

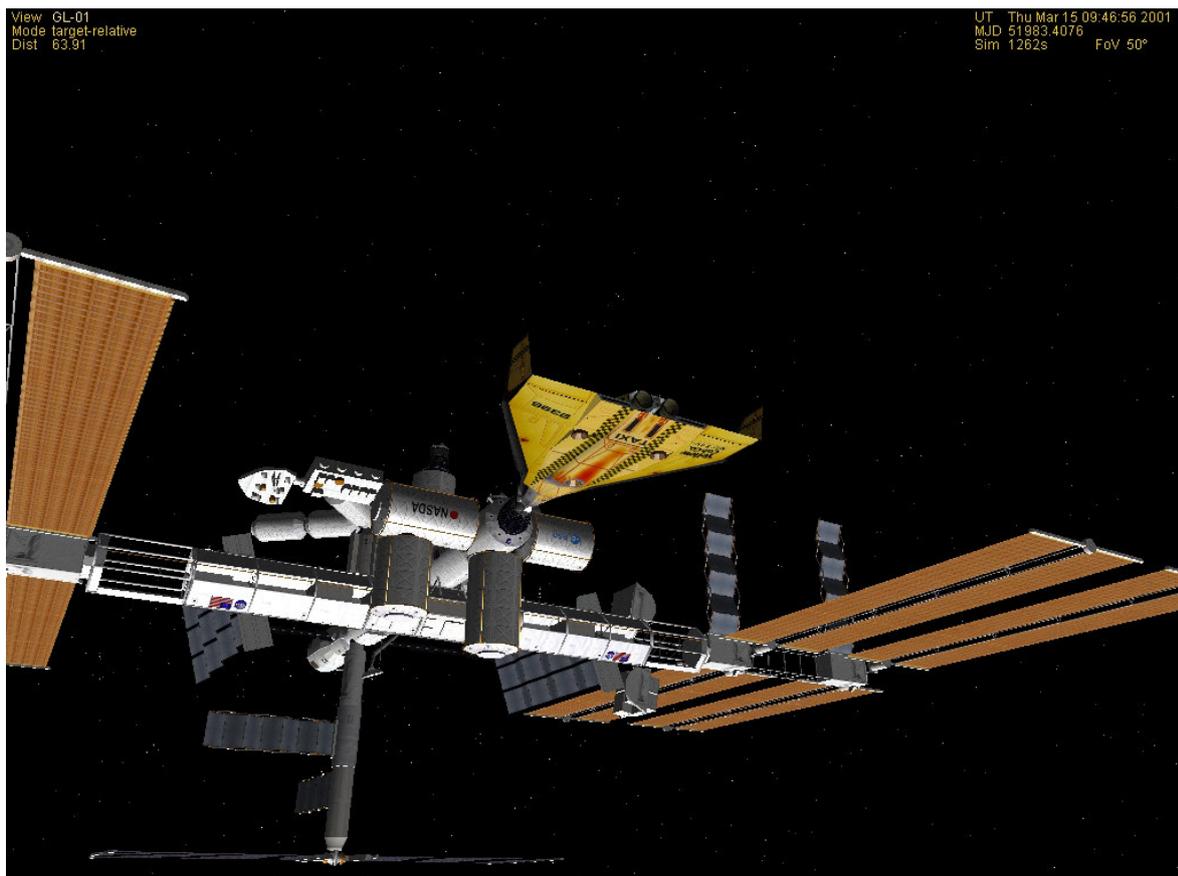
REUSSIR UN RENDEZ-VOUS

Théorie et pratique

Par Papyref

Février 2005

Septembre 2005 – mise à jour pages 9 et 10



Mise à jour le 4/9/2005

0 – Intro

J'espère que vous serez intéressé par la technique du rendez-vous. Elle est assez mal expliquée dans le manuel de base et je vais essayer de la détailler. Je vous assure que c'est plus amusant que les voyages au long cours Terre Mars ou plus loin et en tout cas elle vous permet d'apprendre à maîtriser vos moteurs et à mieux assimiler les lois de la mécanique céleste.

Je suppose que vous avez lu le manuel de base très bien traduit en français par nos amis Mustard et SimFan et que vous savez utiliser le DeltaGliderIII de Dan Steph et les différents MFD

Je suppose aussi que vous avez lu mes notes sur la navigation dans l'espace et que vous êtes en forme.

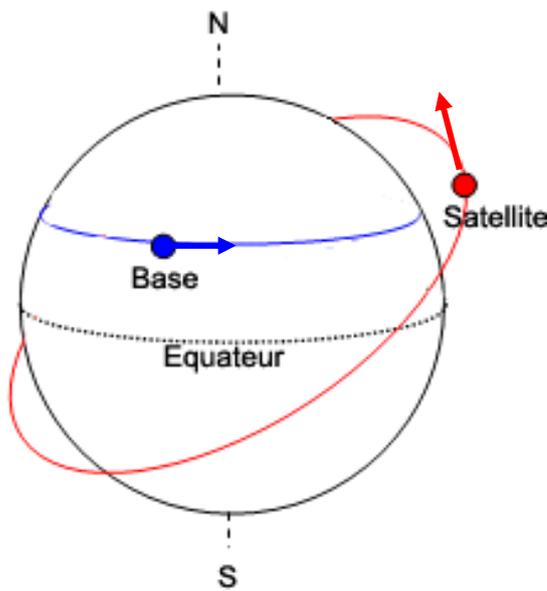
Vous verrez, ce n'est pas facile et vous devrez recommencer sûrement plusieurs fois l'exercice avant d'avoir la joie de réussir un arrimage avec ISS ou je vous attends avec des petits fours.

Pensez à faire des sauvegardes et que la force soit avec vous !

1 – UN PEU DE THEORIE

Nous voulons lancer un vaisseau depuis une planète pour rejoindre un satellite en orbite autour d'elle. Nous souhaitons dépenser le moins de carburant possible.

1.1 Première phase – Mise sur orbite



A l'instant initial, par rapport à l'axe de la terre, la base et le vaisseau tournent dans le sens rétrograde (inverse des aiguilles d'une montre quand on regarde depuis le nord) à une vitesse de 350 à 400 m/s sous nos latitudes. Le satellite tourne normalement dans le sens rétrograde (pour raison d'économie de carburant au lancement) à une vitesse de l'ordre de 7500 m/s pour les satellites courants.

Notre problème est simple :

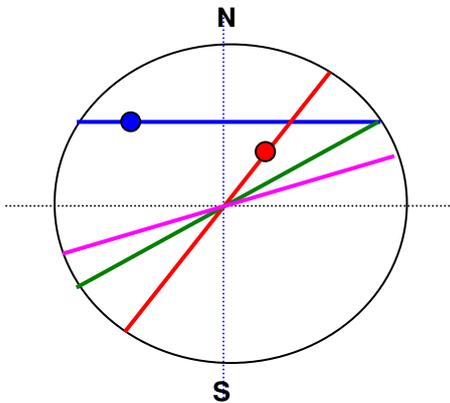
A la fin du lancement, le vaisseau doit se retrouver à l'altitude du satellite à la même vitesse et à la même position que lui.

Notre premier impératif est de lancer au bon moment pour que le plan orbital de notre vaisseau se trouve le plus possible dans celui du satellite visé.

Comme nous l'avons déjà vu, pour réduire l'inclinaison entre deux plans de la meilleure façon, il faut agir aux points nodaux. Le problème est le même ici

Il est le plus économique de lancer au point où la base dans sa rotation va passer dans le plan de l'orbite du satellite en prenant un cap de lancement proche de l'inclinaison de l'orbite du satellite. De cette façon le plan orbital de notre vaisseau doit être proche de celui du satellite et la dépense en énergie sera faible pour diminuer l'inclinaison relative résiduelle.

Nous venons de découvrir la ou les **fenêtres de lancement** comme le montre la figure suivante



Nous nous sommes placé dans le plan de l'orbite du satellite.

Si la trajectoire (en rouge de profil) à une inclinaison qui lui fait dépasser la latitude de la base (ligne bleue), il y a deux points d'intersection pour la trajectoire de la base donc deux fenêtres de lancement par jour.

Si la trajectoire (en vert) à une inclinaison qui lui fait juste atteindre la latitude de la base, il n'y a qu'un point d'intersection donc une fenêtre de lancement par jour.

Si la trajectoire (en violet) a une inclinaison inférieure à la latitude de la base il n'y a pas de fenêtre de lancement. On peut lancer mais ça coûtera cher pour rejoindre le satellite.

Plus la latitude de la base est proche de l'équateur et plus il y a de chances d'avoir une fenêtre de tir. Vous sentez l'intérêt de Kourou ?

Bien! Nous avons eu une fenêtre, nous avons bien tenu le cap au départ et notre trajectoire est bonne.

Comme il ne faut pas espérer rejoindre le satellite du premier coup, nous devons nous placer sur une orbite d'attente ou nous finirons d'aligner les plans orbitaux.

Toujours pour des raisons d'économie, il est préférable de nous placer sur une orbite plus basse que le satellite pour dépenser moins d'énergie avant le dernier bond pour le rejoindre (à quoi bon monter au 6^{ème} étage si on ne veut aller qu'au 4^{ème} ?)

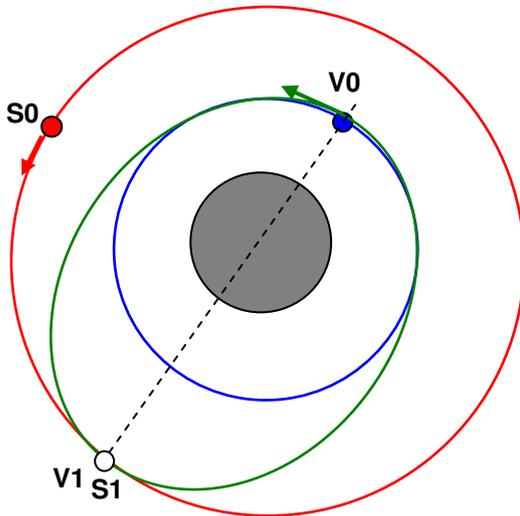
Retenons pour cette première phase

- **Avoir une fenêtre de lancement**
- **Lancer au point où la base croise le plan de l'orbite du satellite**
- **Lancer avec l'inclinaison de l'orbite du satellite en ce point**
- **Se placer sur une orbite d'attente plus basse que celle du satellite**
- **Aligner les plans orbitaux**

2.2 – Deuxième phase - Rejoindre le satellite

Notre vaisseau et le satellite tournent maintenant dans un même plan autour de la planète. Il faut les faire se rencontrer et en ce point se mettre à la même vitesse que le satellite, ce qui nous fera décrire une orbite théoriquement identique à la sienne.

Je dis théoriquement parce qu'il est difficile et pas souhaitable que la rencontre se fasse à une distance nulle ce qui provoquerait la destruction des deux.



Si nous sommes en V0 et le satellite en S0 et que en augmentant l'apoapsis de notre orbite nous arrivons (après une ou plusieurs orbites) en même temps à un point d'intersection (V1,S1), c'est gagné !

L'idéal pour ne pas gaspiller d'énergie et que notre Apoapsis soit le plus tangent possible à la trajectoire du satellite au point de rencontre théorique.

Si vous avez déjà lu mes élucubrations, vous vous souvenez que plus un satellite est près de la planète de référence, plus sa vitesse est élevée. En conséquence, V qui est sur une orbite plus basse va plus vite que S et arrivera toujours avec le temps à se positionner en avance ou en retard par rapport à lui.

Il faut trouver un instant favorable pour **augmenter l'Apoapsis en accélérant** en un point V0 tel que que le temps de trajet S0S1 soit égal à V0V1 au point d'intersection des orbites.

En ce point V et S auront alors la même vitesse puisqu'à égale distance de la planète

On pourrait avoir deux intersections si les orbites se coupent.

On peut envisager d'arriver un peu avant au point théorique et l'on précède S, ou un peu en retard et on le suit.

Si nous étions dans la situation inverse ou notre vaisseau serait sur une orbite plus haute (Inversez V et S) il faudrait **ralentir pour diminuer le Periapsis** et venir tangenter l'orbite basse.

Le seul problème va être de trouver le bon moment pour déclencher la manœuvre de changement d'orbite. Il nous faudra un calculateur nous le verrons plus loin.

Retenons pour cette deuxième phase :

- ***Si nous sommes en orbite "basse" il faut augmenter notre Apoapsis en accélérant.***
- ***Si nous sommes en orbite "haute" il faut diminuer notre Periapsis en ralentissant***
- ***Il faut le faire au bon moment pour synchroniser les points de rencontre***

Nous utiliserons dans l'exercice en expliquant ses fonctions le module de synchronisation **SYNC ORBIT** de Orbiter

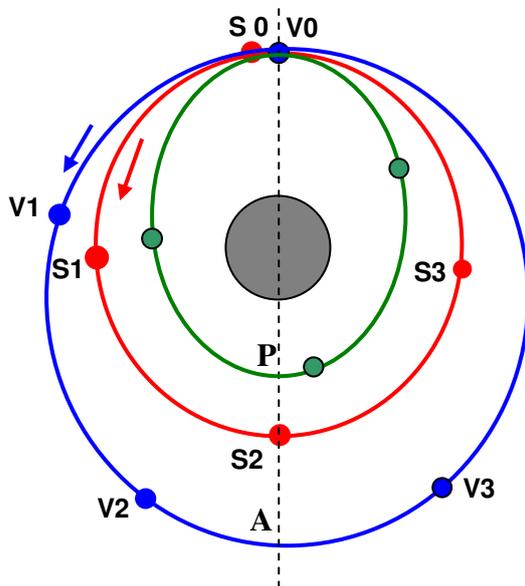
2.3 – Troisième phase - Approche finale

Si nous sommes seulement allé voir on peut se contenter après la rencontre, de se mettre en orbite circulaire, de contempler et de laisser ensuite nos chemins s'éloigner, mais normalement nous sommes venus pour nous arrimer à une station comme Mir ou ISS.

Si nous avons bien travaillé jusque là, notre vitesse est pratiquement la même que celle du satellite à la même altitude et dans la même direction, et dans le même plan et nous devrions décrire sensiblement la même orbite que notre objectif. Nous ne devrions pas être trop éloigné de l'objectif. Notre vaisseau peut être un peu devant la station ou un peu derrière et/ou légèrement décentré par rapport à son orbite (les plans orbitaux ne sont peut être pas rigoureusement les mêmes). Il faut finir de le rejoindre.

Simple pensez vous ! Si je suis derrière, j'accélère et si je suis devant, je ralentis. Vous n'avez pas du bien lire mes précédentes notes si vous pensez cela...

Vous allez comprendre en regardant la figure suivante (j'ai exagéré l'excentricité pour la compréhension mais vous êtes peut être un fou de l'accélérateur)



Le satellite et le vaisseau suivent sensiblement la même orbite en rouge à l'instant 0 avec un retard de V_0 par rapport à S_0

A cet instant, vous imaginez d'accélérer pour rejoindre S_0 **et vous avez perdu !** Vous augmentez alors l'Apoapsis A de la trajectoire du vaisseau.

Hors vous savez que plus on s'éloigne de la planète de référence, et plus la vitesse diminue (pour les curieux c'est une des lois de Kepler)

Le vaisseau V va voir sa vitesse diminuer au fur et à mesure qu'il se dirige vers A. Il n'y a pas besoin d'être mathématicien pour comprendre que par rapport à S qui va toujours à la même vitesse et qui en plus décrit une trajectoire plus courte, nous allons prendre du retard.

L'écart entre V et S augmente et quand nous serons revenu au point 0 nous serons encore plus éloigné de notre objectif

Alors que faire ?

La solution est de ralentir en freinant ce qui nous semble idiot si on veut rattraper et pourtant la mécanique céleste est ainsi faite.

Puisqu'on ralentit, on rapproche le point opposé donc on crée un Periapsis P. Nous nous rapprochons de la planète de référence en nous dirigeant vers lui et notre vitesse augmente.

En plus nous décrivons une trajectoire plus courte donc nous rattrapons S et nous pouvons même le dépasser au retour au point 0.

Nous le rattrapons en passant "sous son ventre" peut on dire. Si nous dosons bien le temps d'allumage pour ne pas trop nous écarter de l'orbite initiale nous pourrions le rattraper avant d'être revenu au point 0 sans être trop "en dessous" et nous pourrions alors faire des petites rectifications avec les moteurs de translation pour finir de nous positionner parfaitement à une bonne vitesse

Si vous inversez la situation en supposant que vous êtes S et que le satellite est V vous êtes devant il faudra accélérer pour prendre la trajectoire en bleu pour qu'il puisse vous rattraper.

Retenons pour cette troisième phase les principes qui semblent idiots mais réels dans l'espace:

- ***Si je suis derrière ma cible, je dois freiner pour la rattraper***
- ***Si je suis devant ma cible, je dois accélérer pour la rattraper***

2.4 – Quatrième phase – Arrimage

Nous devons nous trouver à courte distance de notre but. Nous allons devoir orienter le vaisseau correctement et le placer dans l'axe du port de docking de la station.

Nous utiliserons pour cela le système RCS auxiliaire qui nous permettra de réaliser des petites translations et des rotations pour nous positionner définitivement dans l'axe et nous arrimer. Cette fois-ci nous avons le droit de donner de petites impulsions pour nous rapprocher du but mais elles auront tendance à nous faire dévier par rapport à notre orbite. Comme l'écart reste petit nous devons le rectifier par des petites translations latérales pour nous replacer sur l'axe.

Nous nous aiderons du module **APPR/DOCK** pour cette dernière manœuvre ou avec un peu d'entraînement nous ferons une approche "à vue" depuis la cabine ou même en nous plaçant à l'extérieur.

L'appréciation visuelle peut tromper et il faut un peu d'entraînement pour l'utiliser. Il vaudra mieux se fier aux instruments plutôt que de conduire "au pif"

Attention à ne pas trop vous éloigner de l'orbite pendant les manœuvres. Soyez prudent et dosez les impulsions !

Faites le calcul par exemple pour une orbite circulaire en vous servant des formules que j'ai donné dans ma première note et qui donnent la vitesse V et la période T pour une orbite située à la distance $R+H$ d'un corps de rayon R et où l'intensité de la pesanteur au sol est G .

$$V^2 = G * R^2 / (R+ H)$$
$$T = 2*PI*(R+H) / V$$

Prenons un satellite à la distance du sol $H = 300000$ m tournant autour de la terre de rayon $R = 6400000$ m (pour simplifier) avec un champ de gravité de $9,81 \text{ m/s}^2$ au niveau du sol. On obtient $V = 7744,209199 \text{ m/s}$ et $T = 5435$ secondes (en arrondi). Si on fait le même calcul nous plaçant 10 m au dessus de cette orbite, soit à $H = 300010$ m, on obtient $V = 7744,203419 \text{ m/s}$.

Nous avons ralenti d'environ $0,6 \text{ cm/s}$ comme prévu puisque nous sommes plus haut de 10 m. Ça paraît ridicule mais si vous prenez le temps du satellite pour parcourir son orbite qui est de 5435 secondes, le corps qui se trouvait 10 m au dessus au départ aura parcouru $0,6 \times 5435 = 3261 \text{ cm}$ en moins **soit près de 33 m sur son orbite** (plus de 35 m en distance d'un point à un autre) Voilà pourquoi on attache les cosmonautes pendant leur sortie...

2 – EN PRATIQUE

Nous allons utiliser le scénario **DG-S ready for takeoff.scn** qui est dans le sous dossier "Delta Glider" du dossier Scénario

Je vous conseille de modifier le scénario pour avoir **GL-01:DeltaGliderIII** au lieu de **GL-01:DG-S** de façon à pouvoir utiliser la merveilleuse bécane de Dan Steph pour opérer le lancement programmé sinon la mise en orbite manuelle est un peu délicate.

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

Les valeurs que vous obtiendrez peuvent être un peu différentes de celles des photos de MFD. C'est normal en fonction de la position au moment où elles sont faites

2.1 – Lancement

Il nous faut choisir le cap et l'instant du lancement

Ouvrir la Map sur le MFD de gauche et entrer l'objectif par Shift+T puis ISS

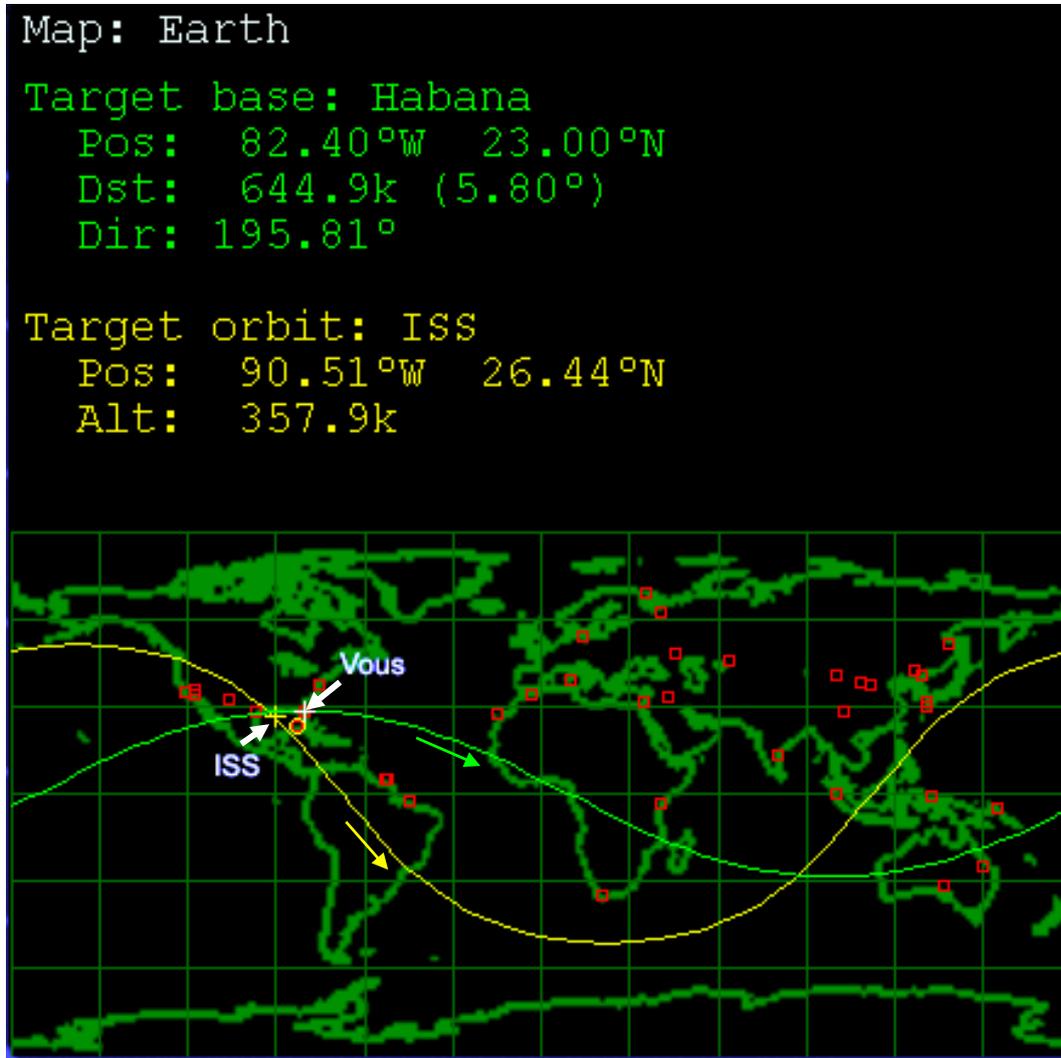


FIG 1

En projection sur le plan de la carte :

- la courbe verte est la trajectoire de la base ou vous êtes posé
- la courbe jaune est la trajectoire de ISS

Les déplacements se font d'Ouest en Est les orbites se faisant normalement comme nous l'avons déjà vu dans le sens prograde.

Vous n'êtes pas dans une bonne fenêtre de tir puisque l'orbite de ISS ne va pas passer au dessus de vous (sur la figure elle n'est pas trop loin et ça serait jouable mais il faut être puriste si on veut être économe)

Si vous tirez en ce moment vous dépenserez trop de carburant ensuite pour aligner les plans orbitaux.

Soyons patients ! Il faut l'être pour être un bon astronaute...

Accélérons le temps pour que la trajectoire de ISS passe au dessus de nous comme ci-dessous et mettons en pause par **Ctrl+P** pour réfléchir (la lecture de la carte est plus aisée en utilisant la fonction Zoom si on le désire)

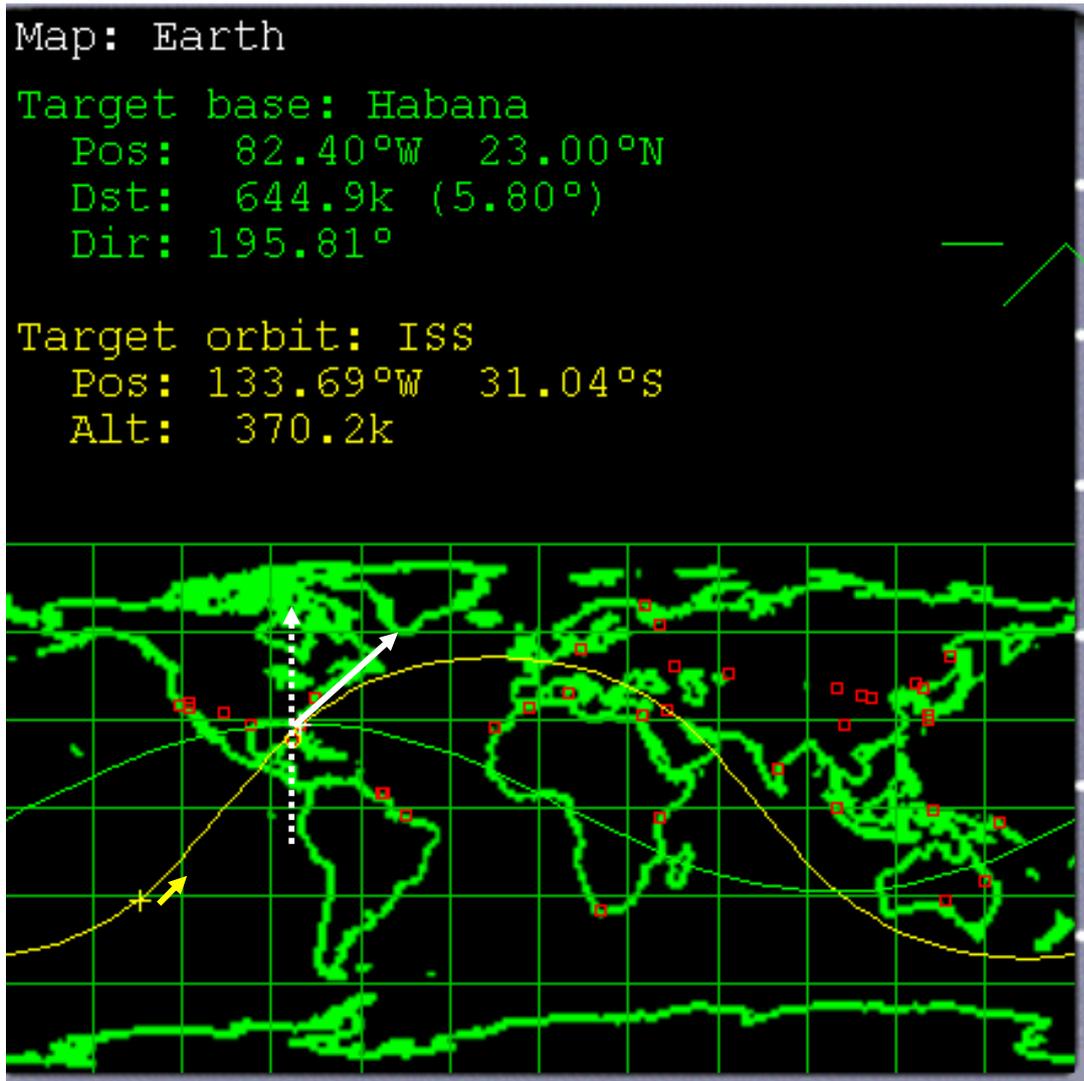


FIG 2

ISS est à 370 Km d'altitude.

Il est assez loin de la base et en arrière de nous au moment de notre lancement (à l'équateur, un carreau sur la carte représente à peu près 333 Km et le satellite est à plus de 650 Km de nous)
 L'idéal serait de lancer alors qu'il vient de passer au plus près de la base mais les plans seraient mal alignés dès le départ puisque l'orbite se décale et nous brûlerions plus de carburant par la suite.
 Tant pis, nous jouerons l'économie et nous lancerons maintenant et en dessous de lui pour dépenser moins d'énergie.

La flèche blanche qui part de notre point de lancement est tangente à la trajectoire de ISS et représente notre direction de lancement (tangente veut dire qu'elle ne coupe pas la trajectoire et ne la touche qu'en un point)

Les angles se mesurent de 0 à 360° en partant du Nord et en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre. L'Est est donc à 90°, le Sud à 180° et l'Ouest à 270°

Nous pouvons estimer sur l'image l'angle du vecteur à environ 45° et nous pourrions prendre ce cap au décollage

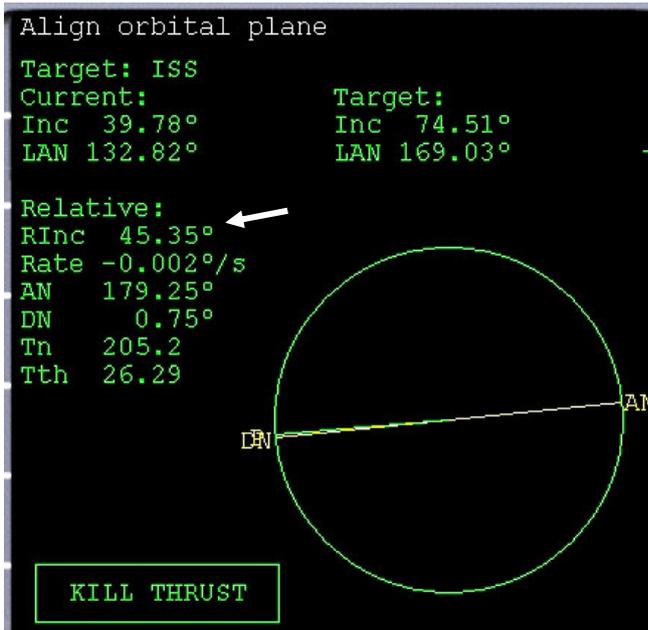


FIG 3

Tout est OK il faut lancer maintenant.

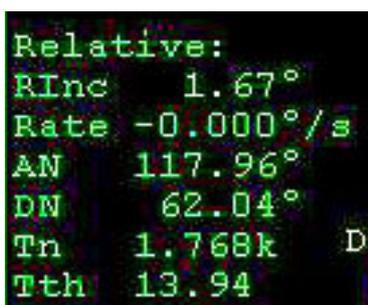
Pour ceux qui utilisent le DeltaGlider de base, il faut lancer en décollant comme un avion et après le décollage virer au cap 45 (échelle du haut sur le HUD) Une fois le cap atteint commencer la montée pour se mettre en orbite à 280 Km (c'est pour avoir la même altitude qu'avec DGIII)

Si vous voulez un bon résultat, il faut maintenir le cap pendant le début de la montée et c'est le plus délicat.

Plus facile en utilisant le DeltaGlider III de Dan Steph il suffit d'utiliser le programme d'ascension **PRO903SPEC45** à lancer après le décollage.

Monter à plus de 1000m avant d'exécuter le programme car le Delta a tendance à descendre en virage serré.

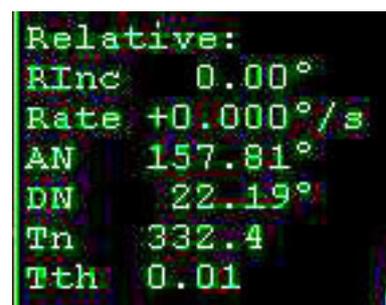
Ensuite vous pouvez regarder le pilote automatique travailler et téléphoner à votre copine jusqu'à la mise en orbite à 280 Km obtenue avec le programme (ne pas oublier de rentrer le train et d'enclencher la turbo pompe à 1000 m)



Voilà le résultat pour mon lancement du jour. Seulement 1,67° d'écart du premier coup ! La mise parfaite à l'alignement ne consommera plus beaucoup

Une petite correction pour finir d'aligner les plans et voilà le résultat à droite avec 13,94 s seulement de temps d'allumage.

C'est bon au prix du baril de faire des économies...



Attention c'est important !

La synchronisation ne fonctionne bien que si les deux plans sont alignés à moins de 1° d'écart

Nous nous contenterons de 280 Km d'altitude parce que le DGIII est programmé pour ça. Il serait possible de modifier le fichier du programme pour monter plus haut. Il est toujours possible de rectifier l'orbite en un deuxième temps.

Il est plus scientifique de procéder comme suit:

- **Shift droit + Q** pour ouvrir sur le deuxième MFD le module d'alignement des plans
- **Shift droit + T** pour sélectionner l'objectif, puis entrer ISS

- Avancer le temps pour avoir DN ou AN sensiblement égal à 0

Si DN = 0 alors Cap = 90° - RInc
Si AN = 0 alors Cap = 90° + RInc

Si DN=0 le satellite passe sur son orbite en se déplaçant vers le Nord (c'est notre cas fig 2 et on lancera vers l'est au cap 45 degrés

Si AN =0 le satellite passe sur son orbite en se déplaçant vers le Sud (ce serait le cas dans 12 heures comme sur la figure 1 on lancerait vers l'est au cap 135 degrés

En pratique il vaut mieux se placer à plus ou moins 50 Km de différence d'altitude par rapport au satellite. Nous nous contenterons de nos 90Km plus bas pour notre exercice.

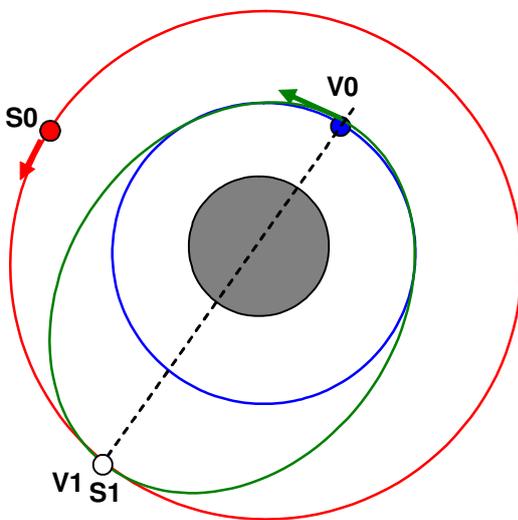
Pour les bons en calcul, la formule donnant un azimuth (cap) de lancement est la suivante:

Azimuth de lancement = arcsin(cos(inclinaison orbitale désirée)/cos(latitude de lancement))

L'inclinaison orbitale est l'inclinaison équatoriale de l'objectif qui peut être lue sur le MFD Orbit en mode EQU

Sauvegarder la situation pour pouvoir reprendre en cas d'échec.

2.2 – Poursuite de la cible



Nous sommes dans cette situation:

S0 est notre objectif à 360 Km d'altitude (ISS)
V0 c'est nous à 280 KM sur une orbite plus basse. Pour la rencontre il nous faut donc créer un Apoapsis pour notre orbite

Il faut trouver une solution pour créer une nouvelle orbite telle qu'après une ou plusieurs révolutions, V0 et S0 arrivent presque en même temps à l'Apoapsis de notre nouvelle orbite que nous voudrions sur l'orbite de S0

Notre pauvre cerveau est incapable de calculer cette orbite aussi nous allons faire appel au module de synchronisation

Vous voudrez bien lire la page 57 de la traduction française du manuel Orbiter pour l'utilisation des commandes du module de synchronisation

Ouvrir le module synchro sur le MFD de gauche en faisant **Shift+Y**
Choisir l'objectif en faisant **Shift+T** puis ISS et Enter

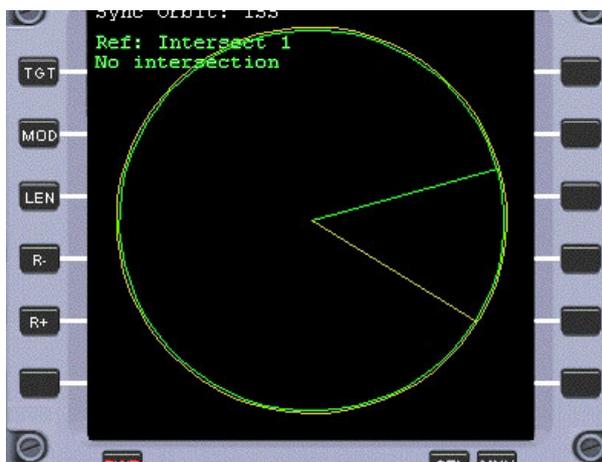


FIG 4

Il n'y a pas d'intersection ce qui n'est pas une surprise puisque notre orbite nettement plus basse ne coupe pas celle de ISS.

Je vous conseille d'ouvrir sur le MFD de droite le module **Orbit (Shift droit+O)** pour visualiser les trajectoires et contrôler ce qui va se passer par la suite.

Avec la touche MOD changer l'affichage sur le module Sync Orbit pour avoir la référence Sh Apoapsis (Sh pour vaisseau donc Apoapsis du vaisseau)

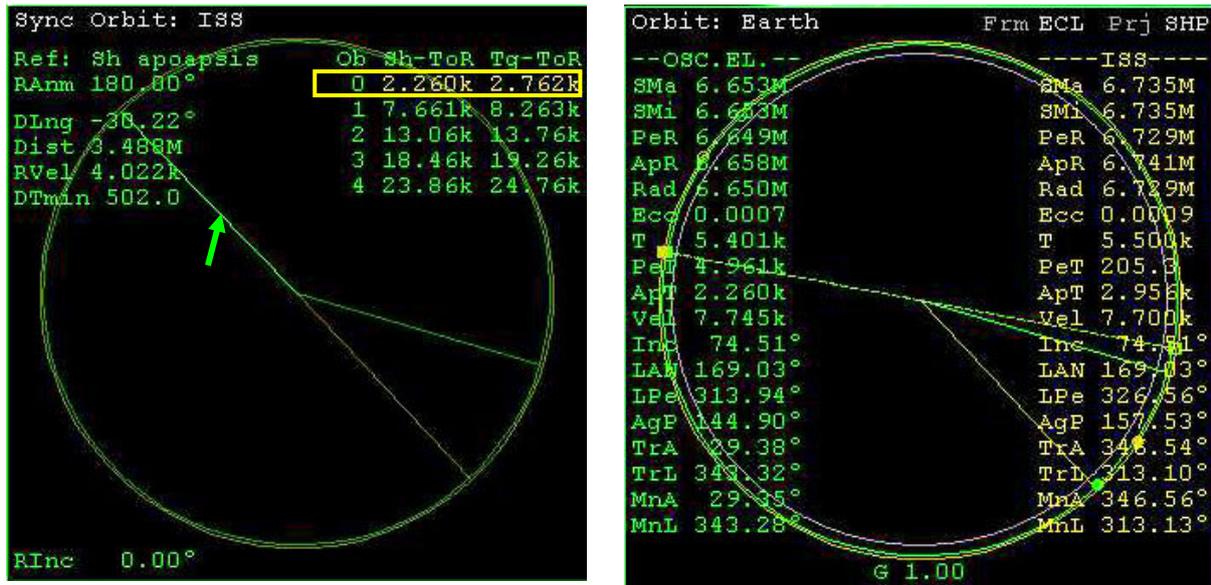


FIG 5

Le module crée si c'est possible un axe de référence (flèche verte) qui dépend du choix fait par MOD

Il y a trois colonnes en haut à droite:

Ob est le n°de l'orbite sur laquelle les temps sont calculés

Sh -ToR est le temps en secondes que le vaisseau mettrait pour atteindre l'axe de référence

Tg-ToR est le temps en secondes que l'objectif mettrait pour atteindre l'axe de référence

Dans ces colonnes il y a deux temps éclairés en jaune (pas forcément à la même orbite) qui vont servir à régler notre orbite de transfert

Enfin à gauche figurent deux valeurs importantes:

Dist donne la distance séparant le vaisseau de l'objectif (ici 3488 km)

DTmin donne l'écart de temps minimum au passage à l'axe de référence

Avec le choix MOD on peut prendre différemment la ligne de référence:

Sh periapsis au periapsis du vaisseau si nous sommes sur une orbite plus élevée

Tg apoapsis à l'apoapsis de la cible

Tg periapsis au periapsis de la cible

Manual axis on place l'axe de référence où l'on veut

Intersection 1 au premier point d'intersection si les orbites se coupent

Intersection 2 au deuxième point d'intersection si les orbites se coupent

Avec LEN on peut choisir sur combien d'orbites nous allons faire le réglage.

Revenons en à notre problème (Fig 5)

Nous voulons créer un apoapsis il faudra allumer dans le sens prograde pour obtenir le résultat escompté.

Le jeu va consister à allumer en surveillant les valeurs **Sh-ToR** et **Tg-ToR** illuminés en jaune pour éteindre au moment où elles sont égales (elles ne sont pas forcément sur la même ligne horizontale). Il faut également ajuster en final pour que DTmin soit le plus petit possible.

Ca, c'est la théorie.

Je vais vous révéler mes petits secrets pour réussir à percuter ISS du premier coup.

Le module de synchro travaille mieux avec la référence sur une intersection. Nous allons donc procéder comme suit :

Sur le MFD à gauche, afficher le module synchro (**Shift + Y**)

Choisir l'objectif ISS

Sur le MFD à droite, afficher le module Orbit (**Shift droit + O**)

Choisir l'objectif ISS

Nous avons ceci :

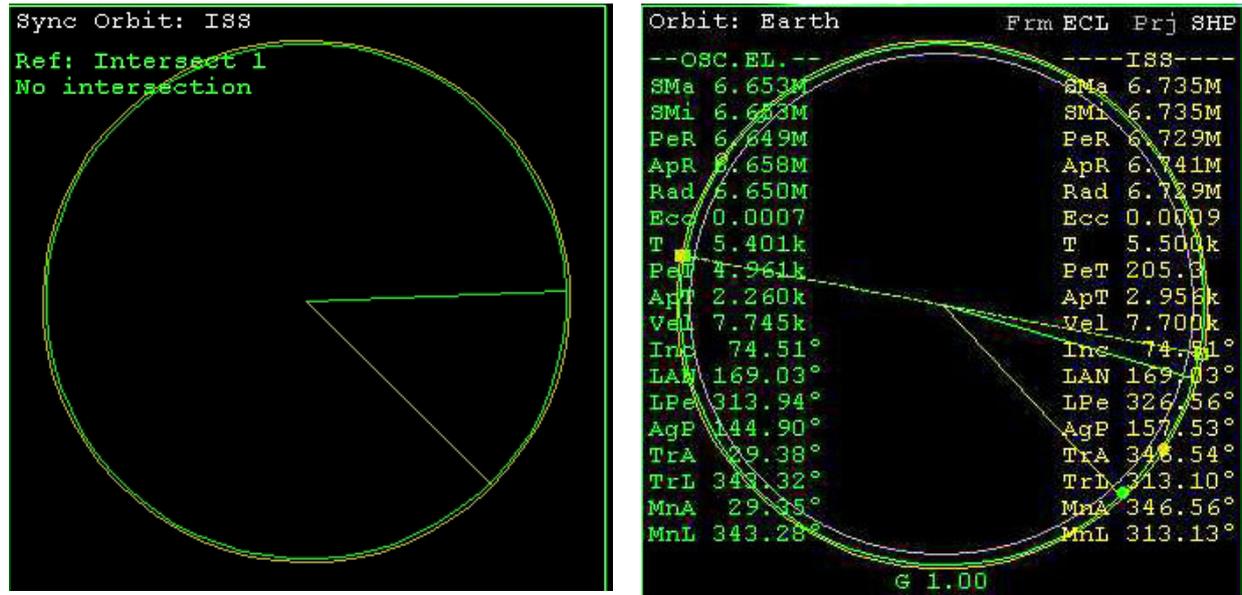


FIG 6

Nous allons augmenter l'Apoapsis de notre orbite pour venir juste couper celle de ISS.

Plaçons nous en position Prograde (touche ^ ou clavier du tableau de bord)

Nous allons allumer en douceur car il n'y a pas beaucoup à gratter (72 Km si vous comparez ApR en vert et ApR en jaune)

Un autre secret pour régler les gaz !

Pour allumer, si vous appuyez sur + vous allumez à 100 % et c'est très brutal

Si vous tenez Ctrl en appuyant sur + vous allumez par crans de 10 % ce qui est plus doux mais attention on ne peut s'arrêter qu'avec la touche *

Si vous trouvez que la variation est un peu lente, donnez des petites impulsions sur + et quand vous le relâchez vous vous trouvez dans la position d'allumage réduit que vous aviez.

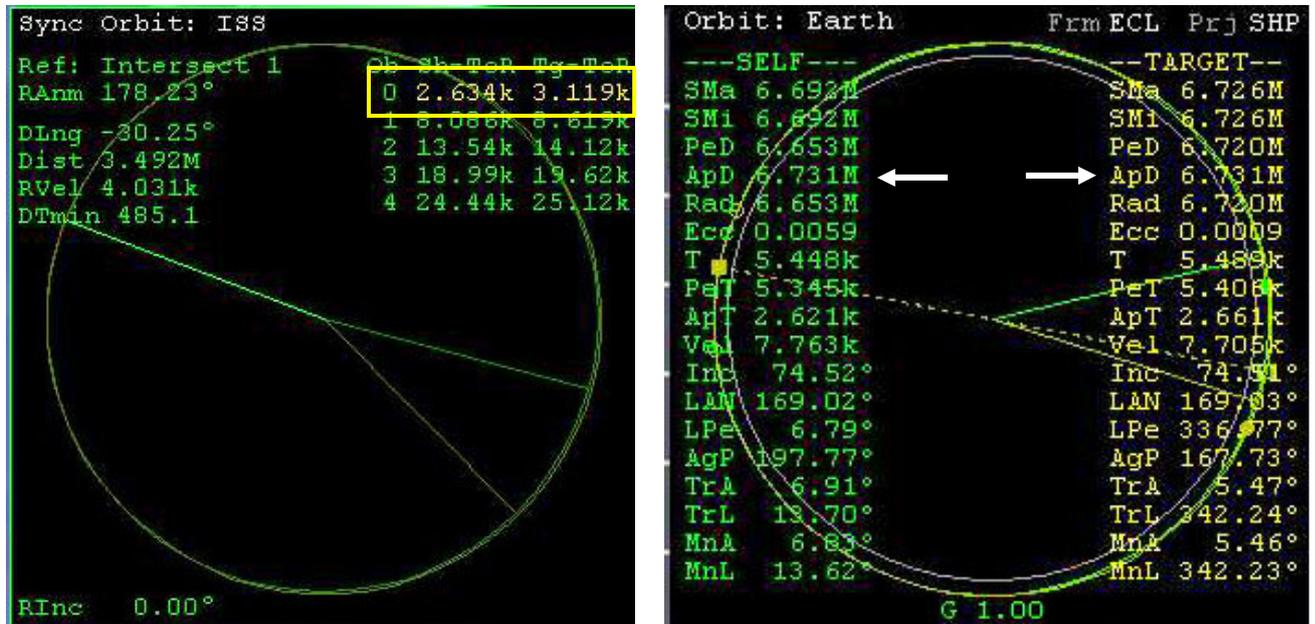
Enfin pour être encore plus doux, vous pouvez passer en mode translation avec la touche / et agir sur les moteurs de translation qui sont moins puissants (touches 9 et 6)

Entraînez vous à manier les moteurs c'est le secret de la réussite dans Orbiter

Dés que ApR en vert atteint la valeur de ApR en jaune, le MFD Synchro réagit pour afficher l'intersection.

Stoppez immédiatement l'allumage

A gauche le MFD nous montre 2 valeurs en jaune qui sont les plus proches pour le passage à la ligne de référence
 A droite vous pouvez voir que Papyref est un chef car **ApR** est rigoureusement le même à 6.731M



Nous allons nous synchroniser sur deux orbites (je suis pressé pour prendre le thé sur ISS)
 Sur le MFD de gauche faire **LEN** et choisir 2 (synchro en 2 tours)
 Vérifier que le vaisseau est en position Prograde et allumer le moteur pour trouver deux valeurs qui coïncident.

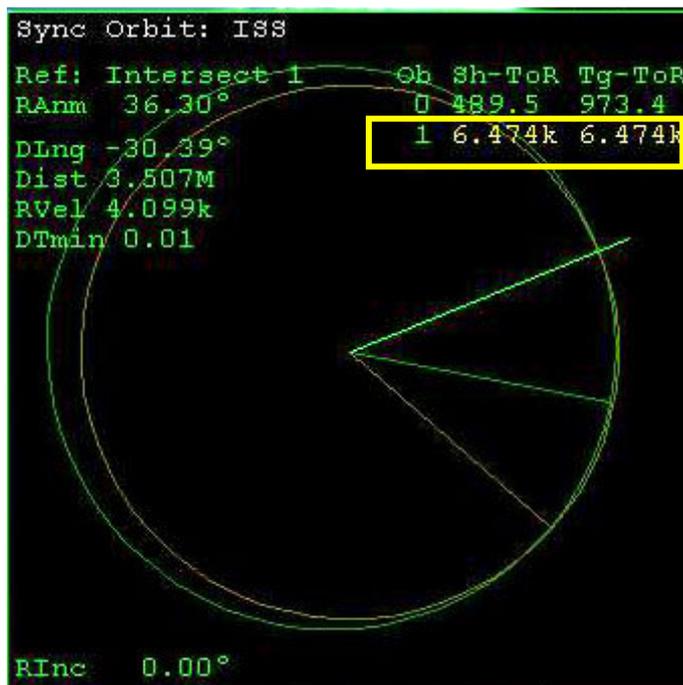


FIG 8

Les valeurs sont dans la même ligne mais elles pourraient être dans des lignes différentes

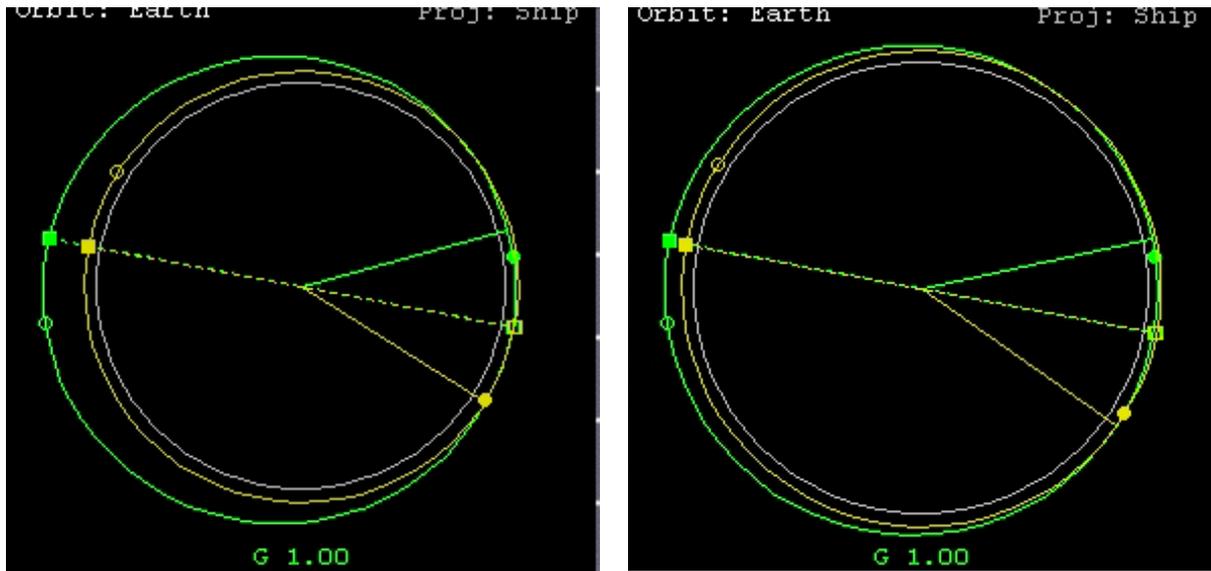
Surveillez bien DTmin pour qu'il soit le plus faible possible.

ISS a une vitesse Vel de 7705 m/s et une seconde de retard ou d'avance nous éloignerait de presque 8 Km du but ce qui est beaucoup.

DTmin = 0.01 nous donne un écart de distance théorique égal à 77 m ce qui est très bon !

En cas de petit dépassement de DTmin, vous pouvez faire des rectifications en donnant des petites impulsions dans le sens retrograde avec la touche - du clavier numérique

Le Delta Glider III est pratique puisqu'il n'y a pas besoin de le retourner. Merci Dan Steph !

Petit commentaire sur le nombre de tours**FIG 9**

A gauche l'orbite du vaisseau (en vert) obtenue pour une synchro à 2 tours et à droite pour une synchro à 4 tours.

Comme on pouvait le prévoir, plus on fait de tours et moins le temps du vaisseau pour parcourir son orbite à besoin d'être long pour réussir la synchronisation. Il faut donc augmenter moins l'Apoapsis et par conséquent user moins de carburant pour la correction.

On peut retenir en général que :

- **si vous êtes pressé faites 2 ou 3 orbites**
- **si vous êtes économe faites 4 à 8 orbites**

Sauvegarder la situation pour pouvoir reprendre en cas d'échec.

Nous n'avons plus qu'à faire nos tours en nous reposant, la suite va être plus hard....

Vous pouvez accélérer la simulation à 100x voir 1000x mais soyez prudent et revenez au temps normal assez tôt pour ne pas louper le rendez-vous (je pense que quand $DT_{min} < 1.000M$ c'est un bon moment pour passer à 10x)

Surveillez bien DT_{min} et Dist sur le module Sync Orbit pour ne pas dépasser votre objectif

2.3 – Réglage des instruments

Avant d'arriver, nous allons profiter de nos instants libres pour régler nos instruments de navigation. Nous disposons de deux instruments de navigation NAV1 et NAV2

- NAV1 nous permet de repérer le satellite à une grande distance en le réglant sur la fréquence de son transpondeur (XPDR)
- NAV2 nous permet de nous guider pour la trajectoire d'approche finale pour l'arrimage (si il est possible) en nous réglant sur la fréquence de l'**IDS** (Instrument **D**ocking **S**ystem) du port ou vous souhaitez vous arrimer.

Pour ceux qui pratiquent le vol en avion, NAV1 correspond au VOR et NAV2 à l'ILS de la piste mais en 3 dimensions

On peut obtenir les fréquences recherchées en faisant **CTRL + I** pour avoir le tableau d'information puis en sélectionnant l'object "Vessel" puis "ISS"

Sur la fig 10 vous voyez les deux parties du tableau avec encadré en jaune la fréquence du transpondeur XPDR pour NAV1 et les fréquences IDS des ports de Docking (je viens de m'arrimer au port n°2 et le texte free a disparu pour être remplacé par GL-01 qui est le nom du DeltaGlider. (je suis en train de boire mon thé !)

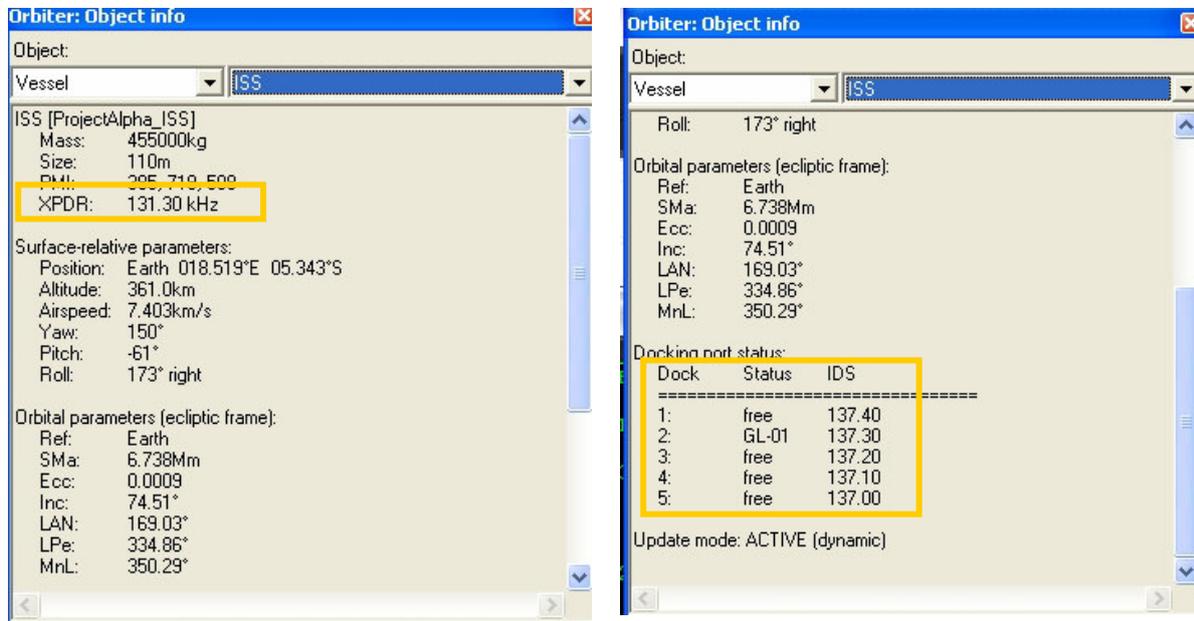


FIG 10

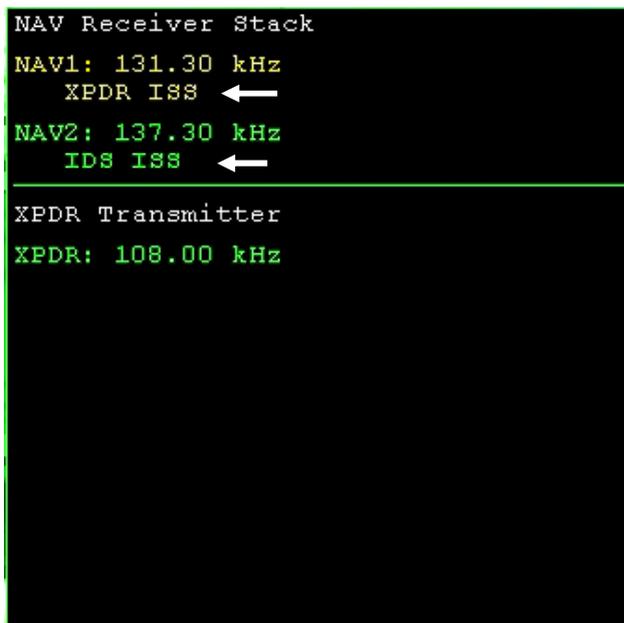


FIG 11

Ouvrir le MFD de réglage à droite par exemple par **Shift droit + C**

Régler les fréquences **NAV1 sur 131,30 et NAV2 sur 137,30** (nous pourrons changer plus tard suivant notre approche finale)

Shift + = ou) pour régler la fréquence
Shift + ^ ou \$ pour régler les centièmes
Shift + ; ou : pour sélectionner la fréquence

Revenir à l'affichage de l'orbite par **Shift droit + O** pour suivre notre trajectoire (c'est instructif)

Les textes repérés par les flèches blanches apparaissent seulement si vous êtes à moins de 1000 Km de la station pour XPDR ISS et à moins de 20 Km de la station pour IDS ISS

2.4 – Approche de la station

Nous sommes en route et si nous avons bien réglé nos fréquences, il est temps de préparer ce qui va nous être utile pour nos manœuvres d'approche.

Afficher le **HUD en vue Dock** en utilisant la touche **H** plusieurs fois s'il le faut
Afficher sur le MFD de droite le module **APPR/DOCK** en utilisant **Shift droit + D**
Afficher sur le MFD de gauche le module **Sync Orbit** en utilisant **Shift + Y**

Nous avons les éléments pour contrôler notre approche.
Pour l'instant nous sommes trop loin (plus de 1000Km) pour que le module **APPR/DOCK** reçoive un signal : affichage NO SIGNAL. (pas de signal)

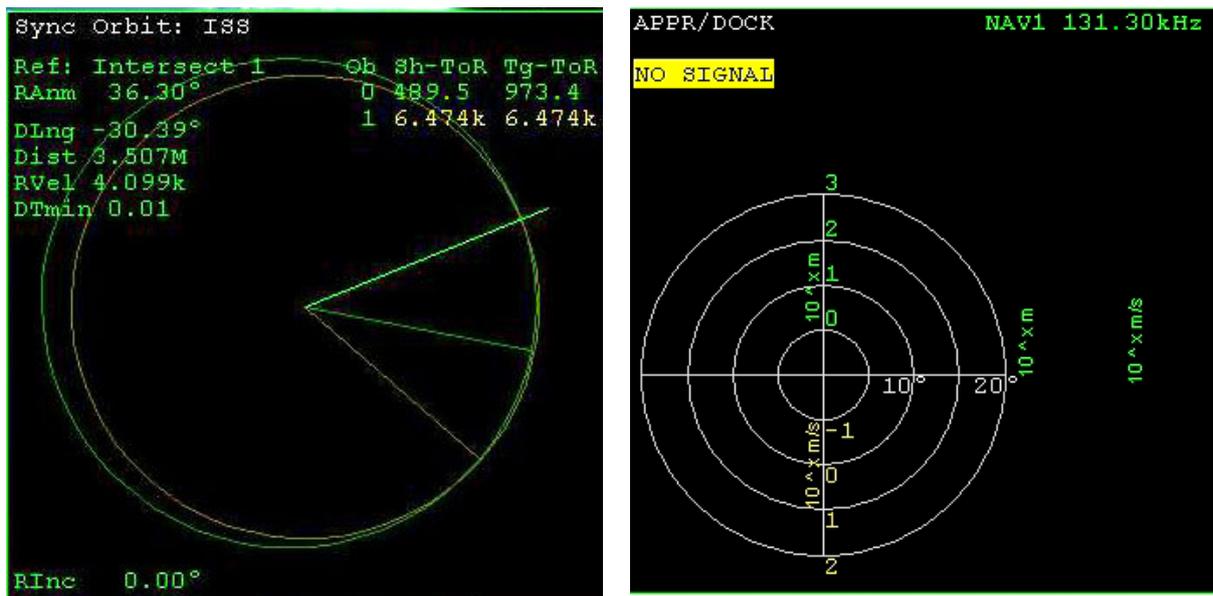


FIG 12

C'est parti pour le carrousel !
Passez à 100x pour le premier tour et faites attention à ne pas chavirer dans les virages !!!

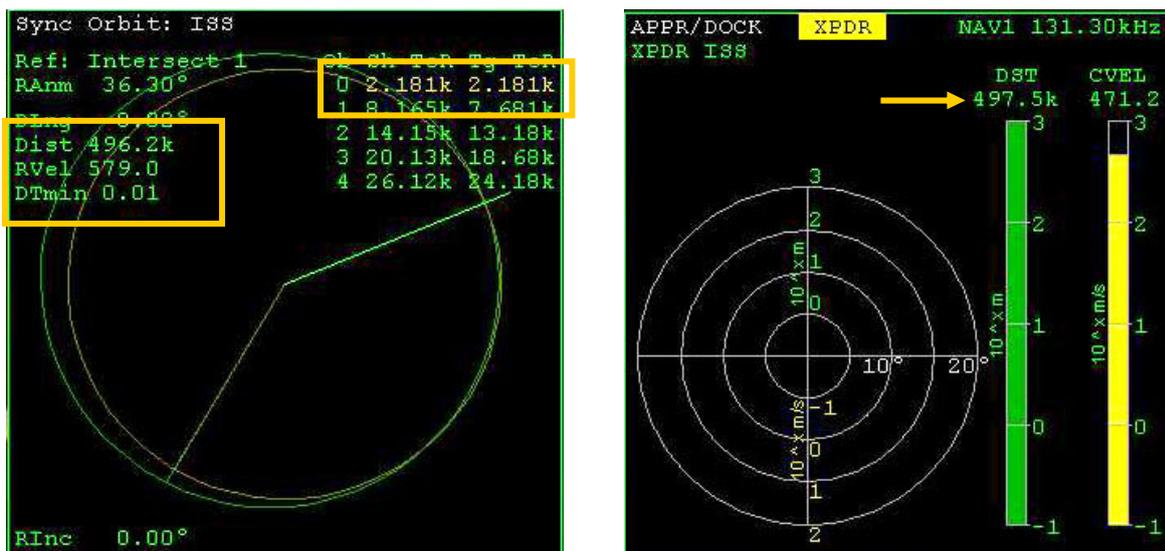


FIG 13

Nous voici au deuxième tour à 497Km de la cible et à 2181 secondes avant de l'atteindre (36 mn 21s)
DTmin = 0.00 et Rlnc = 0.01° ce qui est excellent !

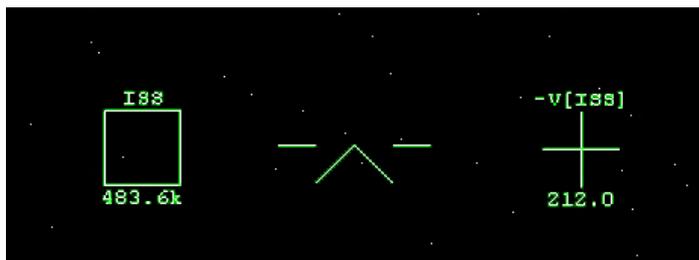
Comme nous sommes à moins de 500Km le module d'approche reçoit le signal sur NAV1 et affiche les informations.

DST donne la distance et **CVEL** nous donne la différence de vitesse entre notre vaisseau et la cible ici 471,2 m/s

2.4.1 - Ce que l'on voit sur le HUD

C'est important pour la suite de bien comprendre ce que veulent dire les affichages particuliers que donne le **HUD en mode DOCK**

Assurez vous d'être en **Prograde** pour faciliter la recherche et en utilisant les touches 1 et 2 du pavé numérique pour faire une rotation vous allez voir défiler les éléments suivants (touche 5 pour arrêter) (les valeurs ne sont pas forcément celle que vous aurez, ces photos servent d'exemple)



Le carré donne la position de ISS
483.6k est sa distance (483,6 Km)
La croix donne la direction du vecteur vitesse relatif **V par rapport à ISS** dans le sens **Prograde**

La différence de vitesse est 212 m/s et le signe – nous indique que pour nous circulariser il faudra se placer dans le sens opposé (croix dans un cercle)



La croix dans un cercle donne la direction du vecteur vitesse relatif **V par rapport à ISS** dans le sens **Retrograde**

Même chose pour le signe que pour le sens Prograde



Deux triangles figurent des flèches nous donnant le sens de rotation pour trouver V(ISS) avec sa valeur en m/s et pour trouver ISS avec sa distance en milliers de mètres

"^" donne la direction de l'axe du vaisseau

FIG 14

Vous avez tout compris.

Lors que nous arriverons à proximité de ISS il va falloir réduire l'écart de vitesse le plus près possible de 0 pour avoir pratiquement la même orbite (puisque nous aurons la même vitesse à la même altitude) et nous stabiliser à faible distance (1 à 2 Km max) pour pouvoir entreprendre les manœuvres nécessaires à l'arrimage.

Pour ralentir, nous devons tourner le vaisseau pour que son indicateur de direction coïncide avec la direction du vecteur **V(ISS)** dans le sens prograde ou rétrograde suivant le signe (dans notre cas sens prograde).

2.4.2 – A 40 Km il faut ralentir !

Continuons notre approche jusqu'à 40 Km

Sauvegarder la situation pour pouvoir reprendre en cas d'échec.

Notre différence de vitesse est de 355 m/s et il va falloir freiner dans le sens Retrograde comme nous le montre le signe – à coté de V(ISS)



Nous arrivons sur ISS à plus de 1278 Km/h et à cette vitesse les 40 Km seront parcourus en 113 s environ. Il faut faire vite sinon notre assureur sera mécontent !!

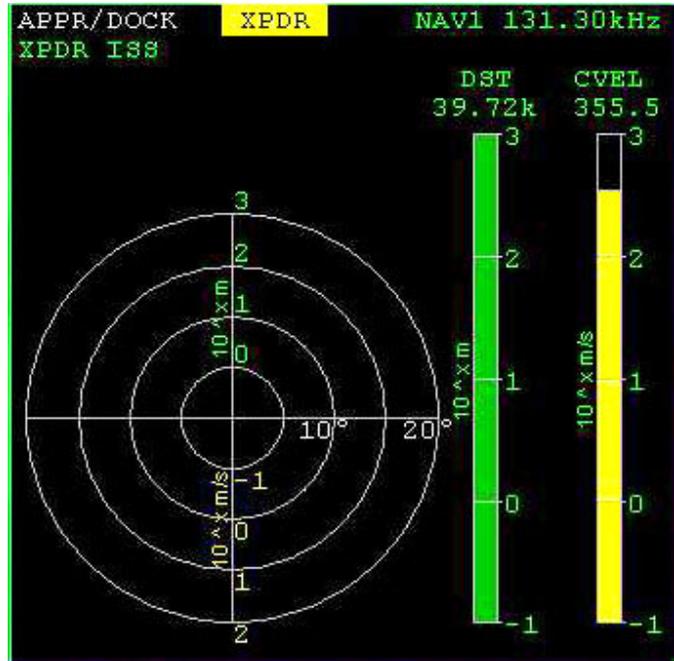


FIG 15

Nous aurions pu le faire avant mais pour la beauté de la chose nous le faisons maintenant (cher débutant, je vous autorise à le faire avant...)

Avec la touche 1 ou 3 du clavier numérique tournons rapidement notre vaisseau pour que son vecteur de direction soit centré avec le vecteur **V(ISS) Retrograde** (la croix dans un rond)

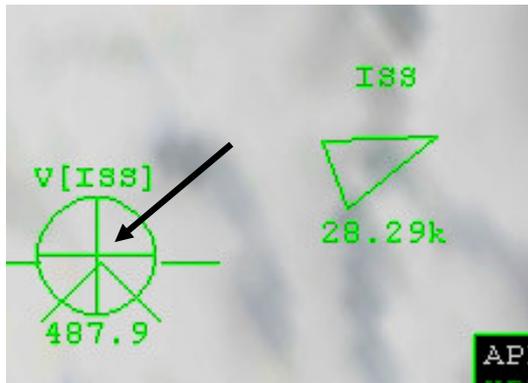


FIG 16

Nous sommes à un peu plus de 28 Km après pivotement (ce sont des nuages en dessous c'est superbe !)

Aux alentours de 20 Km il est temps d'allumer le moteur principal au maximum (touche + du clavier numérique) en maintenant l'indicateur de direction centré avec V(ISS) si nécessaire (par les moteurs de rotation)

Surveiller la décroissance de CVEL sur l'échelle de droite et la décroissance de la distance DST

Le but est d'arriver à moins de 1 Km de la station avec CVEL voisin de 0 en dosant la poussée.

Si votre module Synchro est toujours affiché, ce qui doit être le cas vous pouvez voir votre orbite (en vert) se circulariser au fur et à mesure de l'allumage

Je ne peux pas vous donner de formule miracle, c'est à vous de tester.

Comme je suis bon, je vais vous aider un peu.

Quand CVEL = 100 arrêter le moteur et attendre d'approcher à 5 Km (vous êtes à 360 Km/h)

Remettre le moteur en marche à puissance plus réduite pour faire décroître doucement CVEL et avoir à peu près CVEL = 0 à moins de 1 Km de distance (le mieux est d'aller le plus près possible)

Quand vous approchez de 0 n'essayez plus de centrer car l'indicateur s'affole, fiez vous à CVEL

Attention à ce que CVEL ne devienne pas négatif sinon vous vous éloignez de ISS

Si c'est le cas, remettez un peu de moteur en sens inverse sans retourner en utilisant la touche – (merci le Delta Glider)

Ne vous inquiétez pas si CVEL bouge un tout petit peu car vous n'êtes pas rigoureusement sur la même orbite. Plus vous être près quand CVEL = 0 plus vous restez stable.

2.4.3 – Maintenant, il faut arrimer

C'est la phase la plus délicate alors détendez vous, buvez un coke et mangez une biscotte pour avoir la forme.

Nous sommes tout près à presque CVEL = 0

Pour préparer notre arrimage nous allons **commuter la fréquence sur IDS ISS pour le HUD et le module APPR/DOCK** (nous pouvons le faire à 20 Km mais vous étiez peut être un peu tendu)

Ctrl + R commute sur NAV2 pour le HUD

Shift droit + N commute sur NAV2 pour APPR/DOCK

A 20 Km le module d'approche devient opérationnel



FIG 15

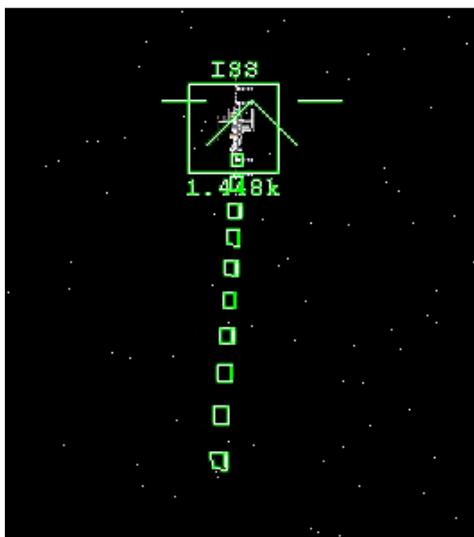
Vérifier que NAV2 est affiché en haut à gauche du HUD

Vérifier que NAV2 est affiché en haut à droite du MFD qui va nous donner des informations précieuses dans peu de temps



FIG 22

ISS est à 1700 m et l'on aperçoit sur sa droite (sous la longue flèche blanche que j'ai ajoutée pour le marquage) une série de points verts qui sont en fait des fenêtres fictives pour nous aider au docking. Nous sommes mal placés puisque nous ne sommes pas dans l'axe de ce port. En ouvrant le module de communication par **Shift + C** nous pouvons modifier la fréquence de **NAV2** pour changer de port de docking. Nous avons vu plus haut que ISS en comporte 5. Si nous prenons 137,40 pour NAV2 voilà ce que nous voyons



Nous sommes presque dans l'axe et un peu au dessus du bon chemin.

Quand vous serez entraîné vous pourrez faire un arrimage à vue en utilisant par exemple le joystick (ne pas oublier d'ouvrir le cône du Delta en faisant K)

Nous allons utiliser pour apprendre le module APPR/DOCK c'est plus sûr

FIG 16

[Sauvegarder la situation pour pouvoir reprendre en cas d'échec.](#)

Voilà ce que l'on va avoir à notre disposition

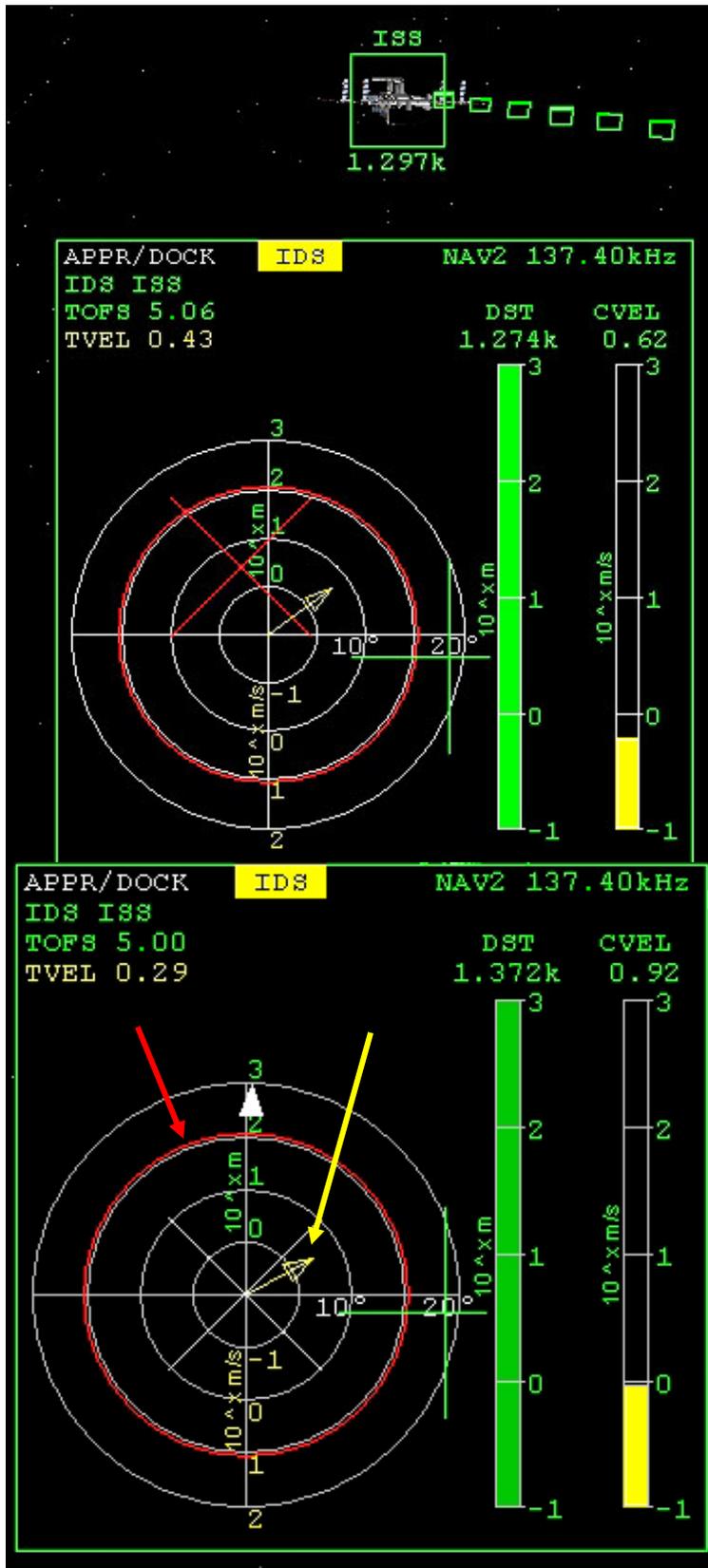


FIG 17

Les petites fenêtres ont une partie verte en haut qui indiquent que nous devons avoir notre axe vertical (notre dos tourné dans cette direction)

Une croix rouge indique que nous ne sommes pas orienté parallèlement à l'axe du chemin IDS

La première chose à faire est de centrer cette croix au milieu de la mire en utilisant les moteurs de rotation (touches clavier 1-3 8-2)

Quand la croix est bien centrée, elle devient blanche et un petit index Rouge apparaît sur la périphérie de la mire. Il faut alors utiliser les touches de rotation 4-6 pour l'amener en haut ou il devient blanc

Le Delta est alors bien parallèle à l'axe IDS et positionné comme il faut sur son axe longitudinal.

La croix est centrée et l'index est en haut (à peu près)

Le cercle rouge délimite le cône d'approche de l'IDS et nous signale par sa couleur que nous ne sommes pas dedans.

Pour y être il faut utiliser les **moteurs de translation** (sélectionner par la touche / du pavé numérique) pour amener la croix verte au centre de la mire. Nous glissons donc vers l'axe de l'IDS en lui restant parallèle. La flèche jaune qui part du centre est le vecteur vitesse de translation par rapport à l'axe. En jouant sur les moteurs de translation il faut l'orienter vers le centre de la croix verte pour ramener celle-ci au centre et ensuite jouer pour la maintenir en translatant gauche droite avec les touches 1-3 et haut bas avec les touches 2-8

Attention, il faut procéder par petites impulsions.

Quand la croix verte arrive dans le rond rouge, celui-ci s'éclaire en vert pour signaler l'entrée dans le cône de l'IDS.

Le cône se resserre au fur à mesure que l'on approche et il faut procéder doucement en réduisant la poussée des moteurs en utilisant la touche Ctrl s'il le faut.

Un Joystick est pratique pour faciliter l'approche.

La vitesse CVEL doit rester inférieure à 0,1 m/s au moment de l'arrimage et n'oubliez pas d'ouvrir le nez du Delta avec la touche K.

Surveillez la vitesse et ne la laissez jamais tomber à une valeur négative sinon vous vous éloignez. Vous pouvez lui faire des petits ajustements avec les moteurs de translation (touches 6-9 du pavé numérique)

Une valeur de moins de 10 m/s est bien si l'on débute

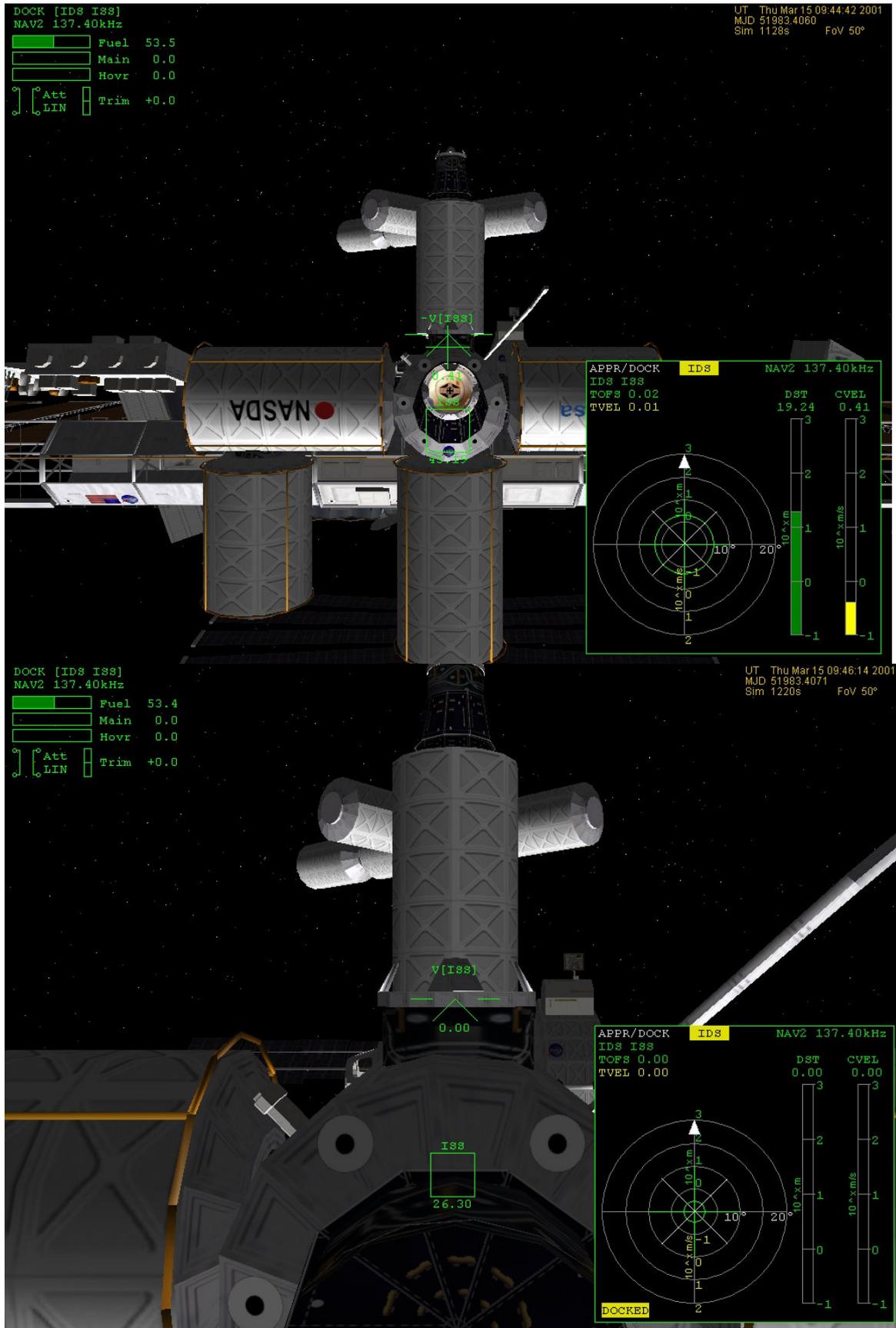
Je vous ai dit l'essentiel maintenant à vous de vous entraîner et j'espère vous avoir bien expliqué les techniques de base.

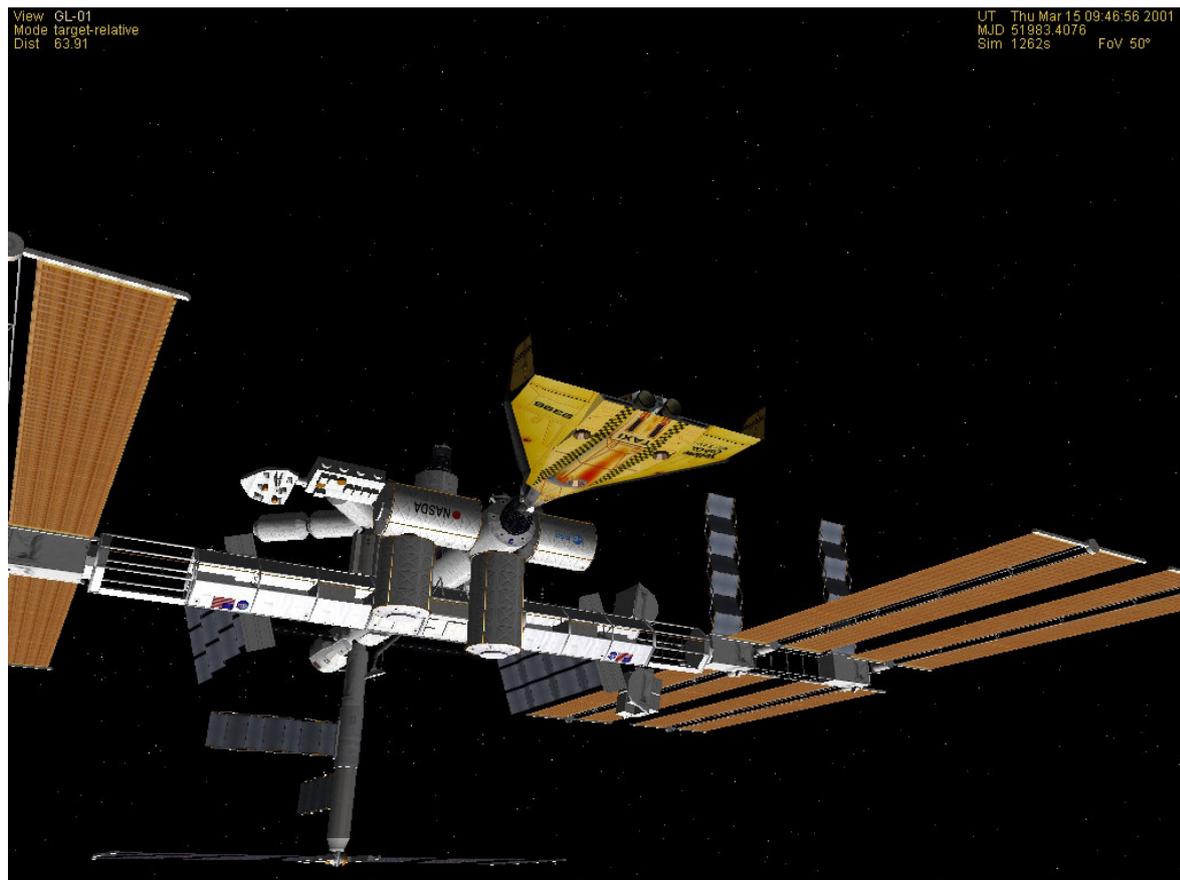
Vous pourrez appliquer les principes pour faire des transferts d'une station à une autre par exemple (voyez l'exercice dans le manuel Orbiter pour faire ISS – MIR)

Voilà quelques photos de mon approche oh combien sublime !!!!!!!!!!!!!



Réussir un rendez-vous





J'espère que le voyage vous a plu et je vous remercie pour vos applaudissements.

Papyref