Il faudra refaire un allumage ensuite avec Prep. PIC pour le changement de plan

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 dans 2050 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 $T_n = 4.798M$.

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 où 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 -5.268M ce qui veut dire que nous sommes en plein dessus puisque la valeur est négative. (IMFD vise le centre de la planète)



8.2 – Corrections et mise en orbites

Nous ferons une autre correction en approche quand PeT sur Map est de l'ordre de 500k et que l'on commence à sentir un peu l'influence de Venus ($G > 0$ sur le module Orbit standard)

Ouvrir **Planet Approach** avec Ref Venus

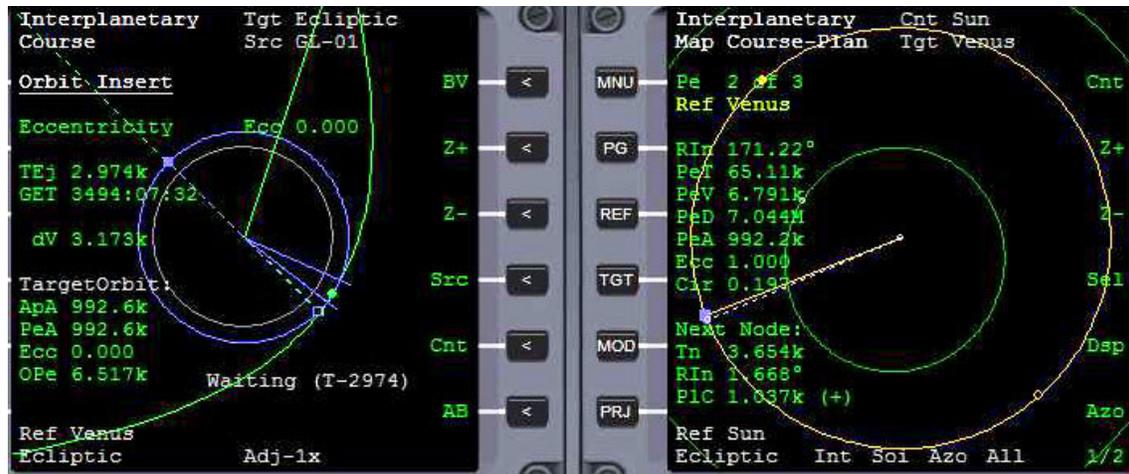
- Régler PeA à 1M pour ne pas être trop près de Venus qui nous éblouirait.
- Conserver EqI qui nous donne une insertion prograde (pourquoi pas ?)
- Allumer en AutoBurn sur Planet Approach (combustion de moins de 1.5 s comme on peut voir avec BV)



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 en entrant dans la SOI, lorsque PeT atteint 42k sur Map. ($G = 0.5$ sur le module Orbit Standard)

Nous sommes presque arrivés. Pour la mise en orbite nous utiliserons Orbit-Insert en allumage automatique avec $Ecc = 0$. Ne sélectionner que quand PeT est inférieur à 900k sinon il ne donne rien. L'allumage dure environ 202 s



Insertion en orbite à GET 3494:07:22 soit après 145,6 jours En orbite le 9 mars 2006 à 14h12 UT. 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.

8.3 – Retour vers la Terre

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

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 peut comme pour l'aller calculer une solution directement **avec Orbit-Eject en mode Higher Orbit** (puisque l'on "remonte" vers une planète extérieure) couplé en **OpMode Shared** au module **Map**. Ce calcul ne donne pas une approche très précise et il faudra corriger en route.

- 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 (21 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** pour faire les corrections en route.

Il vaut mieux comme pour l'aller; utiliser Target-Intercept en mode Off-Plane ou Two-Plane (par exemple en Two-Plane) en couplant sur lui en OpMode Shared, Orbit-Eject:en mode Off-Axis

- Passer en mode **Two Plane** pour avoir une trajectoire économique dans les plans orbitaux. Il faudra faire un changement de plan PIC à $T_n = 3.177M$
- Passer en allumage auto par **AB** sur Orbit-Eject et faire le premier allumage (BT=360s)
- Après sortie de la SOI prendre le GL-01 comme Source
- Préparer le changement de plan en sélectionnant **Prep. PIC** et en faisant + pour valider
- Passer en allumage auto par **AB** (BT=190s)
- Ouvrir Map pour les corrections



Après le deuxième allumage, la distance PeA lue sur Map est réduite à -6.122M ce qui veut dire que nous sommes en plein sur la Terre puisque la valeur est négative.

A 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 8 avril 2006 vers 01 h UTC. Il reste 16,5 % 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 ne couple pas sur Target Intercept)

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 (si on ne couple pas sur Target Intercept)

En mettant Targer 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 pour un voyage d'un peu plus de 110 jours

Le scénario

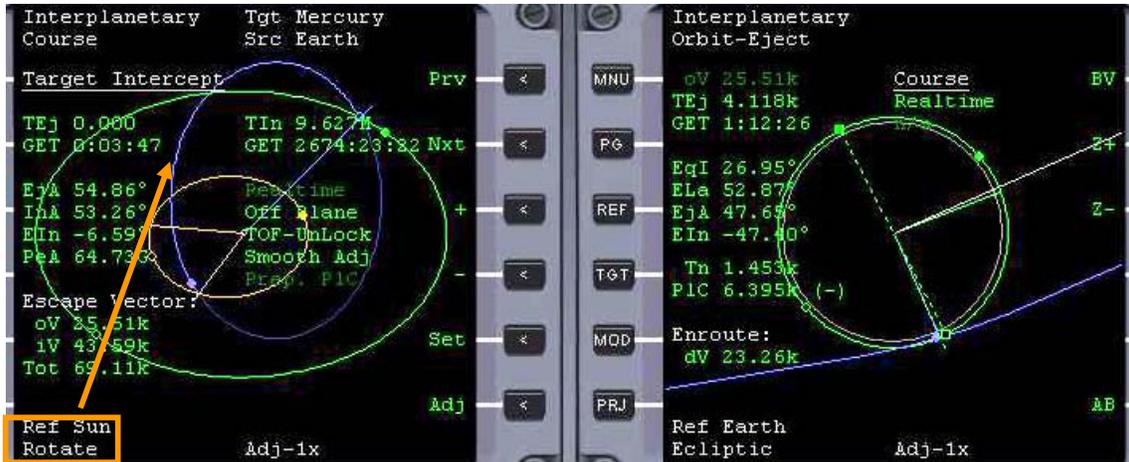
**14 – De la Terre à Mercure
vous place le 14 janvier 2005 à 0h**

Nous allons utiliser Target Intercept pour calculer la trajectoire comme nous l'avons déjà fait

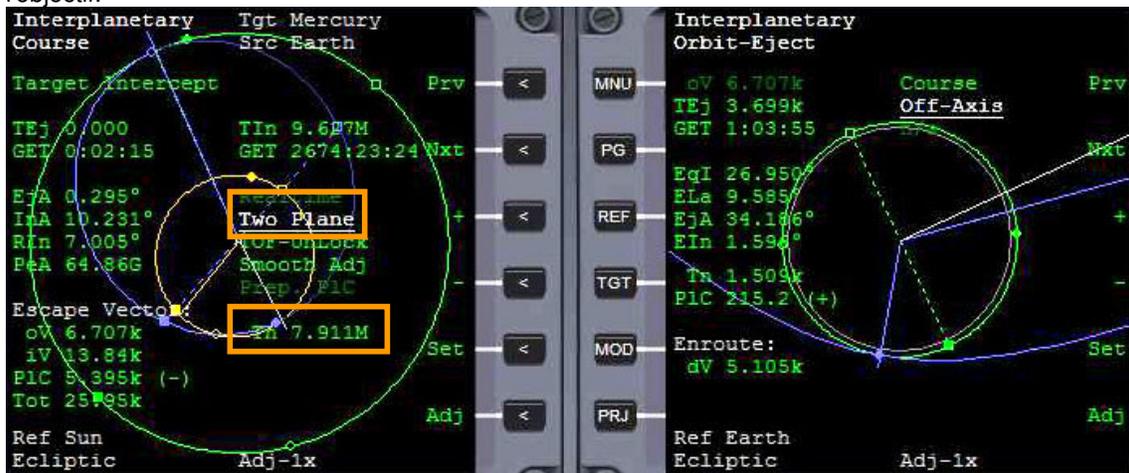
- Ouvrir Target-Intercept et prendre Mercury comme TGT
- Ouvrir Orbit Eject et le coupler en mode Course

La solution proposée en mode Off-Plane de Target-Intercept nous donne une orbite très éloignée des plans orbitaux exigeant avec Orbit-Eject un allumage BT de 1350 s. Ça coûte cher pour aller vers le soleil et de lutter contre son attraction !

Si on fait tourner l'orbite en mode Rotate (Shift gauche + W et bouger la souris) sur Target-Intercept on voit qu'elle est très en dehors des plans orbitaux ce qui n'est pas très bon. (EIn = 6.59° !)



Il vaut mieux passer Target-Intercept en mode Two-Plane qui nous fera faire un départ dans le plan de l'orbite terrestre et nous changerons de plan ensuite au point nodal de rencontre avec l'orbite de l'objectif.



BT est réduit à 367 s et il faudra faire un deuxième allumage de changement de plan à Tn=7.911M
Examinez la trajectoire sur Target-Intercept, c'est nettement mieux !
Il n'y a plus qu'à accélérer le temps jusqu'à l'allumage. Il restera 76 % du carburant !
TIn=9.627M soit 9627000 s ou environ 111,5 jours. Le soleil nous accélère beaucoup et nous mettons 34 jours de moins que pour aller sur Venus qui est plus proche.

Après avoir échappé à la SOI il faudra changer la source pour prendre le DG puis ouvrir Map pour suivre l'avance. Faire Prep.PIC et valider par + pour préparer le deuxième allumage.



Remarquer que l'on passe automatiquement en mode Off-Plane lorsqu'on valide Prep.PIC. Ceci est normal puisque IMFD calcule une trajectoire directe en mode Off-Plane à partir du point de changement de plan.

Passer en AB sur Target-Intercept.

Le deuxième allumage prend 338s et il reste 54,8% de carburant.

Au total nous avons allumé 367+338=705s au lieu de 1350s de la solution Off-Plane directe !

Nous ferons deux corrections avec Planet Approach comme nous l'avons déjà fait.

Ne pas oublier de prendre Mercury comme référence dans Planet Approach

Le soleil ayant une forte influence on peut corriger assez près à PeT=40k et PeT= 5k pour une meilleure précision à la mise en orbite.

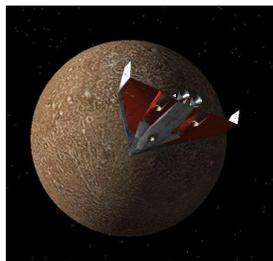
On gardera EqI et on réglera PeA à 1M par exemple pour s'insérer en orbite assez haute. La vitesse pour satelliser étant d'autant moins élevée que l'orbite est haute, nous économiserons du carburant pour ralentir et nous mettre en orbite.

Exemple pour la correction vers PeT=40k après allumage de 6s. PeA=1.149M ce qui est près de la valeur désirée.



Les deux corrections consomment peu car nous sommes bien placé dans le plan de l'orbite. Le total des deux allumages dure moins de 8 s et il nous reste un peu plus de 54 % du carburant.

Pour finir, il faut faire la mise en orbite avec Orbit-Insert. Comme nous arrivons vite (plus de 13km/s), il faudra allumer pendant un temps assez grand de 590 s.



Nous sommes en orbite le 5 mai 2005 et il nous reste un peu plus de 17% du carburant...

Si nous ne trouvons pas de pompe le retour est impossible !

Nous avons mis 111 jours

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

Pour le retour on peut, soit avoir placé une station en orbite autour de Mercure pour pouvoir se réapprovisionner, soit utiliser le Scenario Editor (CTRL=F4) pour ajouter du combustible, soit enregistrer le scénario après mise en orbite et modifier la ligne PRPLEVEL du DG-01 pour écrire **PRPLEVEL 0:1.000 1:1.000** et les réservoirs sont remplis !

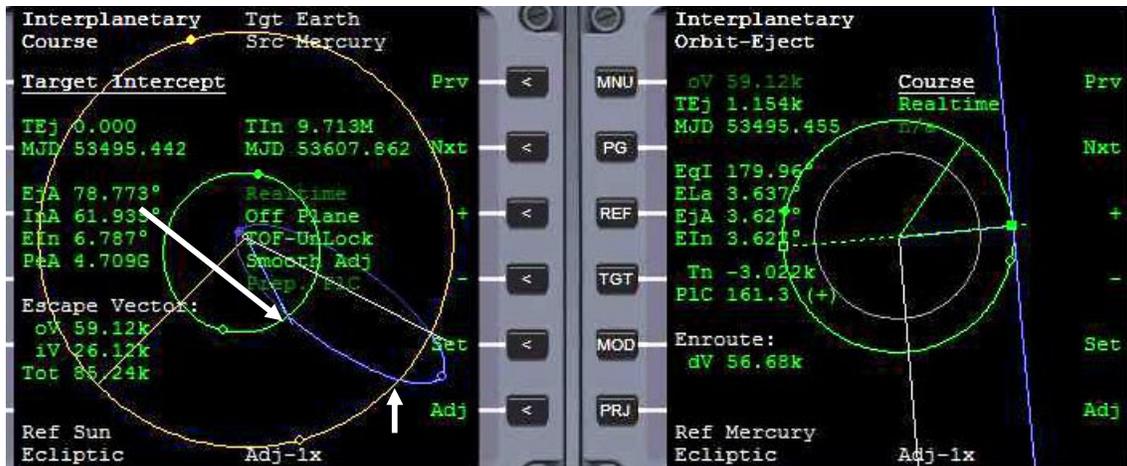
Le scénario

15 – De Mercure à la Terre

vous place dans cette situation pour un exercice d'optimisation

La date est très mal choisie pour le retour.

Si on ouvre Target-Intercept en mode Off-plane avec Earth comme TGT et en couplant Orbit-Eject on obtient une solution avec BT> 2300s ce qui est trop grand.



On voit aussi que la trajectoire prévue n'est pas bonne car elle coupe largement l'orbite de la Terre. De plus, elle fait un angle trop important au départ de l'orbite de Mercure (cercle intérieur) ce qui se voit car EJA est trop grand.

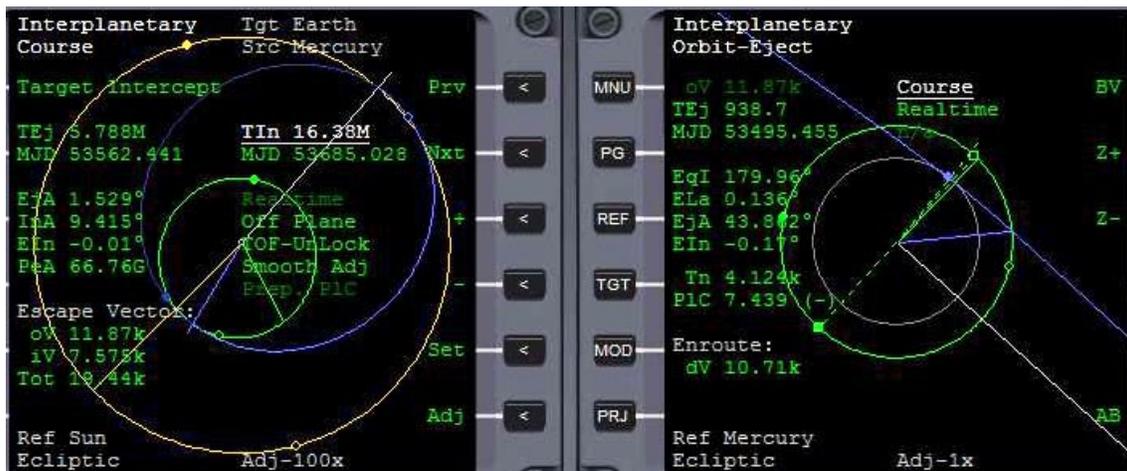
Il faut chercher une meilleure solution. Il est bien de passer en mode MJD dans le menu Global Configuration pour faciliter les réglages (voir note Théorie)

Passer en TOF-Locked pour garder Tin-TEj constant pour un voyage d'environ 112 jours (on peut réduire avant si on veut mais on consommera plus)

Faire varier Tin ou TEj pour réduire EIn le plus possible et obtenir une orbite pratiquement tangente à l'orbite de Mercure et à celle de la Terre comme dans la figure ci-dessous.

En réduisant EIn le vecteur d'éjection est le plus près possible du plan orbital de la source et la dépense d'énergie est minimale.

Nous avons une bonne fenêtre de tir dans 5788000s soit environ 67 jours. Comme il est long d'attendre vous pouvez sauvegarder le scénario et modifier le scénario pour avoir MJD=53561 qui vous place à environ un jour du départ pour revérifier vos calculs (on peut aussi utiliser le scénario Editor)



En relançant alors Course, et Orbit Eject vous devez trouver BT<700 s si vous optimisez avec Tin. En continuant à faire varier Tin on peut trouver d'autres solutions.

Ensuite vous savez faire. Correction en route et mise en orbite n'ont plus de secret pour vous !

A retenir

- Une bonne HTO doit se trouver la plus près possible des plans orbitaux
- Une bonne HTO doit être si possible tangente aux orbites de la source et de l'objectif
- On trouve une bonne solution en maintenant constant Tin-TEj et en faisant varier Tin (ou TEj) pour diminuer EIn le plus possible.

Maintenant, nous savez calculer les HTO et faire les corrections et mise en orbite. Dans la suite nous allons utiliser quelques fonctions particulières.

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 un tutorial de FlyBoy (merci à lui). Il part de la situation réelle de Voyager 2

Le scénario

16 – Slingshot Jupiter-Saturn

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

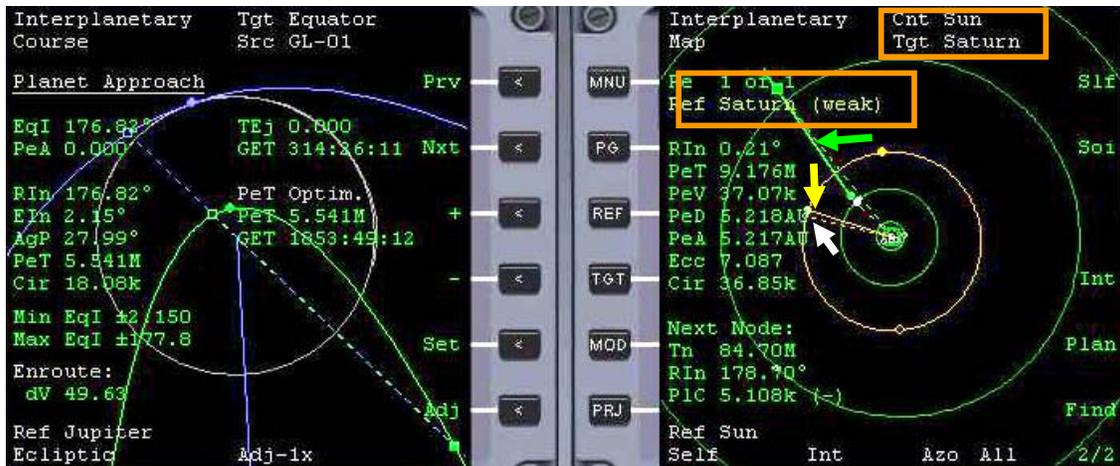
Phase 1 – Correction de l'approche de la planète intermédiaire

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 gauche le module Planet Approach et prendre Jupiter comme référence (vous aurez sûrement Sun à l'ouverture)
- Ouvrir à droite le MFD Orbit standard et prendre Jupiter comme référence.
- Faire avancer le temps jusqu'à ce que $G=0.20$ sur Orbit (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)



Maintenant, il faut ouvrir le module **Map** en OpMode 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 = 5.217 AU et sur cette trajectoire, nous passerions bien loin de Saturne

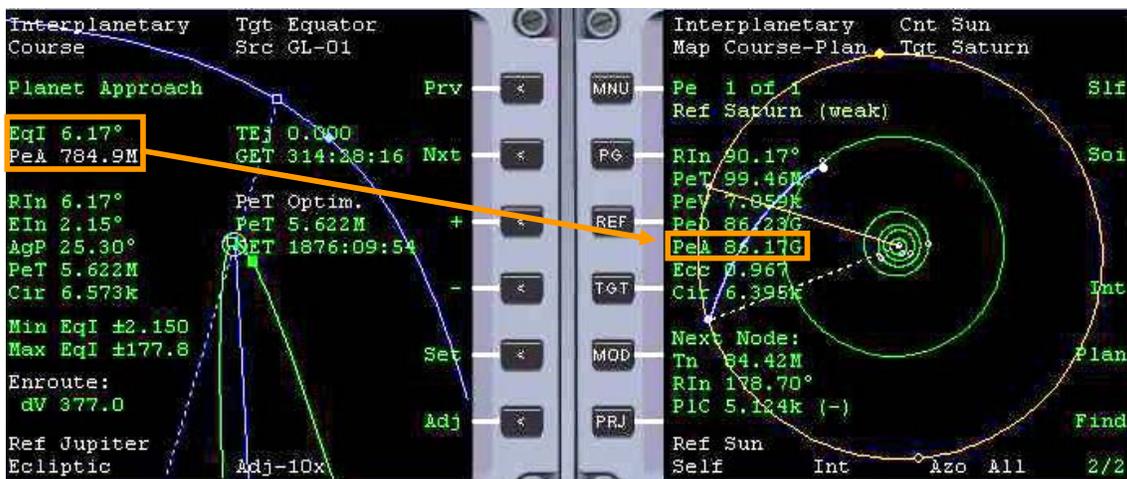
AU = distance moyenne Terre – Soleil = 150 millions de km

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 $\text{Min} = 2.151^{\circ}$. 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. Ici nous avons 86.17G ce qui est excellent

Rappelons que G = 1 million de km et que AU = 150 millions de km

Il ne reste plus qu'à faire l'AutoBurn AB sur Planet Approach pour moins de 24 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 – Augmentation de oV en Sling-Shot

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 OpMode 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

$oV = 2.752k$ est répercuté dans Sling-Shot et nous donne avec celui-ci un temps de combustion $BT = 245$ 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.

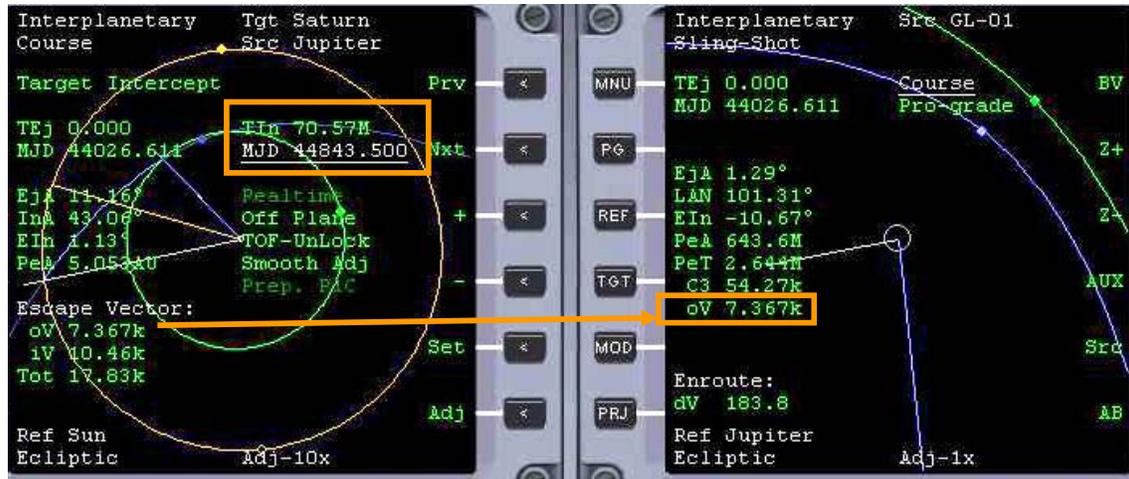
Phase 3 – Correction du Sling-Shot

Il faut réduire BT. Pour cela nous allons rectifier la date d'arrivée prévue pour affiner le Slingshot dans lequel nous avons transmis un oV approché par le premier calcul.

Modifier TIn pour diminuer BT 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 prévoir.

Pour pouvoir entrer la date, ouvrir le Menu général par MNU dans un des MFD, ouvrir le menu Configuration puis sélectionner et modifier Mission Timer pour avoir MJD au lieu de MJD. Ensuite il suffit de rouvrir le module sur lequel on se trouvait.



Et voilà le travail ! BT est inférieur à 12 s et on gagne énormément en temps de voyage puisque Tin est passé de 313.6M en phase 2, à 70.57M en phase 3 et nous gagnons 7,7 ans (1an = 31.536M) 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 2.752K 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 644M (moins de deux fois Terre-Lune et c'est excellent pour un si long voyage.

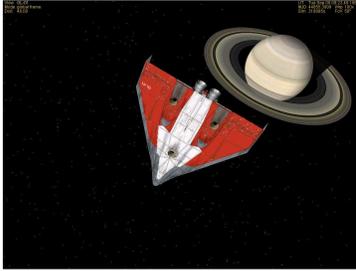
Avec un temps d'allumage total BT < 36 s (24 en phase 1+ 12 en phase 3) nous avons pu modifier notre trajectoire vers Saturne et à arriver très près. Merci à l'effet de fronde !

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 824M c'est à peu près deux fois 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 long voyage. 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 = 3M (G=0.5) j'ai pu me mettre en orbite avec EqI =90.61° et PeA = 494.2M pour bien profiter du paysage.

Il me restait après toutes les manoeuvres 37 % du carburant sur les 66% au départ à l'approche de Jupiter

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 EqI 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 à l'objectif pour diminuer le temps de combustion BT 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 < 3M 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 joindre Brighton Beach

Le scénario

17 – DG Approche Lune

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

11.1 – Mode Orbit-Insert

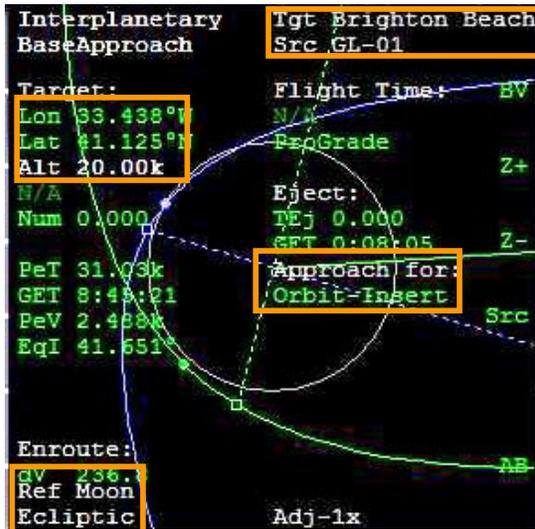
Ouvrir Planet Approach sur un MFD et la Map standard avec TGT = Brighton Beach sur l'autre



On peut voir sur Planet Approach que l'inclinaison équatoriale de notre orbite est $EqI = 162.9^\circ$ 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 $180 - 42 = 138$. On pourrait aussi corriger PeA

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. Attention à bien prendre Moon comme référence



Nous l'avons déjà fait page 25

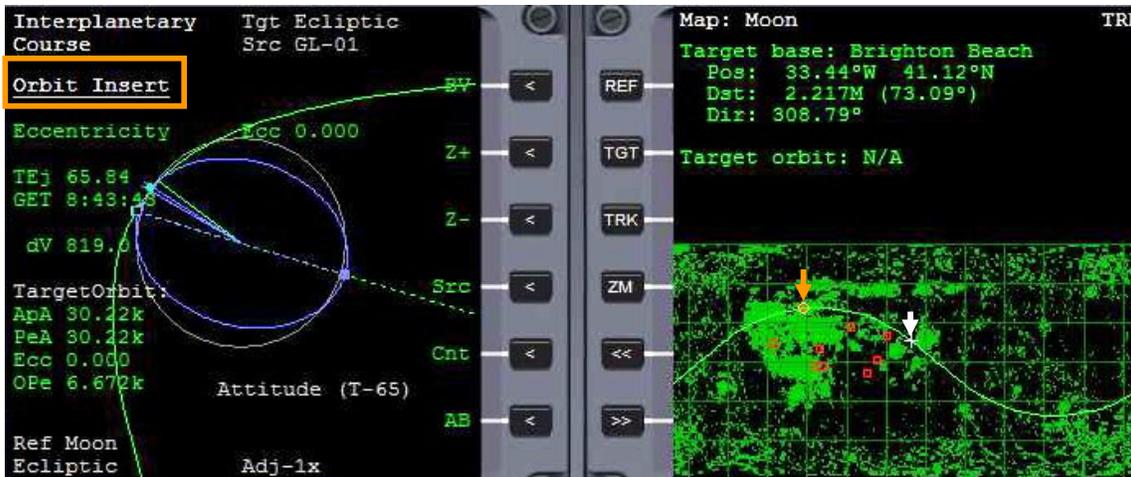
Ouvrir Base Approach et faire REF = Moon TGT = Brighton Beach (on peut aussi entrer les valeurs de Lon et Lat) et choisir Orbit Insert

Prenons par exemple une altitude d'insertion Alt = 20k qui nous permettra de préparer l'alunissage

On peut voir que $EqI = 41^\circ 66'$ est suffisant.

Num peut être pris différent de 0 si on veut passer sur la base après plus d'un tour

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 de Course 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) Le passage se fait dans moins de un tour (Num=0 dans Base-Approach)

On peut si on le désire sélectionner Ecc et le faire varier pour changer ApA et avoir une orbite elliptique

En sélectionnant Eccentricity on peut avec + choisir d'ajuster ApA , Sma ou Ope (voir partie théorie)

On peut aussi utiliser le module Orbit standard pour déclencher l'allumage en position rétrograde quand PeT est voisin de 0.

Le scénario 18 – En orbite lunaire 20k 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 les MFD remarquables que sont LandMFD ou LolaMFD si vous les possédez.

Par exemple :

- 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 !

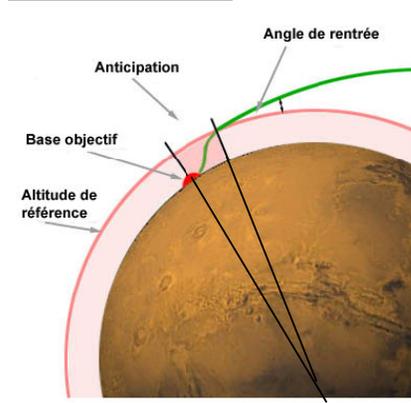
11.2 – Modes Re-Entry et Re-Entry (old)

Ces modes sont adaptés à la rentrée directe sur une planète pourvue d'atmosphère comme la Terre ou Mars.

Il conviennent essentiellement pour la rentrée d'une capsule comme Apollo car on arrive très vite. Pour un appareil genre Delata Gider il vaut mieux se mettre en orbite et faire une rentrée ultérieure avec par exemple BaseSync que vous pouvez télécharger sur le site de Jarmo Nikkanen

Suivant la situation, un mode peut convenir et pas l'autre.

Rappel du principe

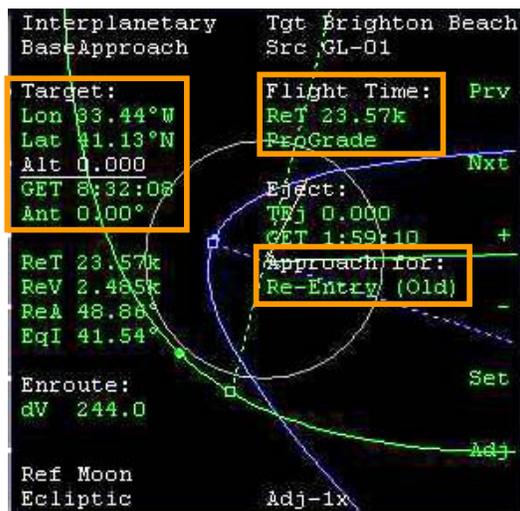


L'angle Ant d'anticipation de la rentrée va permettre de régler le temps pendant lequel le vaisseau va être soumis au ralentissement par l'atmosphère. Il faut trouver une valeur appropriée pour pouvoir atteindre l'objectif compte tenu de la densité de l'atmosphère qui commence à l'altitude Alt

La figure montre que pendant tout le temps de décélération dans l'atmosphère, l'angle de rentrée ReA va varier.

Exemple: Re-Entry (old) en arrivée sur Brighton Beach

Le mode Re-Entry (old) permet de spécifier l'instant de rentrée prévu. Charger le scénario 17 - DG Approche Lune et ouvrir Base-Approach



- Sélectionner l'option Re-Entry (old)
- Prendre REF = Moon si ce n'est pas le cas
- Prendre TGT = Brighton Beach
- 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
- Sélectionner ReT et l'augmenter pour voir apparaître une HTO en bleu (ReT augmente par sauts)
- S'assurer que ReA est positif sinon changer le mode d'insertion (Prograde/Retrograde) On peut jouer un peu sur ReA en modifiant GET mais attention à la valeur de BT !
- Faire l'Auto Burn (passer sur la page 2)

Assurez vous toujours que ReA reste positif et que BT ne soit pas trop grand.

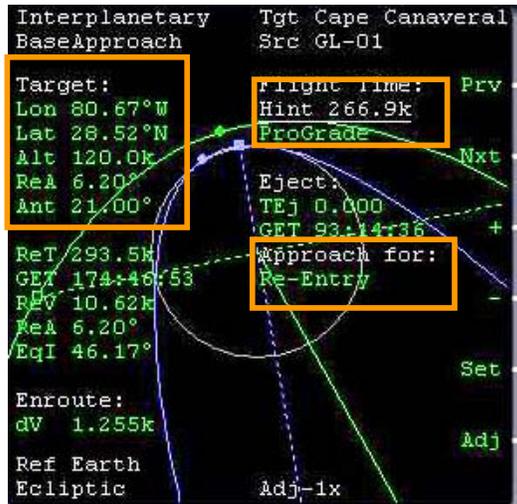
On peut prendre 200 à 300s pour TEj pour que le vaisseau ait le temps de se positionner.

Succès garanti ! Vous arriver droit sur Brighton Beach mais à une belle vitesse d'environ 2640 m/s !

Trajectoire parfaite, mais quel beau crash... On s'écrase à moins de 6 km.
Il faudrait prendre des dispositions pour ralentir comme freiner en rétrograde qui donne une assez bonne précision si la trajectoire d'entrée est assez "verticale" (ReA le plus près possible de 90°)

Exemple: Re-Entry en arrivant sur Cape Canaveral

Charger le scénario 03 – Correction MCC Lune-Terre et ouvrir Base-Approach



- Sélectionner le mode Re-Entry
- Prendre REF =Earth si ce n'est pas le cas
Prendre TGT = Cape Canaveral ou entrer les valeurs de Lon et Lat
Entrer les valeurs voulues pour Alt, ReA et Ant
- Augmenter Hint de manière à diminuer dV le plus possible.
On doit obtenir une valeur voisine de celle du temps total de voyage prévu au départ

Faire l'Auto Burn (passer sur la page 2)

Vous passerez au dessus de la base mais ce sera difficile de ralentir.
Prenez Alt=85k pour avoir un ralentissement plus important, placez le DG en position horizontale avant 120k puis contrôlez son pitch au manche ou au clavier pour descendre tout en ralentissant.

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) ou DG- ISS (référence Earth)

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 par rapport au corps de référence.

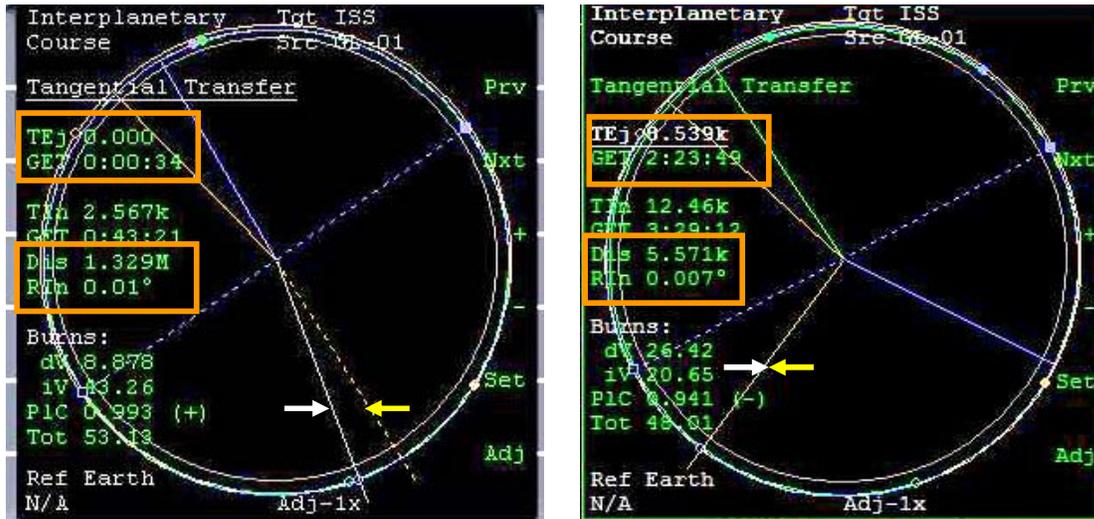
Tangential Transfert est bien adapté au transfert entre une orbite et un satellite ou une station.

REJOINDRE ISS

Le scénario 19 - DG orbite alignée sur ISS vous place avec le DG en orbite alignée avec ISS

- Ouvrir Tangential Transfer avec ISS comme objectif
On voit (figure de gauche) que la distance prévue au moment TEj = 0 est Dis =1.329M ce qui est évidemment trop important. Les rayons blanc et jaune pointillé qui correspondent à la position de rencontre après allumage ne sont pas confondus.
- Réduire Dis le plus possible en augmentant TEj . Faites au mieux car Dis varie assez rapidement avec le temps.
On voit (figure de droite) que pour TEj=8.539k on aurait une distance Dis=5.571k

Cette valeur de TEj donne à peu près le temps d'attente pour l'allumage si on veut une rencontre précise. Les deux rayons sont confondus.



Nous avons trouvé à peu de choses près la bonne fenêtre de tir pour faire la rencontre. Notre période T de rotation est de 5.392k comme on peut le voir sur le MFD Orbit standard ce qui fait que nous devons attendre 1,6 tour environ.

Nous allons donc faire avancer le temps jusqu'à ce que TEj=180 environ c'est-à-dire que nous serons 3mn avant l'allumage théorique et ceci laissera le temps au DG pour s'orienter

- Passer en autoburn AB sur Target Intercept
-

Ensuite un peu de patience. Ouvrir le MFD Docking, prendre TGT = ISS et faire HUD pour afficher la position de la station (voir tuto Terre-ISS avec la navette qui détaille les procédures)

Surveiller l'approche qui va se faire sans problème.

Quand on arrive à quelques km de ISS et que la croix V(ISS) se rapproche, centrer le marqueur V inversé du vecteur de déplacement en utilisant le RCS rotation, et centrer la croix V(ISS) dans le carré ISS en utilisant le RCS translation.

Diminuer la vitesse d'approche en utilisant les rétros et/ou le RCS translation

Et on arrive en douceur, vous ne pouvez pas la rater !



Bravo Papyref et IMFD !



13 UTILISATION DE SURFACE LAUNCH

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

Il ne fait pas d'allumage automatique mais sert de guide pour un lancement manuel

Il est utilisé pour un lancement depuis le sol 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 20 – Surface Launch à KSC
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 partons au mieux au cap 150° et nous corrigerons dans la montée en suivant les instructions du module Surface Launch.

J'espère que vous savez piloter un Delta Glider ? Un joystick peut faciliter la phase de décollage en atmosphère.

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 pour la suite. Il va pour l'instant afficher des valeurs changeantes et vous pouvez l'ouvrir plus tard si vous le voulez.
- 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 va nous servir pour assurer le lancement manuel.

La valeur de Alt peut être modifiée en fonction de l'altitude de l'atmosphère de la planète sur laquelle on lance.

Pour la Terre on prend 150k qui donne une marge de 30k au dessus de l'altitude ou l'influence de l'atmosphère se fait sentir et pour Mars on peut prendre 90k.

Cette limite d'influence peut se voir avec le module standard Surface lorsque STP prend une valeur supérieure à 0 lors de la rentrée en atmosphère.

On peut aussi prendre 60% de la valeur que l'on trouve dans le fichier cfg de la planète

Par exemple pour Earth.cfg on a :

*AtmAltLimit = 200e3 ; cutoff altiude [m]
200e3=200k et on prendra 200x60%=120k majoré de 30k*



Il faudrait lancer dans Time = 6144 s au cap 90°. Ce n'est pas tout à fait notre cap au départ mais nous corrigerons après le décollage.

Nous ne sommes pas dans une bonne fenêtre de lancement car $E_{in} > 1^\circ$ et il y a affichage de "Bad Plane" qui montre que notre trajectoire serait trop en dehors du plan orbital.

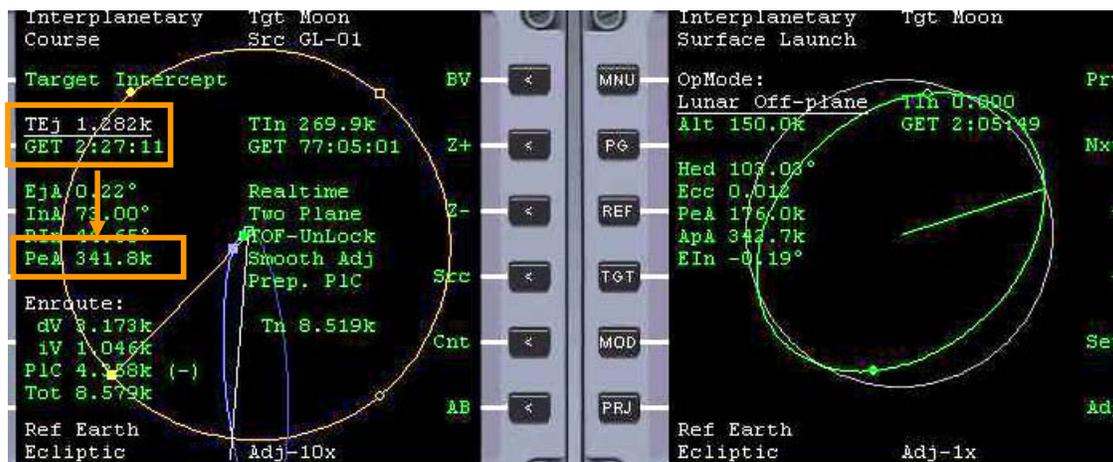
- Avancer dans le temps pour avoir **Time = 0**
- Allumer le réacteur principal et décoller quand la vitesse est suffisante, monter un peu et rentrer le train (n'oubliez pas, ça fait désordre et ça peut casser)
- En utilisant les touches 4 et 6 du pavé numérique (ou le joystick), virer à gauche pour aller à peu près au cap indiqué par la valeur de Hed (données "en montée") 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 les deux paramètres EIn et ApA et procéder comme suit:

- En faisant varier le cap Hed autour de la valeur donnée, avec les touches 1 et 3 en rotation (ou le joystick), **il faut garder EIn 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 puis 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

C'est un peu délicat au départ, mais si on fait correctement les réglages, on doit être sur une orbite avec Pea et ApA supérieurs à 150k et EIn voisin de zéro.

Ce sont surtout la valeur minimum de 150k pour PeA celle de EIn voisine de zéro qui sont importantes. Il suffit pour ApA qu'il soit supérieur à 150k



Nous voilà arrivé sur une orbite avec un $PeA = 175$ k et $E_{in} = -0.19$ ce qui est correct il ne reste plus qu'à utiliser Target Intercept pour lancer en mode Two Plane comme nous l'avons fait dans d'autres exercices

Prendre $T_{In} = 270$ k pour avoir un temps de voyage d'un peu plus de 3 jours

Attention à augmenter TEj pour que PeA sur Target Intercept soit au moins supérieur à 150k ensuite passer sur AB (on a $BT = 170$ s environ)

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. Vous allez droit dedans !

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

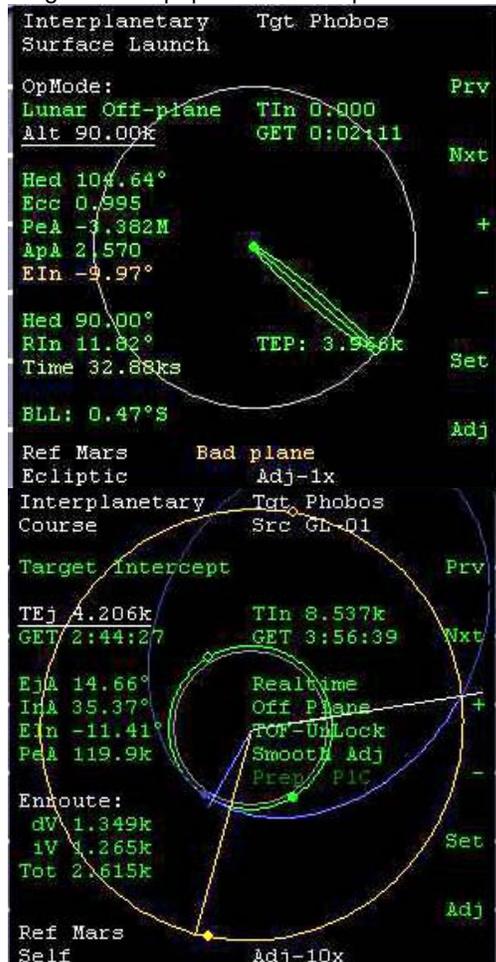
13.2 – Départ pour Phobos

C'est également un satellite de Mars comme la Lune pour la Terre mais il est plus difficile à atteindre en raison de sa gravitation très faible qui ne facilite pas le calcul de trajectoire.

On peut aussi utiliser Lunar Off-Plane de façon un peu particulière

**Le scénario 21 - Surface launch à Olympus.scn
vous place sur pad au cap 90° favorable pour un lancement**

Procéder comme en 13.1 mais avec Phobos comme objectif et nous choisisons le mode Off-Plane sur Target-Intercept pour varier un peu.



Entrer Alt=90k pour tenir compte de l'altitude de l'atmosphère qui est moins haute sur Mars que sur la Terre.

Il ne faut pas se fier à Time qui ne donne rien de bon dans ce cas.

Faire avancer le temps jusqu'à ce que Ein soit égal à 0 et procéder au lancement comme en 13.1 en jouant sur le cap pour garder Ein le plus petit possible, et sur le pitch pour avoir ApA et PeA supérieurs à 90k (l'atmosphère est moins haute sur Mars que sur la Terre)

Une fois en orbite, utiliser Target Intercept pour trouver la solution de tir en faisant varier TEj et Tin pour avoir une belle HTO (en bleu) ne rentrant pas dans l'atmosphère Martienne.

Passer en AB sur Target Intercept et accélérer le temps pour le départ et un voyage prévu de 1h12mn environ.

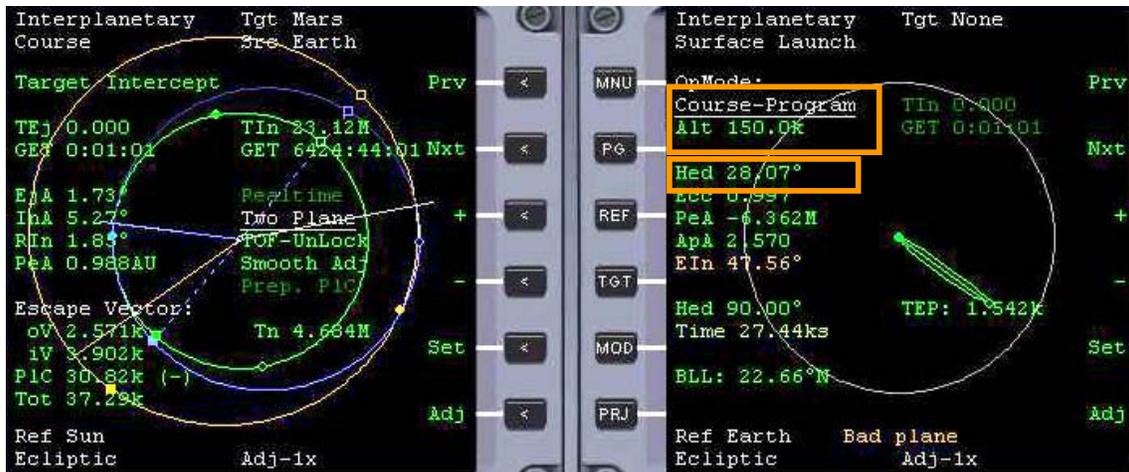
Ouvrir Planet Approach et entrer **REF = Phobos** (ce sera sûrement Mars) et faire une correction à courte distance de Phobos en prenant PeA=5k

Se mettre en orbite en utilisant le module Orbital du menu général en mode Circularize.

13.3 – Cas général du départ pour une autre planète

Pour cet exercice nous partirons du scénario **20 – Surface Launch à KSC** en prenant Mars comme objectif.

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



Avancer le temps jusqu'à ce que Time = 0 et décrocher 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 (dans ce cas la source est Earth et on ne peut pas allumer avec Target Intercept comme nous l'avons déjà vu) 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 – Le vecteur vitesse

En simplifiant l'explication !

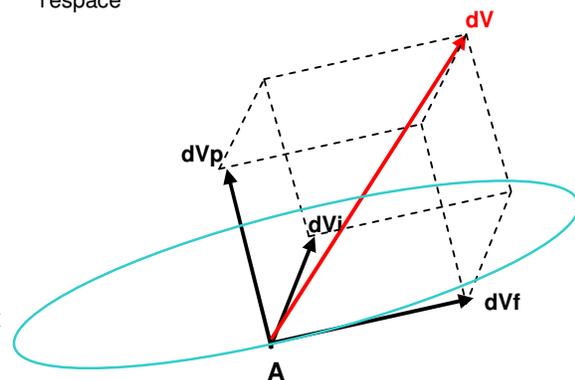
En un point de l'orbite, a un instant donné, le vaisseau a une vitesse que l'on peut représenter par un une flèche dirigée dans le sens de sa marche, située dans le plan de l'orbite et tangente (ne touche qu'en un point) à celle-ci. C'est le vecteur vitesse.

Si on applique une poussée à cet instant dans une direction donnée, on va provoquer une déformation de l'orbite car on fait varier la vitesse et on peut changer sa direction.

La nouvelle "poussée de vitesse" peut être appliquée dans un système de 3 axes de référence en décomposant cette poussée que nous appellerons dV (comme Différentiel de Vitesse ou plus simplement comme différence entre la vitesse que l'on a et celle que l'on veut atteindre)

Si le vaisseau est en A et que l'on applique la variation de vitesse dV sur 3 axes de références, on a ce qui est représenté.

Représentez vous un cube dans l'espace



Dans la référence Velocity Frame qui est la plus utilisée:

dVf correspond à la direction du mouvement dans le sens prograde si sa valeur est positive et au sens rétrograde si elle est négative

dVp est perpendiculaire au plan de l'orbite et correspond à N- si il est positif et à N+ si il est négatif

dVi est perpendiculaire au plan formé par les deux autres vecteurs et dirigé vers l'intérieur de l'orbite en valeur positive et vers l'extérieur en valeur négative

La vitesse résultante est dV somme des 3 composantes.

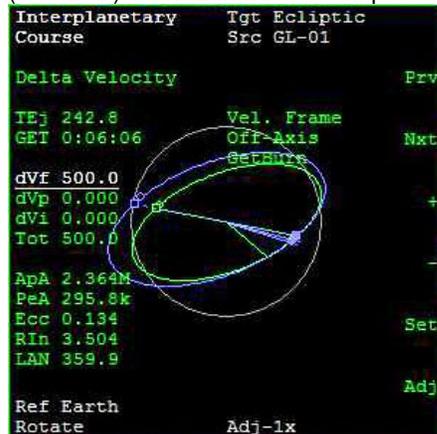
Utilisation de IMFD version 5.3 - Exercices

Bien entendu on peut appliquer seulement une, deux ou trois variations de vitesse en même temps

- Si on applique dV_f seul on va augmenter ou diminuer le périégée du point opposé suivant le signe ($+dV_f$ augmente, $-dV_f$ diminue)
- Si on applique dV_p seul on va faire pivoter le plan de l'orbite vers le haut ou le bas autour de l'axe dV_i suivant le signe puisque ceci revient à modifier le sens de la vitesse dans le plan dV_f , A, dV_p
C'est ce que l'on fait au points nodaux pour aligner les plans orbitaux
- Si on applique dV_i seul on fait pivoter l'orbite dans son plan autour de l'axe dV_p

Vous pouvez vous amuser à voir ces effets en utilisant Delta Velocity.

Ouvrez le scénario 01 – Départ pour la Lune ou on se trouve en orbite terrestre et larguez le DG (CTRL+D) Ouvrez IMFD Course puis Delta Velocity.

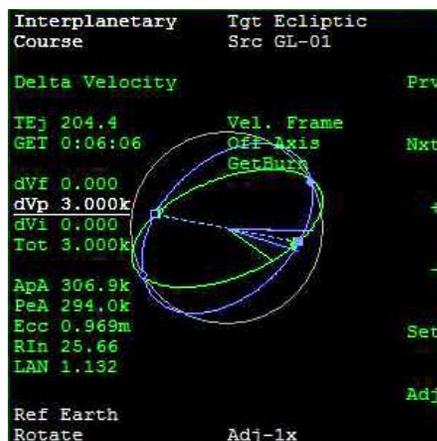


Augmenter TEj à 600 par exemple pour avoir le temps de s'amuser (il faut qu'il soit au moins de 3s pour que le module fonctionne)

Appliquer $dV_f = 500$ et on obtient une orbite elliptique avec $ApA=2.364M$

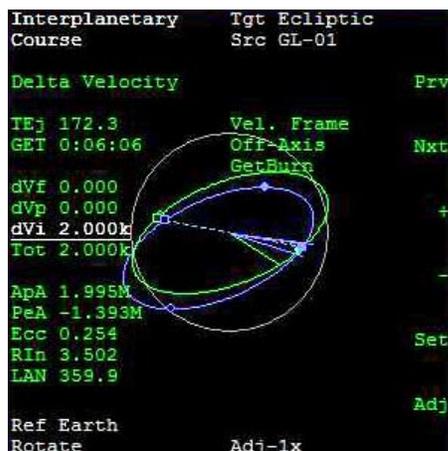
Appliquer $dV_f = -500$ et $PeA = -1.179M$ (Aie ça va faire mal on percutera la Terre!)

On peut passer en mode Rotate (Shift gauche+W +déplacer souris pour MFD gauche ou Shift droit+L ° déplacer souris pour MFD droit) pour faire pivoter l'affichage et vérifier que l'orbite bleu reste dans le plan de l'orbite verte d'origine.



Appliquer $dV_p = 3000$ seul et constater que l'orbite pivote autour de l'axe dV_o

ApA et PeA varient très légèrement par rapport à la situation d'origine parce qu'on ne se trouve pas au point nodal. Il faudrait ajuster TEj en conséquence



Appliquer $dV_i = 2000$ et -2000 seul et constater que l'orbite pivote autour de l'axe dV_p dans un sens ou dans l'autre

Essayer avec les trois valeurs dV_f , dV_p , et dV_i en même temps et faites les varier pour voir leur influence sur la forme et la position de l'orbite et leur action sur les différents paramètres ApA , PeA

15 – CONCLUSION

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

Il est impossible de tout faire essayer. Je vous ai donné les grandes lignes pour les principales manipulations en essayant de vous faire comprendre pourquoi ?
J'espère y avoir réussi et c'est à vous de travailler maintenant.

Vous excuserez les petites erreurs s'il y en a. 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
Mai 2009

ANNEXES

A1 – Fenêtres de lancement

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 100000X donnent à peu près la durée d'une mission sur Orbiter

Départ de	Date	MJD	Arrivée sur	Date	MJD	Durée jours	Temps à 100000X
Terre	15/01/2005	53384	Mercur	28/04/2005	53488	104	1 mn 30 s
Mercur	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

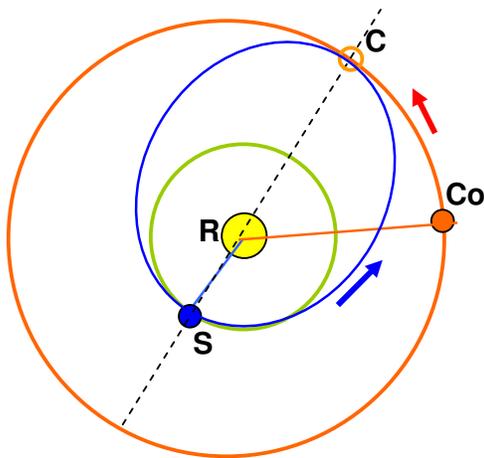
Merci à son auteur !

A2 - Principe d'une orbite de transfert de Hohmann (appelée HTO)

1 – Orbite théorique idéale

C'est une orbite elliptique par rapport à un corps de référence R qui permet de définir le trajet le plus économique mais pas forcément le plus court et/ou le plus rapide pour aller d'un point S appelé source à un point C appelé cible.
S et C doivent graviter tous les deux autour du même corps R de référence.

Deux cas sont possibles (les échelles ne sont pas respectées pour la compréhension)



- **R est une planète, et S et C sont des satellites.**

C'est le cas par exemple pour un vaisseau S et la Lune C en orbite autour de la Terre

- **R est le soleil et S et C sont des planètes**

C'est le cas par exemple pour un trajet Terre - Mars

Dans ce cas on considère pour le calcul que c'est la planète S qui est le vaisseau.
 Il suffira en théorie, de lancer le vaisseau au bon moment quand il se trouve sur l'axe RS à l'opposé de R pour avoir le même résultat que si on lançait la planète

Les orbites doivent être si possible alignées.

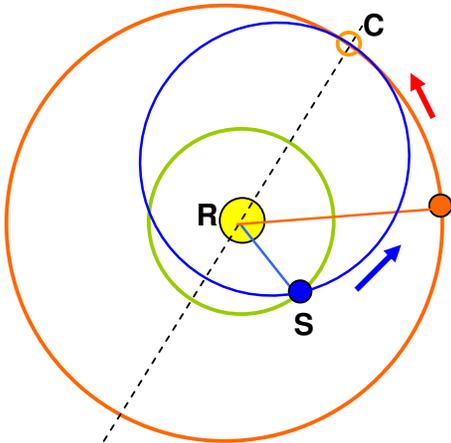
Sur la figure ci-dessus, la cible est sur une orbite extérieure à celle de la source mais évidemment la situation inverse est possible avec une orbite de la source extérieure à celle de la cible (par exemple trajet Terre – Venus)

Le périhélie de l'orbite de transfert se trouve au point S ou on lance la source et son apogée se trouve au point C ou on désire rencontrer la cible

On comprend facilement que si on veut que la cible se trouve en C pour la rencontre; il faut lancer S quand C se trouve en Co de manière à ce que le temps que met la source pour parcourir l'arc SC soit égal au temps que met la cible pour parcourir l'arc CoC

Ceci implique deux choses :

- **Il faut savoir calculer le temps mis par la source pour aller de S en C qui est la moitié de la période de révolution T de l'orbite de transfert (rappelons que pour une orbite, la période T de révolution est le temps mis pour parcourir une orbite complète)**
- **Il faut connaître la période de révolution de la cible pour pouvoir calculer la valeur de l'angle CRCo qui permettra de savoir à quel moment déclencher la mise en orbite de transfert de la source S**



On peut bien sûr faire un lancement dans cette situation mais il nécessite beaucoup plus d'énergie car on ne bénéficie pas à plein de la vitesse de rotation de la source sur son orbite

L'idéal, reste la situation de la figure précédente pour optimiser le lancement mais malheureusement elle peut ne pas se trouver souvent pour les planètes lointaines qui ont de grandes périodes de révolution.

Nous raisonnerons sur la figure précédente donnant le lancement idéal.

2 – Calcul de la période de l'orbite

Ce calcul peut se faire en utilisant la troisième loi de Kepler qui définit la relation suivante

Le cube du demi grand axe a de l'orbite divisé par le carré de la période a une valeur constante pour un corps de référence donné.

$$a^3 / T^2 = K$$

Le grand axe étant la distance SC, le demi grand axe est facile à trouver puisque égal à SC/2

La constante K a pour valeur

$$K = (4 \times \text{Pi}^2) / (G \times M)$$

Où G est la constante de gravitation universelle et M la masse du corps de référence.

$G = 6,67428 \times 10^{-11}$ dans le système MKS (mètre, kilo, seconde)

Rappelons que:

Si on écrit e^n cela veut dire que c'est le chiffre 1 suivi de n zéros

Par exemple $e^3 = 1000$

Si n est négatif c'est une fraction.

Par exemple $e^{-3} = 1/1000$ ou pour G la notation signifie que l'on divise 6,67428 par 10000000000

Si on multiplie e^x par e^y on obtient e^{x+y}

Par exemple $e^2 \times e^3 = e^5$ ($100 \times 1000 = 100000$)

Si on divise e^x par e^y on obtient e^{x-y}

Par exemple $e^4 / e^2 = e^2$ ($10000/100 = 100$)

La racine carré de e^n est égale à $e^{n/2}$

Par exemple racine carré (e^4) = e^2 (racine carré de 10000 = 100)

Application pour le trajet Terre Lune

Les valeurs que nous prenons en compte sont celles que nous trouvons en faisant Ctrl+I dans orbiter

$M = 5.9737 \times 10^{24}$ (en kilos) $\text{Pi} = 3,1416$ d'où on obtient K pour la Terre si on ne se trompe pas:

$$K = 10,0992 \times 10^{12}$$

Utilisation de IMFD version 5.3 - Exercices

Pour le calcul du grand axe SC on va supposer que l'altitude du vaisseau sur son orbite d'attente est de 200 km (on pourrait la négliger car elle est petite comparée aux autres grandeurs). On a :

SC = rayon de l'orbite de la Terre + rayon de l'orbite de la Lune + altitude de l'orbite (valeurs moyennes en mètres)

$$SC = 6371000 + 380300000 + 200000 = 386871000 \text{ mètres}$$

$a = SC/2 = 193435500 = 1,9344 \text{ e}^8$ en arrondissant et en appliquant un exposant multiplicateur e^8 pour simplifier l'écriture

La loi de Kepler nous permet d'écrire $a^3 = K \times T^2$

$$(1,9344 \text{ e}^8)^3 = 10,0992 \times \text{e}^{12} \times T^2 \text{ ce qui donne :}$$

$$T^2 = 7,2383 \text{ e}^{24} / 10,0992 \text{ e}^{12} = (7,2383 / 10,0992) = 0.7167 \text{ e}^{12}$$

d'où en prenant la racine carré

$$T = 0,846581 \text{ e}^6 = 846641 \text{ secondes}$$

Le temps de transfert entre S (Terre) et C (Lune) est la moitié soit 423287 secondes

Cette valeur peut varier un peu en réalité car nous avons fait le calcul en supposant les orbites circulaires.

Application pour les planètes du système solaire.

La Terre gravite autour du soleil à une distance de 150M (150 millions de km) appelée AU, que nous pouvons prendre comme unité de référence pour a, et sa période pour parcourir l'orbite est de 1 an que nous pouvons prendre comme unité de référence pour T.

Dans ces conditions le coefficient $k=1$ (puisque $k=1^3/1^2 = 1/1$) et on peut écrire pour toutes les planètes gravitant autour du soleil dont les orbites obéissent comme la Terre à la loi de Kepler

$$a^3 = T^2 \quad \text{si } a \text{ est exprimé en AU et } T \text{ en années terrestre}$$

Par exemple, Jupiter gravite en moyenne à 780M du soleil soit 5,2 AU ($5,2 \times 150 = 780$) et l'application de la formule ci-dessus avec pour demi grand axe le rayon de son orbite nous donne $T=11,85$ ans terrestres pour sa période de révolution.

Si on prend un trajet Terre Jupiter, le grand axe SC de la HTO = 5,2 AU + 1 AU = 6,2 AU
D'où $a = 3,1$ AU ce qui donne $T^2 = (3,1)^3 = 29,79$ ans $T = 5,46$ ans et le temps de transfert = $T/2$ vaut 2,73 ans

Voici les durées moyennes calculées sur HTO entre la Terre et les autres planètes (Ms=million de secondes)

Cible	Rayon orbite cible en AU	Temps de transfert		Période de la cible en Ms
		en années	en Ms	
Mercure	0,387	0,29	9,145	7,601
Venus	0,723	0,40	12,614	19,414
Mars	1,524	0,71	22,390	59,355
Jupiter	5,201	2,73	86,093	374,31
Saturne	9,533	6,04	190,477	929,32
Uranus	19,22	16,07	412,175	2659,9
Neptune	30,19	30,79	970,993	5235,7

Sachant qu'à 100000x une année réelle représente un peu moins de 5,5 minutes ceci vous donne une idée du temps nécessaire pour un voyage lointain avec Orbiter !

De la même façon, on peut calculer les temps de transfert entre planètes.

Un Mars-Jupiter par exemple donne une période $T = \text{Racine carré de } (1,524 + 5,201)/2)^3 = 6,165 \text{ ans}$
d'où un temps de transfert de $T/2=3,08 \text{ ans}$

3 – Determination de l'instant de tir

Il faut tenir compte du déplacement de la cible pendant le transfert pour tirer "devant" et la rencontrer au bon moment.

Prenons par exemple le cas du voyage Terre-Lune. Comme nous l'avons calculé, le temps de transfert est de 423287 secondes.

La période de révolution de la Lune est égale à 2319900 secondes (26,85 jours) pour décrire les 360° de son orbite.

On peut en déduire par une règle de trois que pendant le temps de transfert de S à C sur la HTO la Lune se sera déplacée d'un angle $\text{CoRC} = 360 \times (423287/2319900) = 65,68^\circ$ (voir la première figure)

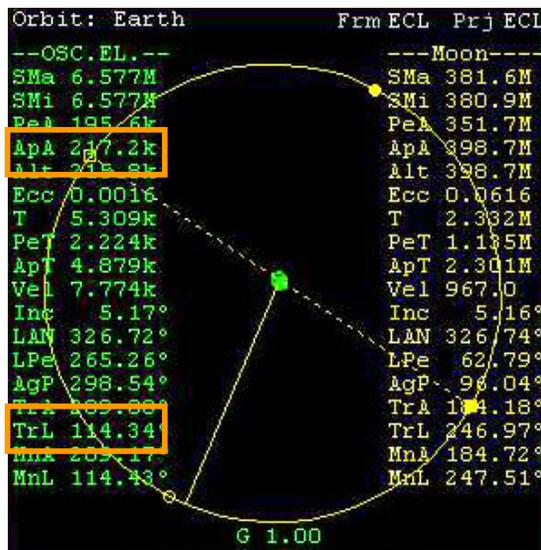
Pour réaliser la rencontre, il faudra donc tirer quand l'angle $\text{SRCo} = 180 - 65,77 = 114,32^\circ$ en se plaçant en position prograde et en allumant jusqu'à ce que l'apogée de l'orbite soit égale au rayon de l'orbite lunaire

Dans le cas où l'on va vers une cible dont l'orbite est plus petite que celle de la source, il faut se placer en position rétrograde et allumer jusqu'à ce que le périégée soit égal au rayon de l'orbite de la cible

On ne dispose pas d'informations pratiques pour déterminer quand l'angle SRCo est atteint et de plus il faut que la source soit bien positionnée sur son orbite au moment de l'allumage en opposition par rapport au point théorique de rencontre.

On peut faire un allumage manuel dans le cas simple d'un départ pour la Lune ou la source est le vaisseau et la cible est la Lune avec la Terre comme corps de référence.

Le MFD Orbit permet la manœuvre. Il est préférable d'aligner les plans orbitaux au préalable



Quand TrL atteint la valeur calculée pour l'angle SRCo - soit $114,34^\circ$ - il suffit d'allumer en position prograde jusqu'à ce que ApA vaisseau = Alt lune

Il est préférable de prendre Alt lune plutôt que ApA lune car l'orbite de la Lune est assez excentrique et on l'approche au mieux en prenant cette valeur pour notre orbite.

En 4 jours de transfert, Alt ne bouge pas beaucoup et on doit croiser la Lune assez près.

Dans tous les cas autres qu'un transfert d'une planète vers un de ses satellites le lancement manuel est trop difficile et le résultat serait mauvais.

Utilisez un calculateur comme TransX ou IMFD pour réaliser l'opération, c'est plus sûr !

Bon voyage !

A3 – Exemples de "SlingShot"

Ces exemples sont pris à partir de lancements réalisés pour différents satellites. Ils utilisent les dates réelles qui correspondent à des positions de planètes favorables. On prendra un Delta Glider en lieu et place du satellite si on veut simuler le trajet

1 – Terre – Pluton avec la sonde New Horizons

La sonde New Horizons a été lancée le **19 janvier 2006, à 19h00 UTC** (MJD = 53754.79) sur l'aire de lancement de Cap Canaveral

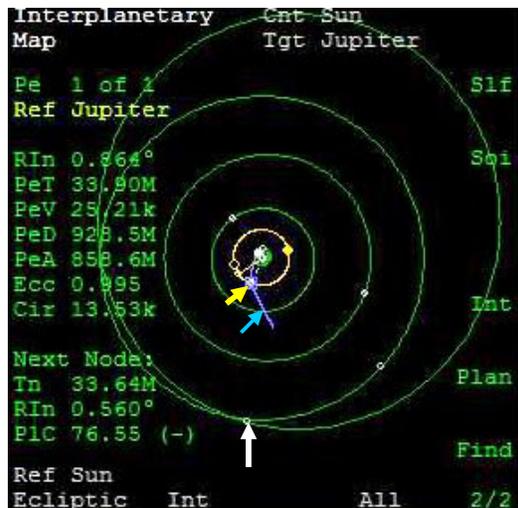
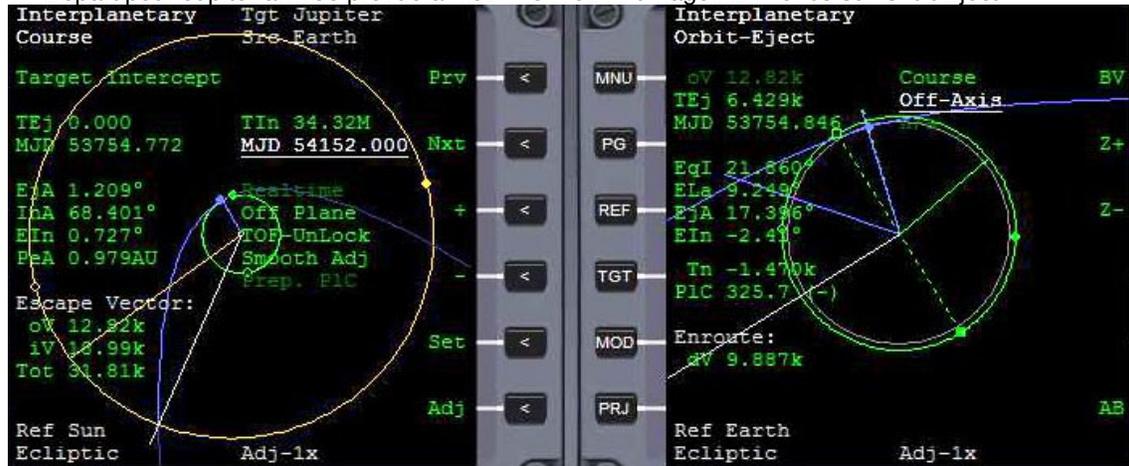
La trajectoire a été calculée se diriger vers Jupiter à environ 14 km/s et en faire le survol le 28 février 2007 (MJD = 54152) à une distance de 2.3 millions de km pour profiter d'un effet de "fronde gravitationnelle" accélérant sa vitesse à 20 km/s en direction de Pluton avec une inclinaison éclipique de l'orbite de 2.5°. Elle devrait survoler Pluton le 14 juillet 2015 (MJD = 57217) après plus de 8 ans de voyage.

Nous allons réaliser ce vol avec un DG que nous avons mis en orbite autour de la Terre avec un plan orbital aligné sur celui de Jupiter

Charger le scénario **22 – News Horizons** qui nous place en orbite le 19 janvier 2006 à 18h30 **Il est nécessaire de charger Pluto-Charon_v2.0.zip sur OrbitHangar pour pouvoir faire cet exercice (ou tout autre addon ajoutant Pluton qui n'est pas dans Orbiter de base.**

Nous appliquerons la méthode expliquée au chapitre 10 page 47

1 - Départ pour Jupiter arrivée prévue à MJD = 54152 Allumage AB = 670s sur Orbit Eject



En ouvrant Map après l'injection en orbite et en zoomant en moins, on voit en bleu l'orbite prévue vers et après Jupiter et on constate qu'au moment de la rencontre (flèche jaune), la position de Pluton (actuellement flèche blanche) permettra d'utiliser Jupiter pour l'effet de fronde en modifiant notre orbite.

Pluton sera plus vers la droite quand on y parviendra puisqu'un peu plus de 8 ans se seront écoulés.

Pluton ayant une période de révolution d'environ 247 ans, elle aura décrit en 8 ans un arc d'environ 12°

Sauvegarder cette situation pour pouvoir la reprendre après ce qui suit

Utilisation de IMFD version 5.3 - Exercices



En faisant MJD = 57217 date prévue pour l'arrivée en utilisant le scénario Editor on a sur Map la position des planètes à cette époque.

On voit la position de Pluton qui sera favorable après modification de l'orbite en SlingShot

L'orbite en bleu est fictive et dessinée pour l'explication.

2 – Reprenons la sauvegarde pour continuer le voyage.

Quand Tin = 17M faire une correction à mi course avec Target Intercept avec Src =GL-01. Allumage par AB . Temps BT< 9s

Quand G=0.01 pour Jupiter sur le MFD Orbit (on entre sous influence) on va corriger la trajectoire avec Planet Approach couplé au mode Plan avec Ref = Jupiter



On ne peut pas descendre EqI en dessous de 3.329 ° et nous nous en contenterons au lieu des 2.5 ° réels. On prend PeA = 500M pour approcher assez près de Jupiter

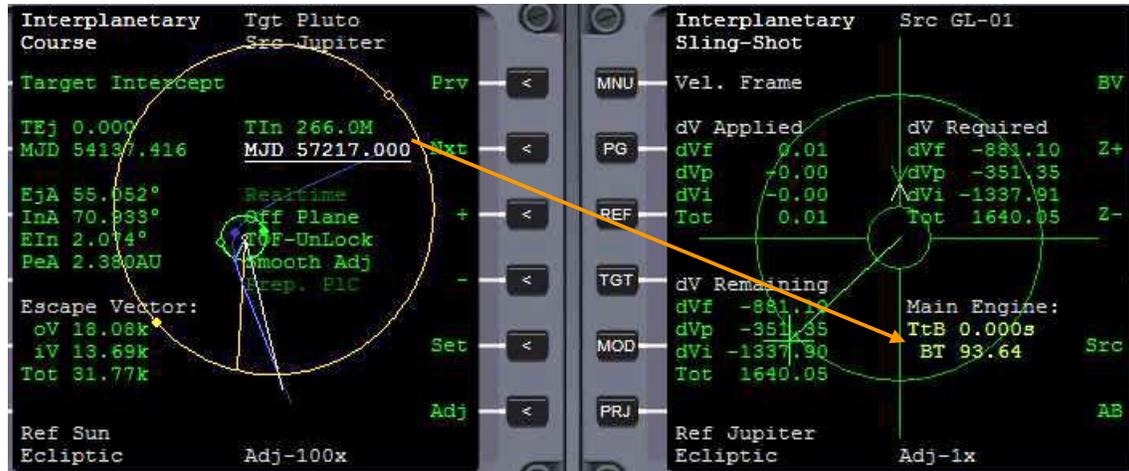
Quand G=0.2 sur le MFD Orbit, coupler Map avec TGT =Pluto



Utilisation de IMFD version 5.3 - Exercices

Faire varier PeA sur Planet Approach pour réduire PeA sur Map le plus possible. On ne peut pas obtenir une valeur réduite pour un voyage aussi long. Faire au mieux
Allumage par AB sur Planet Approach BT < 41s

Quand G= 0.5 sur MFD Orbit, ouvrir Target Intercept à la place de Planet Approach.
Prendre Src = Jupiter, TGT = Pluto et coupler Slingshot en OpMode shared



Faire varier Tin pour réduire BT le plus possible. On pourrait réduire jusqu'à 70s mais comme nous voulons arriver à MJD = 57217 c'est cette valeur que nous choisirons et elle nous donne BT < 94 s

Il n'y a plus qu'à continuer le voyage jusqu'à Pluton !

2 – Terre – Saturne avec la sonde Cassini Huygens

La sonde a été lancée le 15 octobre 1997 à 8 h 43 UTC depuis Cap Canaveral. Destination Saturne
Le voyage a été effectué en utilisant 4 fois l'effet de fronde :

- Avec Venus le 27 avril 1998 (MJD = 50930) et le 24 juin 1999 (MJD = 51353)
- Avec la Terre le 18 août 1999 (MJD = 51408)
- Avec Jupiter le 30 décembre 2000 (MJD = 51908)
- Mise en orbite autour de Saturne le 1^{er} juillet 2004 (MJD = 53187)

Survols de Venus le 27 avril 1998 à une vitesse de 11,7 km/s et à une altitude de 300 km

Correction de trajectoire le 3 décembre 1998

Survols de Venus le 24 juin 1999 à une vitesse de 13.6 km/s et à une altitude de 600 km

Entrée dans une orbite de transfert vers la Terre. Survols de la Terre le 18 août 1999 à une vitesse de 19.1 km/s et à une altitude de 1200 km

30 décembre 2000 survol de Jupiter à 84,4 millions de km à une vitesse de 11,6 km/s et départ pour Saturne

Vous pourrez essayer de simuler le voyage mais c'est très difficile.

En utilisant Map de IMFD et en faisant varier MJD avec le Scenario Editor, on peut observer les positions respectives des planètes au moment où on utilise l'effet de fronde et au moment de la rencontre avec l'objectif final.

Il n'est pas facile de calculer les fenêtres de tir sans disposer d'éphémérides astronomiques et d'un programme de calcul spécifique aussi il vaut mieux se baser sur des tirs réels si on veut s'amuser.