

Rapport IgoSat



Sommaire

I – Introduction.....	3
A- Présentation.....	3
B- Objectifs de la mission.....	3
II – Procédure.....	4
A- Simulation d'une orbite sur Scilab.....	4
B- Modélisation de la mission.....	5
a) Hypothèses.....	5
b) Orbite de l'IgoSat.....	5
c) Attitude de l'Igosat	5
C- Orbite des satellites de positionnement.....	6
D- Conditions.....	7
a) Visibilité.....	7
b) Occultation quelconque.....	8
c) Occultation utile.....	8
E- Variables.....	9
a) Angle d'ouverture.....	9
b) Altitude de visée.....	9
c) Constellations.....	10
d) Antenne.....	11
F- utilisation programme & données.....	11
III – Résultats.....	12
A- Visibilité.....	12
B- Occultation quelconque.....	14
C- Occultation utile.....	17
IV – Conclusion.....	18
V - Bibliographie.....	19

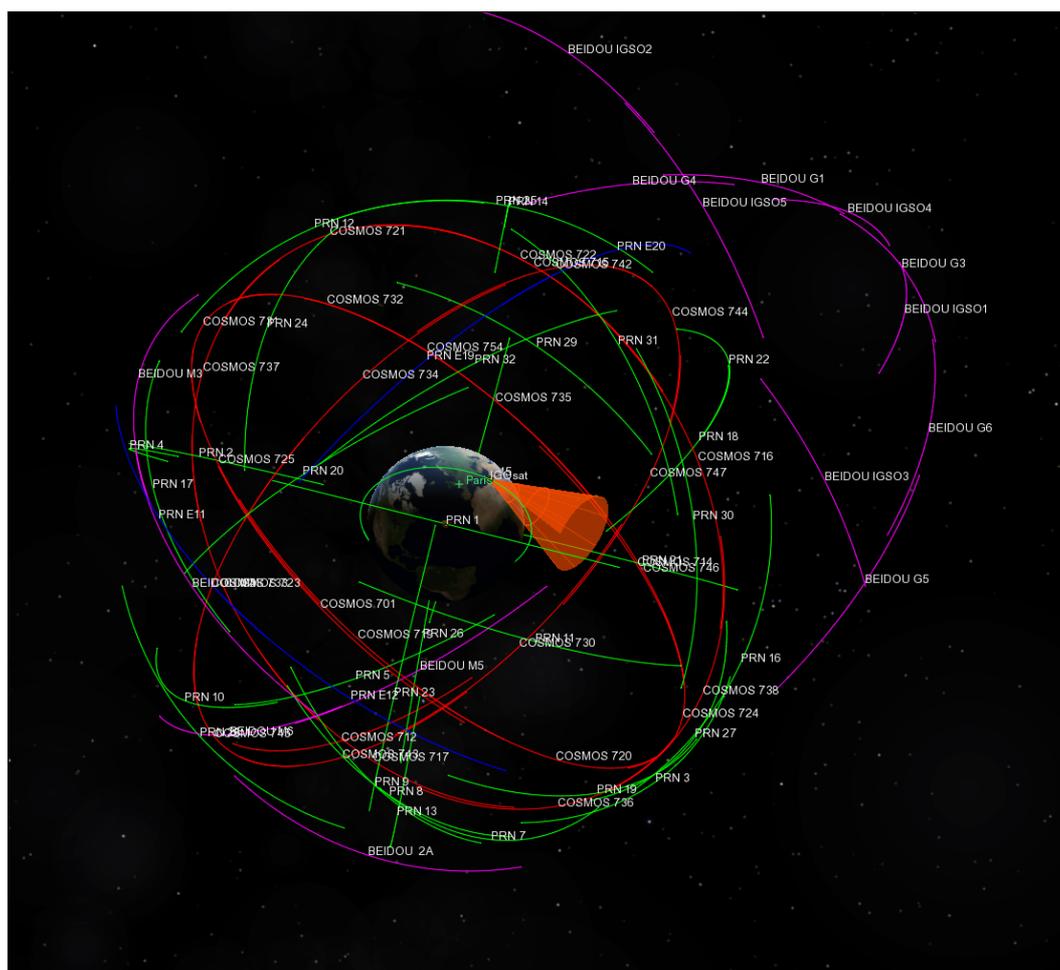
I – Introduction

A- Présentation

L'université Paris 7 Diderot participe, avec l'aide du CNES, à un projet baptisé IgoSat. Ce programme consiste à l'envoi d'un Nano-Satellite (satellite de petite taille en orbite basse) élaboré par des élèves dans l'espace. Le satellite IgoSat envoyé aura pour mission de scanner les couches de la ionosphère grâce à l'occultation des signaux provenant des satellites de positionnement (GNSS) pour apporter de nouvelles informations sur celle-ci et sur ce qui la compose.

B- Objectifs de la mission

Nous avons travaillé sur le positionnement et l'occultation de l'IgoSat avec les GNSS. Notre mission a été d'obtenir des résultats pour les comparer avec les précédents (notamment ceux du rapport de Tanguy HELLIOT de l'an passé) et d'obtenir une visualisation de l'orbite de l'IgoSat couplée aux orbites des GNSS.



Exemple de visualisation obtenu en fin de projet

II – Procédure

Nous avons eu accès au logiciel VTS, fourni par le CNES, pour obtenir la visualisation des orbites sur une période. Celui-ci utilise des fichiers CIC, contenant les informations sur les orbites, pour pouvoir générer le contenu visuel. Un moyen de générer les fichiers CIC est d'utiliser le logiciel Scilab (et son extension celestlab).

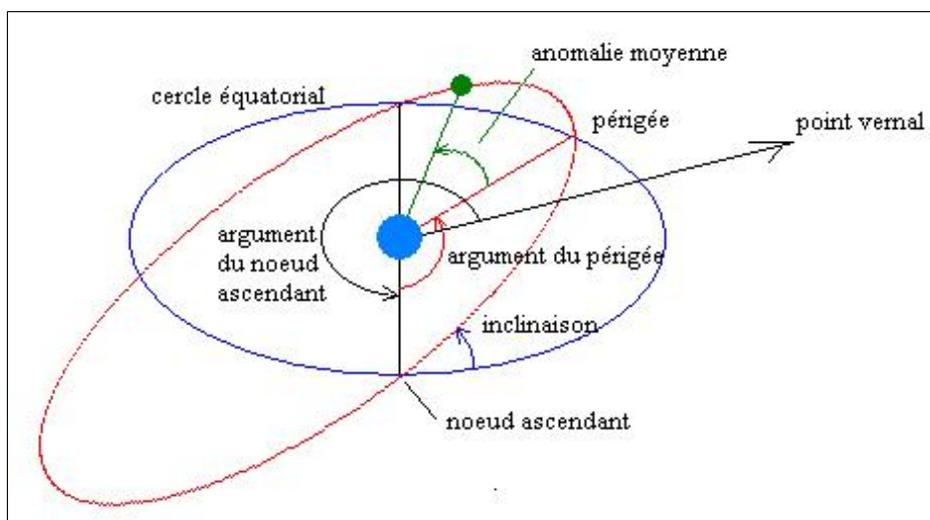
A- Simulation d'une orbite sur Scilab

Le logiciel Scilab peut générer des fichiers CIC (qui sont en fait des fichiers textes contenant les informations sur l'orbite du satellite dans le temps, disposées d'une certaine façon). Il lui faut pour cela un certain nombre de données élémentaires pour pouvoir ensuite simuler sur la période de temps choisie.

Les données nécessaires à Scilab sont les suivantes :

- _ Le demi-grand axe qui représente la moitié de la distance qui sépare le périhélie de l'apogée.
- _ L'excentricité qui mesure le décalage des foyers par rapport au centre de l'ellipse, si ce décalage est nul l'orbite sera circulaire, s'il est compris entre 0 et 1 l'orbite sera elliptique (ce qui va être le cas pour tous les satellites de positionnement), s'il est égale à 1 l'orbite sera parabolique et s'il est supérieure à 1 l'orbite décrira une hyperbole.
- _ L'inclinaison, (entre 0 et 180 degrés) qui est l'angle entre le plan orbital avec le plan de référence (dans notre cas le plan contenant l'orbite terrestre).
- _ L'ascension droite du nœud ascendant qui détermine l'orientation de l'axe des nœuds par rapport à une direction de référence prise grâce au soleil. La ligne des nœuds est le segment reliant les points d'intersections entre l'orbite du satellite étudié et le plan écliptique.
- _ L'argument du périhélie, il s'agit de l'angle, dans le plan de l'orbite, entre la ligne des nœuds et le grand axe de l'ellipse.
- _ L'anomalie moyenne qui est le quotient du temps écoulé depuis le dernier passage du satellite au périhélie sur la période de celui-ci.

Pour mieux les comprendre voir le schéma ci-dessous.



B- Modélisation de la mission

Nous avons ainsi entré les données correspondant à l'IgoSat et aux GNSS.

a) Hypothèses

La simulation débute le 15 juin 2018 à 0h et dure 24h. Un pas de temps de 10 secondes a été fixé, ainsi pendant 24h, toutes les 10 secondes, les données relatives au satellite sont mises à jour. Le choix de la date se base sur la date approximative d'envoi du satellite. La durée a été calquée sur celle choisie par Tanguy HELLIOT pour pouvoir vérifier ses résultats et enfin le pas est justifié par la durée des visibilité des GNSS lors des visualisations sur VTS, qui durent en générale plus de 2 minutes (voir les tableaux dans la partie III).

A noter qu'une durée plus importante ou un pas plus petit aurait pu être choisie, mais cela augmente considérablement le temps de calcul par Scilab (qui est déjà assez long dans certains cas).

b) Orbite de l'IgoSat

L'altitude de l'IgoSat a été fixée à 600 km cette année pendant notre cursus, ainsi on ne fait plus varier cette valeur.

En plus de celle-ci, nous avons fixé les valeurs suivantes pour simuler l'orbite :

- Excentricité = 0
- Inclinaison = 97°
- RAAN (ascension droite du nœud ascendant) = 0 rad
- Petit omega (argument du périégée) = $\pi/2$ rad
- Anomalie moyenne = $-\pi/2$ rad

c) Attitude de l'Igosat

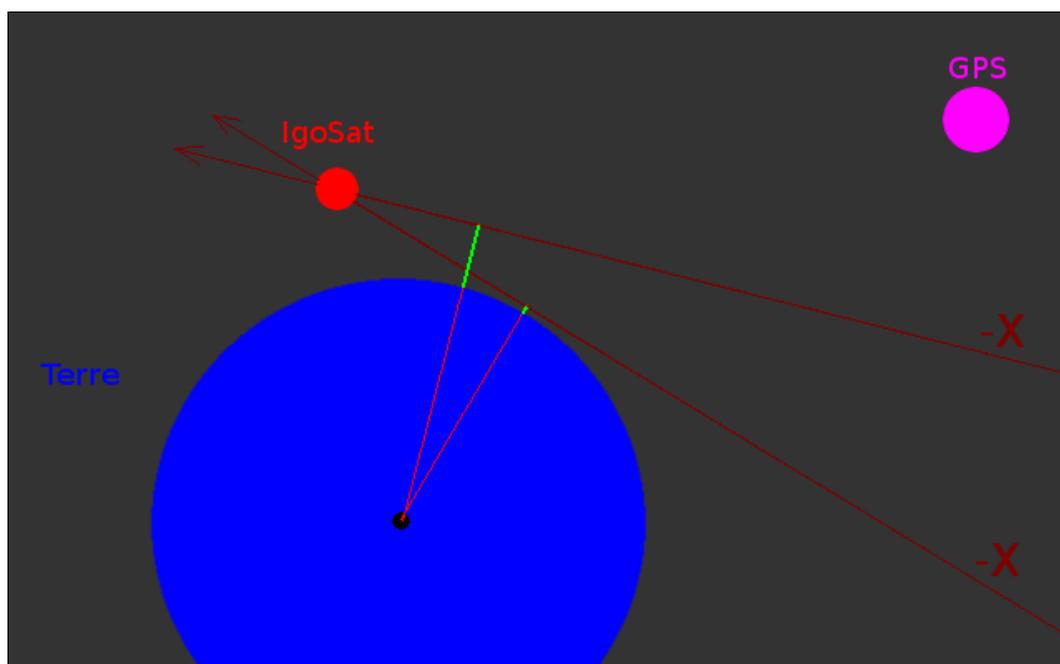


Illustration de 2 altitudes de visées différentes (altitude de visée proportionnelle à la taille du trait vert)

Pour effectuer des occultations pour sonder la ionosphère, l'IgoSat doit avoir une certaine attitude. Nous avons mis l'IgoSat dans ce que nous appelons le « mode avion » : Un spin de 0,10 deg/sec et une inclinaison approximative de 30° ont été imposés au satellite. Pour incliner le satellite nous avons créé une variable qui s'appelle « altitude de visée » qui est liée à l'inclinaison de la sorte : (avec R_{terre} = Rayon de la Terre et $demigdaxe$ = demi-grand axe)

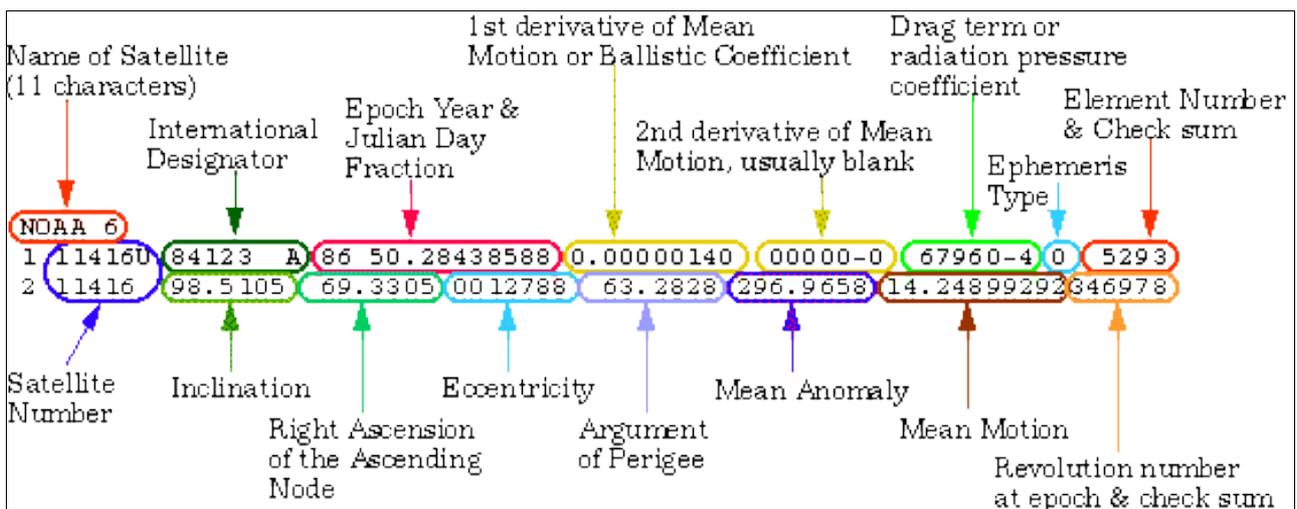
$$\text{Inclinaison} = \arccos((\text{AltitudeDeVisée} + R_{terre}) / (\text{demigdaxe} + R_{terre}))$$

C'est l'altitude à laquelle passe la droite directrice de l'IgoSat, au point où cette droite est le plus proche de la terre. En d'autres termes, la droite directrice de l'IgoSat est tangente au cercle centré sur la Terre et de rayon ($R + \text{altitude de visée}$) avec R le rayon de la Terre.

Nous reviendrons dessus dans la partie : **E – Variables**

C- Orbite des satellites de positionnement

Les données des GNSS sont disponibles sur :
 celestrak.com → NORAD Two-Line Element Sets → Current Data → Navigation Satellites.
 Ces données sont présentées sous la forme Two Line Element (TLE), qui ne sont pas directement utilisables par Scilab.



Exemple de données au format TLE avec la signification de chaque partie

On remarque que le TLE nous procure directement l'inclinaison, l'ascension droite du nœud ascendant, l'excentricité, l'argument du périhélie et l'anomalie moyenne ; il ne nous manque donc plus que le demi-grand axe. Si on divise le nombre de secondes qu'il y a dans un jour par le « Mean Motion », qui est le nombre d'orbite que réalise le GPS par jour, on obtient la période de notre GPS. On obtient ainsi le demi-grand axe avec la troisième loi de Kepler.

$$a^3 = \frac{G.M_T.T^2}{4\pi^2} \text{ et } T = \frac{24 \times 3600}{\text{Mean Motion}}$$

On peut ainsi extraire les données nécessaires à la simulation des orbites de tous les GNSS, en

veillant malgré tout à 2 subtilités :

-Les dates données dans le TLE doivent être prises en compte dans la création de la base de données des satellites. En effet, les paramètres orbitaux de chaque satellite n'ont pas été mesurés au même instant et nécessitent un décalage temporel entre eux.

-Devant chaque excentricité il faut ajouter « 0, », par exemple 0012788 devient 0.0012788.

Les données ainsi extraites servent à simuler les orbites de tous les GNSS, ce qui permet d'avoir la position de chaque GNSS dans le référentiel terrestre à tout instant. Cette position est recalculée par Scilab dans le référentiel de notre Igosat, et est utilisée dans l'établissement des conditions d'occultation et de visibilité.

D- Conditions

Nous avons fixé des conditions sur la visibilité, la possibilité d'effectuer une occultation, et la possibilité d'effectuer une occultation dite utile avec un GNSS.

Si elles sont vérifiées, le GNSS est visible, permet une occultation ou permet une occultation utile.

a) Visibilité

Le GNSS est visible si il remplit 2 conditions:

- être dans le cône de réception de l'antenne de l'Igosat.

Pour cela, l'angle entre le vecteur $-X$ de l'Igosat (la ou il pointe) et le vecteur reliant ce dernier au GNSS, noté Ω , doit être inférieur au demi-angle d'ouverture choisit en amont.

- ne pas être caché par la Terre.

Pour cela l'angle entre le vecteur reliant l'Igosat et le centre de la Terre et le vecteur reliant l'Igosat au GNSS, noté α , doit être supérieure à l'angle entre le vecteur reliant l'Igosat à la Terre et le vecteur directeur de la droite passante par l'Igosat et tangente à la surface de la Terre, noté β .

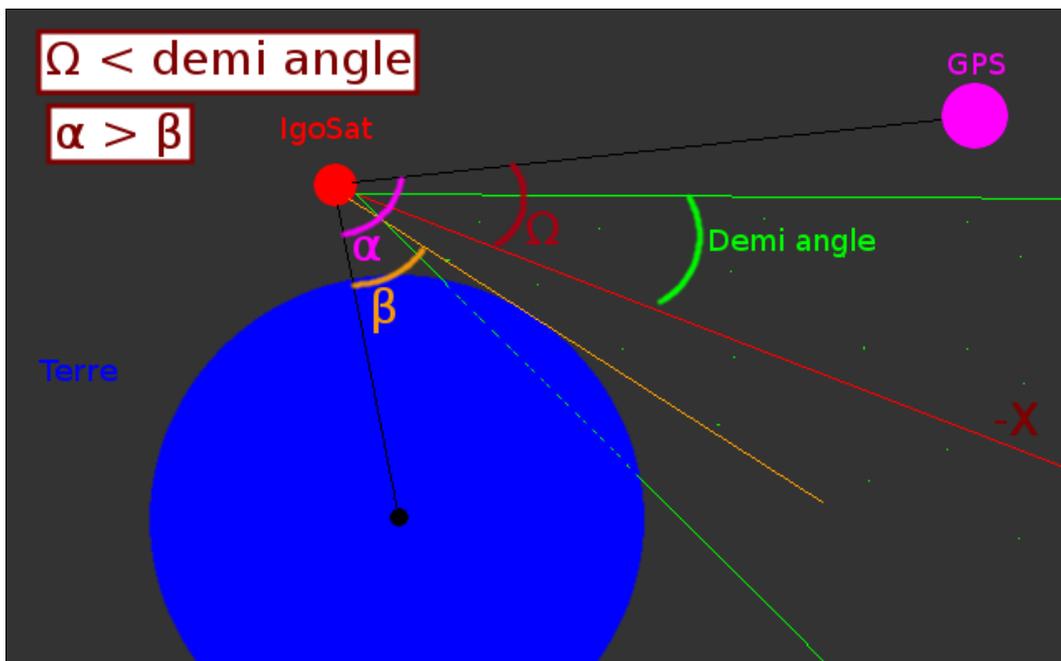


Schéma illustrant les 2 conditions de visibilité

b) Occultation quelconque

Le GNSS permet l'occultation si :

- il est visible. (2 conditions précédentes)
- son signal traverse la ionosphère pour atteindre l'IgoSat.

Pour cela, l'angle entre le vecteur reliant l'Igosat au GPS et le vecteur reliant l'Igosat à la Terre, noté α , doit être inférieur à l'angle entre le vecteur reliant l'Igosat à la Terre et le vecteur directeur de la droite passant par l'Igosat et tangente à la surface de la couche ionosphérique, noté φ .

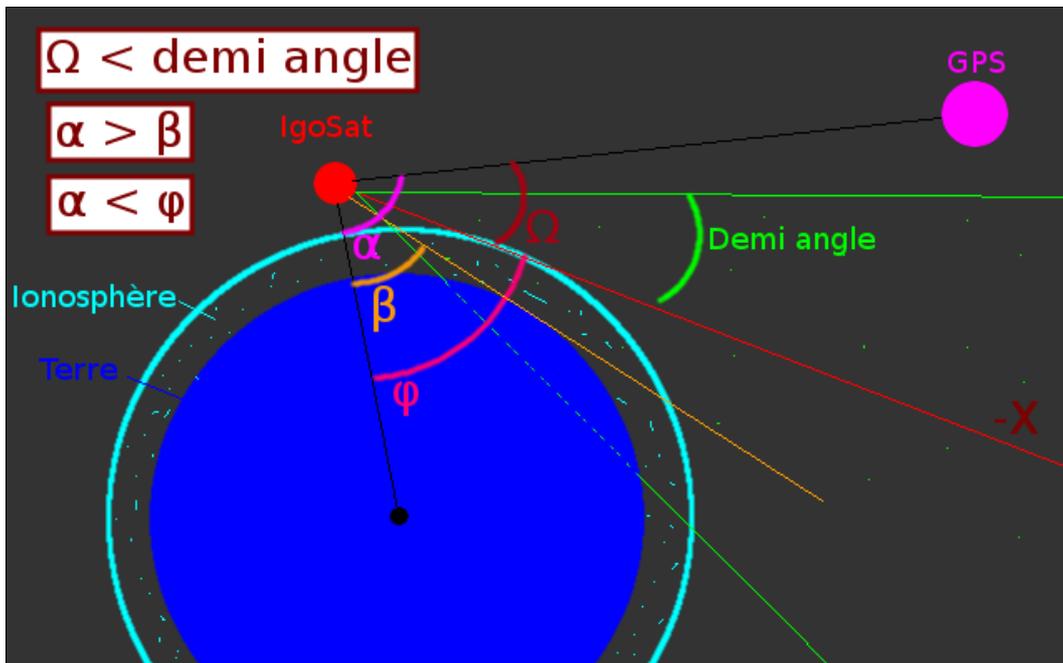


Schéma illustrant les 3 conditions de l'occultation

A noter que nous avons fixé la limite supérieure de la ionosphère à 600km d'altitude.

c) Occultation utile

Notre mission s'intéresse particulièrement aux occultations ayant lieu aux pôles et à l'anomalie atlantique. Nous nommons ces occultations les « occultations utiles ».

Le GNSS permet l'occultation utile si :

- il permet l'occultation quelconque. (3 conditions précédentes)
- l'IgoSat se situe au pôle nord, au pôle sud ou au-dessus de l'anomalie de l'atlantique sud (AAS).

L'IgoSat se situe au pôle Nord (Sud) si :

- Sa latitude est supérieure à 70° (inférieure à -70°).

L'IgoSat se situe au dessus de l'AAS si :

- sa latitude est comprise entre -50° et 0° .
- sa longitude est comprise entre -90° et 40° .

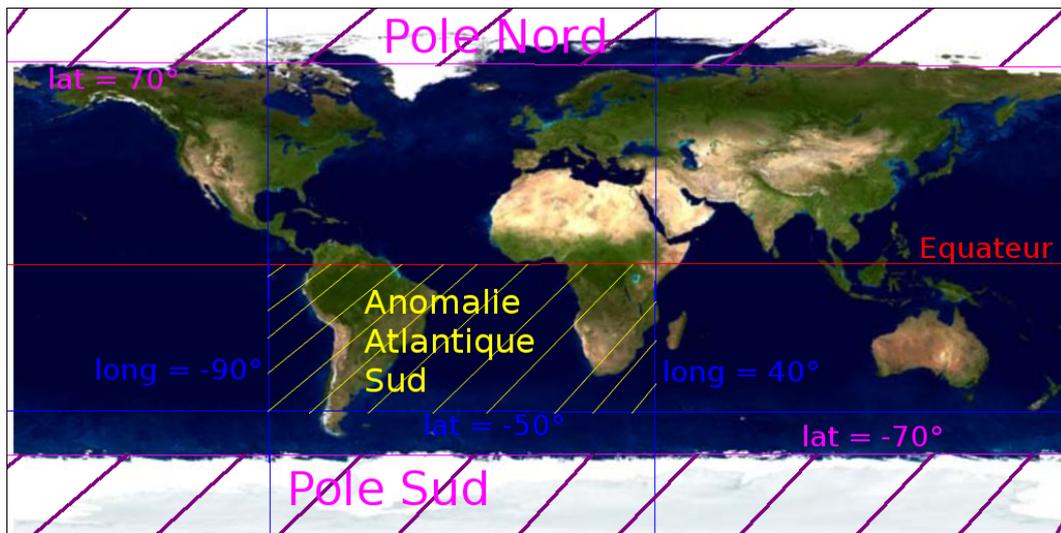


Illustration des zones de pôles et d'anomalies

E- Variables

a) Angle d'ouverture

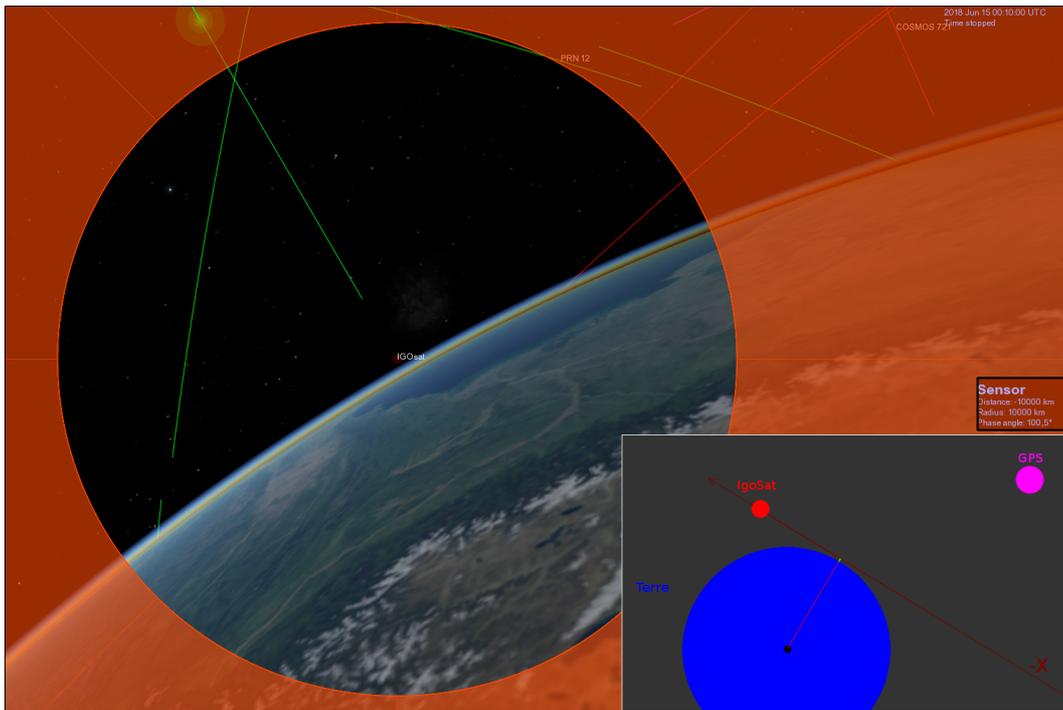
Il existe dans le commerce des antennes possédant différentes caractéristiques. L'une de ces caractéristiques est l'angle d'ouverture. Plus l'angle d'ouverture est grand, plus l'antenne a de visibilité, cependant cela peut influencer sur les qualités de mesures d'où notre choix de le faire varier. Le demi-angle d'ouverture cité précédemment est, comme son nom l'indique, la moitié de l'angle d'ouverture. Il faut noter que dans les calculs (Scilab) nous utilisons le demi-angle, mais les résultats présentés sont bien ceux de l'angle d'ouverture totale.

b) Altitude de visée

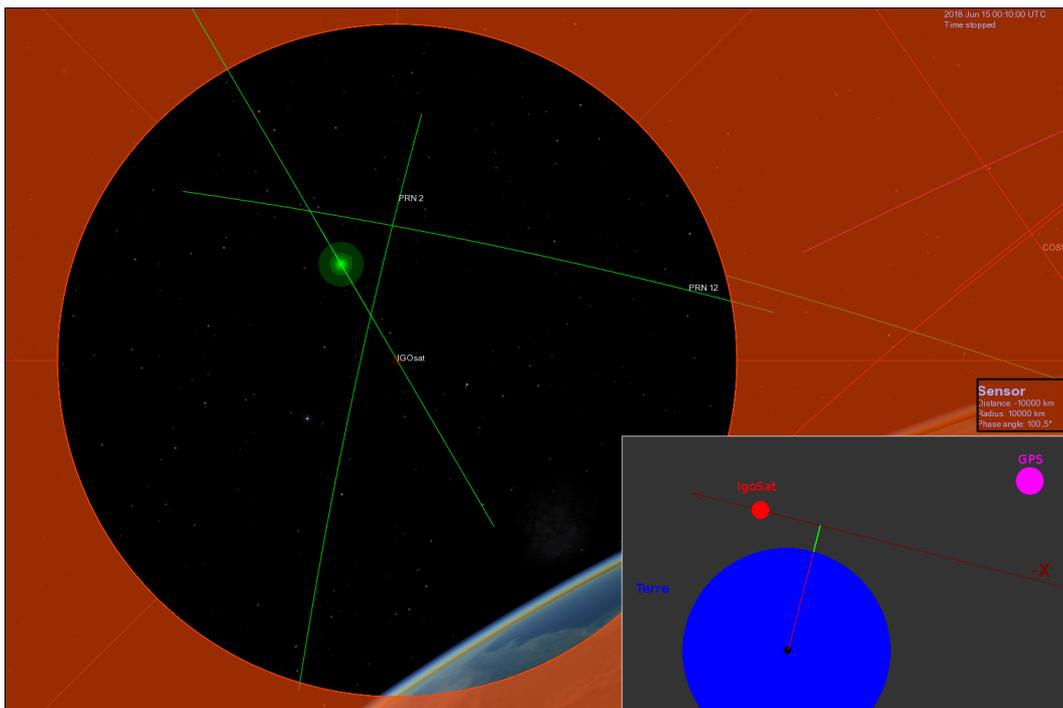
Le nombre d'occultations possible peut varier en fonction de l'inclinaison de l'IgoSat, plus il sera incliné plus son champ de vision sera réduit par la Terre. Cependant moins il sera incliné, moins les signaux provenant de la ionosphère seront de qualité, dû à l'orientation du lobe principale de l'antenne. Ainsi, au lieu de faire varier directement l'inclinaison, nous avons établi l'altitude de visée qui nous donne une meilleure idée de l'orientation du lobe principale par rapport à la couche ionosphérique.

Comme cette notion d'altitude semble un peu abstraite, on a pris les clichés depuis VTS, aux mêmes instants (10min après le début de la simulation, c'est à dire le 15 juin 2018 à 0h10), avec la même orbite (celle de l'IgoSat) en faisant juste varier l'altitude de visée. L'angle d'ouverture est ici de 40°.

A noter que pour des raisons mathématiques l'altitude de visée ne peut dépasser 600km dans notre script Scilab.



Cliché VTS de la visibilité de l'IgoSat avec Altitude De Visée = 50km.



Cliché VTS de la visibilité de l'IgoSat avec Altitude De Visée = 550km.

c) Constellations

Nous avons simulé les orbites de 31 satellites GPS américains, 29 satellites GLONASS russes, 15 satellites BEIDOU chinois et 4 satellites GALILEO européens. Ce sont les principaux satellites de positionnement utilisables actuellement dans l'espace. Ne faisant pas partit d'un

programme international, il n'existe pas de normes entre les constellations, et il risque d'y avoir par conséquent des problèmes de compatibilités entre eux.

Comme cette question n'a pas encore été étudiée, nous avons fait varier les constellations utilisées. En effet dans certains cas nous n'utilisons que la constellation des GPS, et dans d'autres nous lui ajoutons les 3 autres pour observer les différences des résultats.

d) Antenne

Dans certains cas de figure, une seule antenne à l'arrière risque de ne pas être suffisante pour effectuer les mises à jour de la position de notre IgoSat. Nous avons donc étudié le cas où nous ajoutons une antenne à l'avant, identique (même angle d'ouverture) à celle à l'arrière.

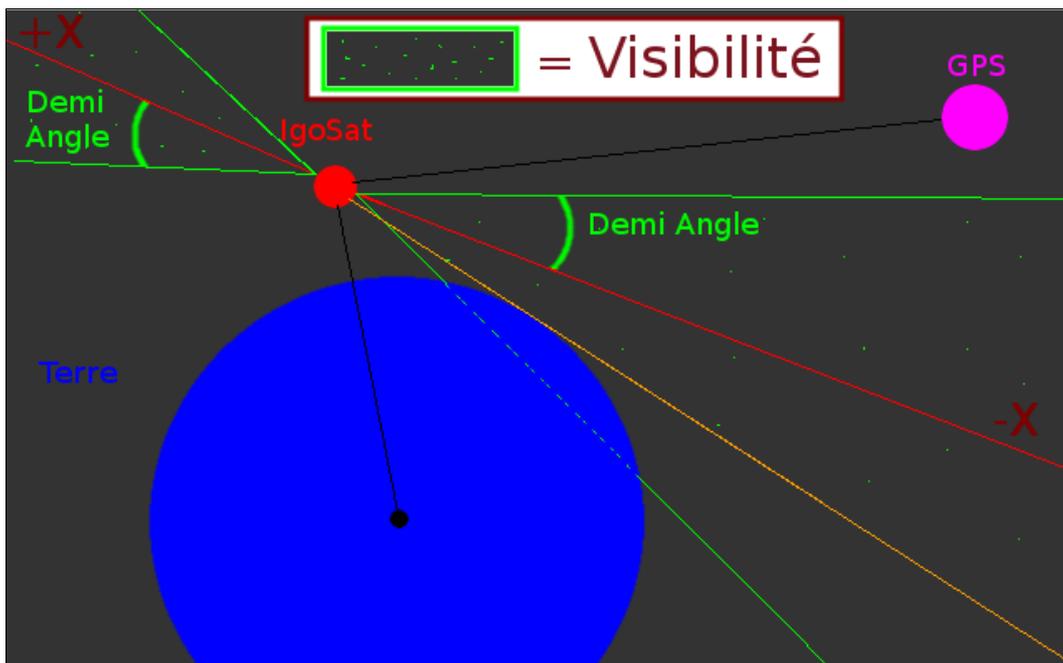


Illustration de la visibilité dans le cas où l'antenne à l'avant est ajoutée.

F- utilisation programme & données

Le script de calculs Scilab que nous avons développé fournit des informations sur les visibilités et les occultations des signaux des GNSS. Il produit également les fichiers CIC permettant de simuler les constellations GNSS sous VTS. Ces fichiers sont dans le sous-répertoire Data, et ont pour nom « GPS_POSITION_VELOCITY_ » suivi du nom du GNSS en question.

Comme nous ne faisons varier que les paramètres en lien avec l'IgoSat, ces fichiers restent vrais quoi qu'il arrive et peuvent être réutilisés dans d'autres cas de figure. Pour les utiliser dans VTS il suffit de créer un satellite et lui attribuer ce fichier : dans ses caractéristiques ouvrir « Position/Orientation » puis dans le cadre « Position » cliquer sur l'onglet « File » et y ajouter le fichier « GPS_POSITION_VELOCITY_ » correspondant au GNSS que l'on veut créer.

De la même manière on peut utiliser le fichier « IGOSAT_POSITION_VELOCITY » pour avoir l'orbite que nous avons fixé à notre Nano-satellite, et « IGOSAT_QUATERNION » pour avoir son orientation. Cependant il faut veiller à relancer le script Scilab pour fixer l'orientation, dans le cas d'études précises sur celle-ci.

III – Résultats

A- Visibilité

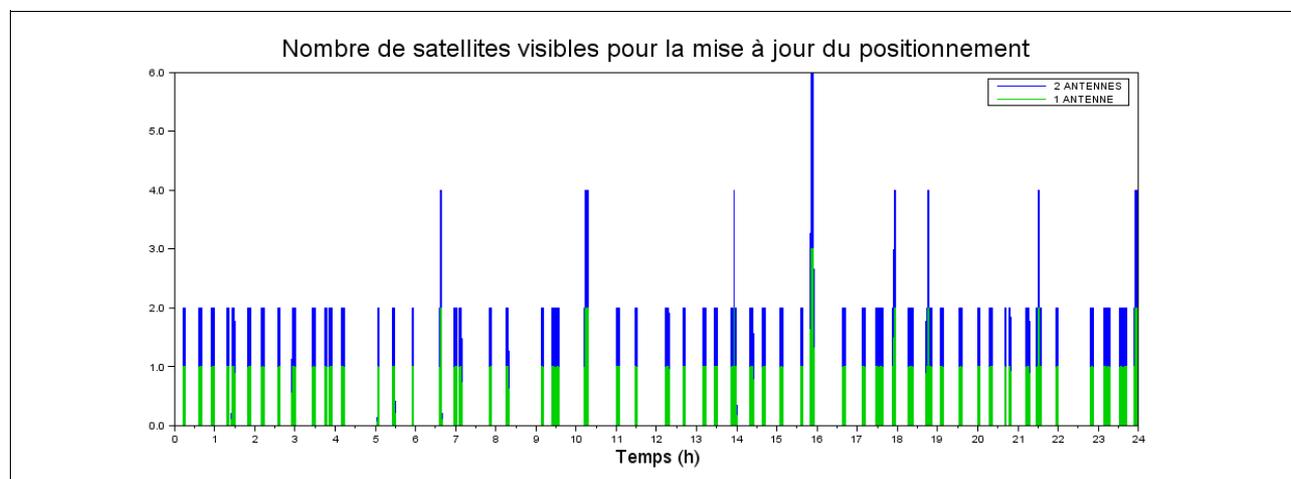
On sait que l'on a besoin de signaux de 4 différents satellites pour effectuer une mise à jour de la position. Dans cette partie, nous étudions la visibilité en fonction de l'angle d'ouverture (20°, 40° et 60°). Les études sont menées dans 2 cas :

- le cas où il n'y a qu'une antenne, celle déjà prévue dans le projet (courbes vertes)
- le cas où on ajoute la même antenne à l'avant de l'IgoSat (courbes bleues)

Pour les 3 prochains graphiques, seule la constellation GPS est utilisée et l'altitude de visée est fixée à 300km.

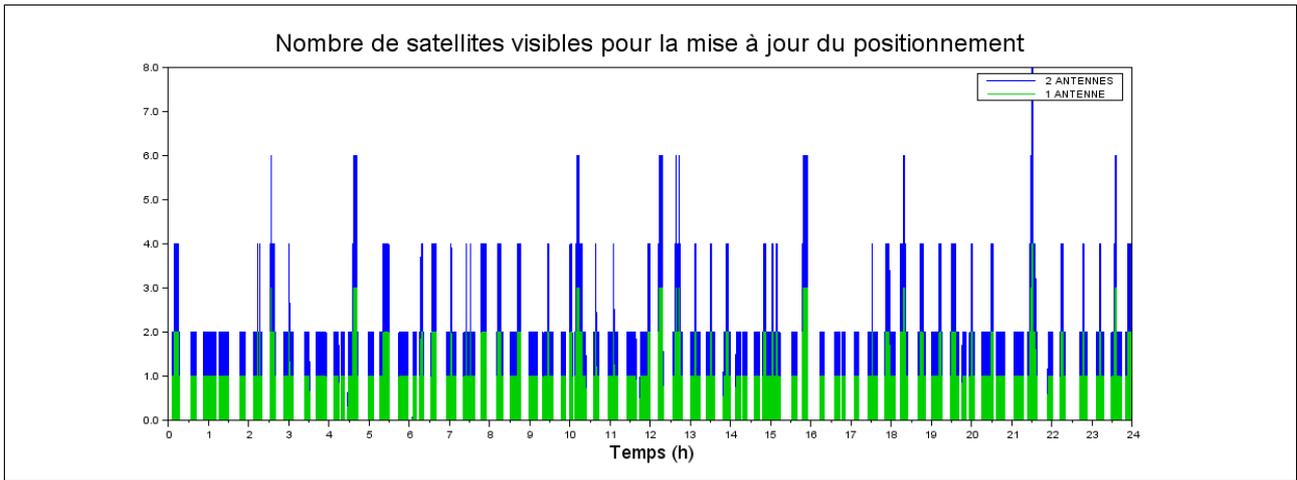
On a défini le positionnement comme étant possible avec la condition suivante : si à l'instant (T) il y a strictement moins de 4 GNSS visibles, et à l'instant (T+1) il y en a au moins 4, alors on considère que le positionnement de l'IgoSat peut avoir lieu. C'est de cette manière que nous avons compté le nombre de positionnement. Le temps de positionnement sur 24h correspond à l'addition des durées de chaque positionnement qui peuvent avoir lieu.

Il faut noter que le nombre de positionnements et le temps de positionnement sont très approximés à cause des positionnements de durées très courtes qui risquent de ne pas pouvoir se faire ou à cause du pas de temps de 10 secondes.



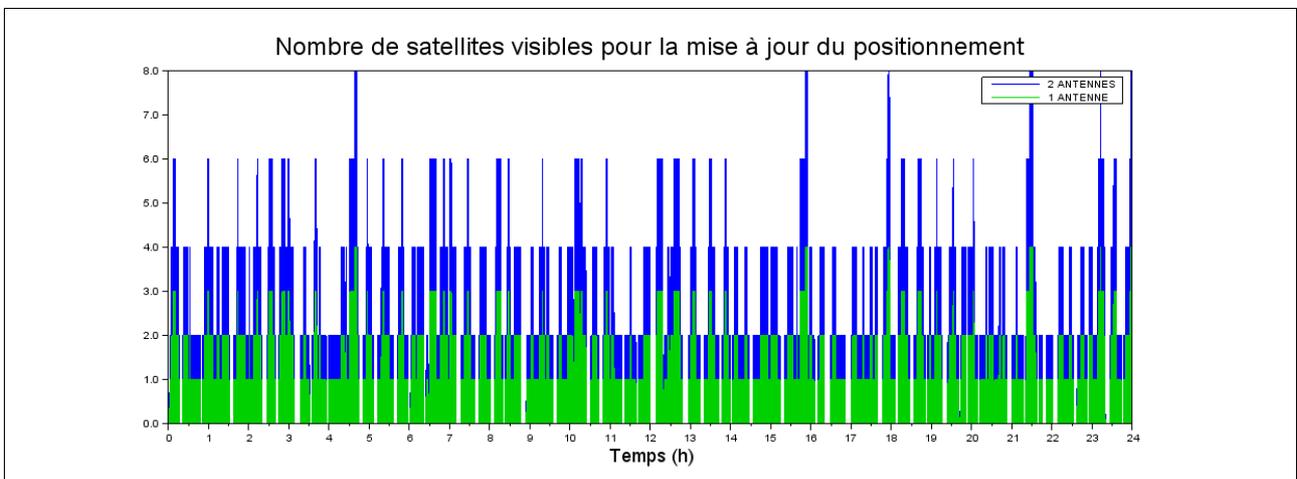
Nombre d'antenne	1	2
Nombre de positionnement	0	8
Temps de positionnement (min)	0	16

L'angle d'ouverture est de 20°. Avec une antenne, aucune mise à jour n'est possible, avec deux antennes 8 par jour le sont pendant 16 minutes.



Nombre d'antenne	1	2
Nombre de positionnement	1	47
Temps de positionnement (min)	1	160

L'angle d'ouverture est de 40°. Avec deux antennes, 2 heures et demi de positionnement par jour sont possibles au total.



Nombre d'antenne	1	2
Nombre de positionnement	6	101
Temps de positionnement (min)	13	559

L'angle d'ouverture est de 60°. Avec deux antennes, on peut mettre à jour la position durant 9 heures et 20min le long d'une journée. C'est 40 fois plus de temps qu'avec l'antenne unique.

Ces résultats nous montrent clairement que l'antenne à l'arrière prévu pour le projet ne suffit pas à elle seule pour effectuer le positionnement, quel que soit l'angle d'ouverture. Quant à la seconde antenne, elle ne commence à être utile qu'à partir d'une ouverture de 60°. Il faudrait étudier le cas d'antennes placées sur les côtés, ou bien le cas de l'utilisation d'autres constellations, pour voir quelles solutions offrent le meilleur rendement. Pour plus de précisions sur le positionnement, voir le rapport de Ari Jeannin.

B- Occultation quelconque

Nous avons choisie de tester les altitudes de visées de 300km et de 500 km. Dans un premier temps, l'IgoSat n'a accès qu'aux GPS, puis à toutes les constellations (GPS, GLONASS, BEIDOU et GALILEO), pour comparer le nombre d'occultations.

Le nombre d'occultations compte le nombre de fois où chaque GNSS vérifie les conditions d'occultation quelconques définies précédemment. Elles sont présentées dans les tableaux à la ligne qui donne les types d'occultation nommé « total ».

Comme la mission est de réaliser des mesures sur l'ionosphère et que ces mesures ne peuvent se faire qu'à partir d'une certaine durée, nous nous sommes intéressés aux occultations ayant une durée non négligeable. Nous avons donc extrait les occultations qui durent au moins 5 minutes et celles qui durent au moins 2 minutes (qui comprennent donc aussi celles de 5min).

Les 2 tableaux ci-dessous présentent ces résultats :

visé	Constellation	Angle d'ouverture	Type d'occultation	Nombre d'occultation
300 km	GPS	20°	+5min	8
			+2min	65
			total	69
		40°	+5min	116
			+2min	141
			total	144
	60°	+5min	204	
		+2min	220	
		total	223	
	TOUTES	20°	+5min	22
			+2min	150
			total	160
40°		+5min	283	
		+2min	353	
		total	359	
60°	+5min	530		
	+2min	579		
	total	584		

visé	Constellation	Angle d'ouverture	Type d'occultation	Nombre d'occultation
500 km	GPS	20°	+5min	18
			+2min	63
			total	69
		40°	+5min	122
			+2min	135
			total	142
	60°	+5min	205	
		+2min	213	
		total	218	
	TOUTES	20°	+5min	47
			+2min	151
			total	165
40°		+5min	299	
		+2min	342	
		total	355	
60°	+5min	532		
	+2min	557		
	total	567		

On remarque qu'il y a très peu de différences entre le cas où nous visons la ionosphère à 300 km et celui où nous visons à 500km, sauf pour une ouverture de 20°, où une visée à 500 km, au lieu de 300, permet de doubler le nombre d'occultations sur une journée. Malgré tous, ces deux altitudes de visées peuvent s'avérer différentes de par leur qualité de mesure. En effet, la qualité de réception est accrue lorsque nous visons directement la ionosphère. Ainsi la visée des 300 km risque d'être plus précise que celle à 500 km.

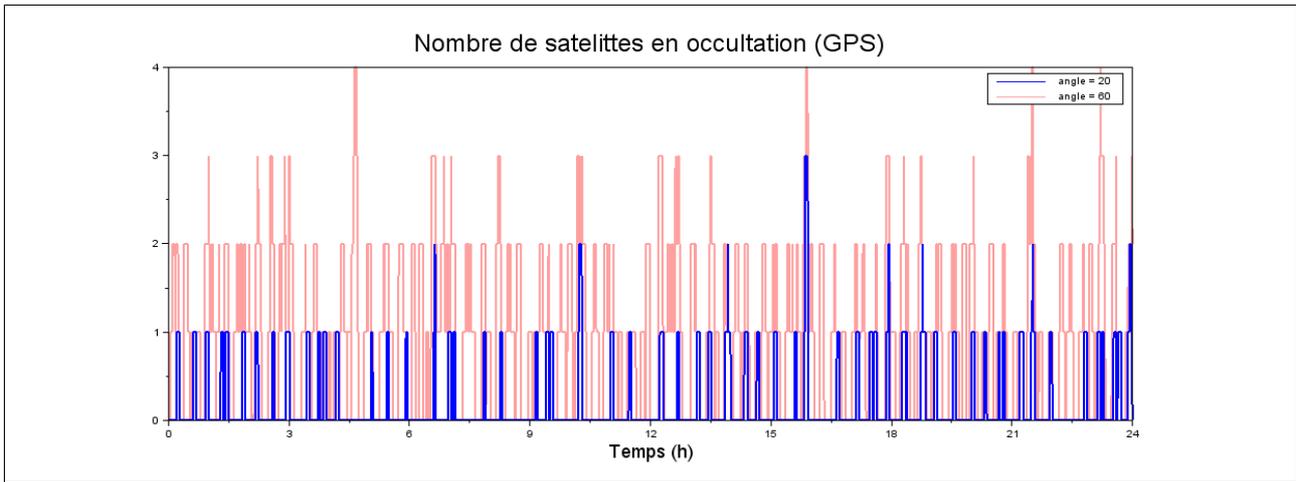
On constate que l'angle de 20° n'est clairement pas le plus adapté à notre mission.

Pour les deux autres angles, ainsi que pour le choix des constellations, il faut prendre en compte la faisabilité technique, autrement dit :

- L'étude des caractéristiques des antennes dans le commerce
- La compatibilité entre les signaux des différentes constellations
- La possibilité d'acquisition des signaux, aussi bien au niveau énergétique que mémoriel du matériel informatique embarqué.

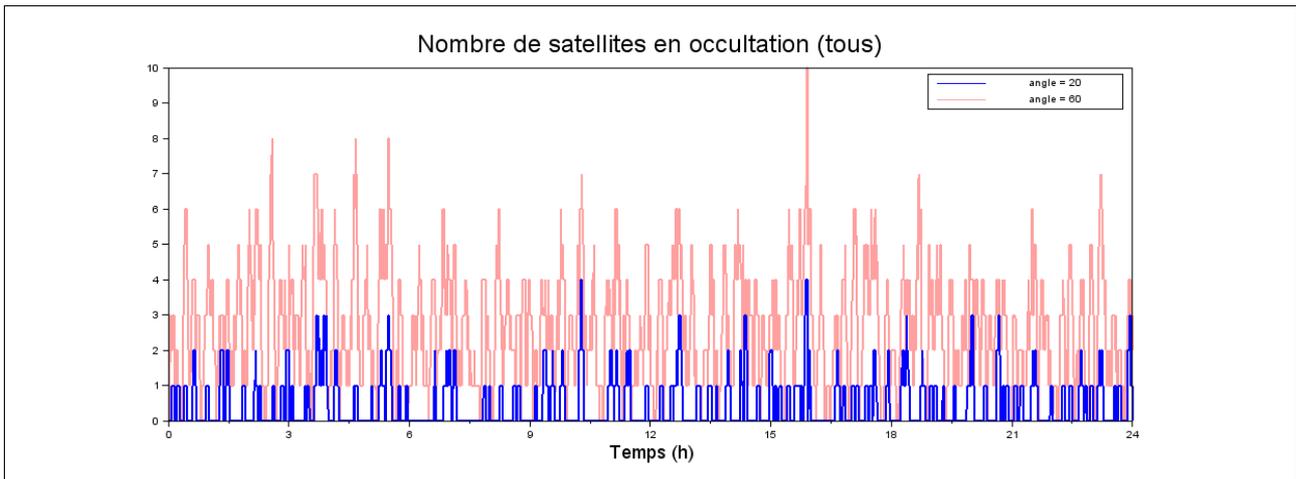
Enfin, ces tableaux nous permettent de valider les données du précédent rapport sur l'occultation (voir rapport de Tanguy Héliot), en prenant en compte que nous avons fixé notre orbite à 600km et que l'antenne qui était à l'avant du satellite a été supprimée, nous constatons que nous avons à peu près 2 fois moins d'occultations que dans le rapport (du à la suppression d'une antenne).

Dans l'optique de comparer nos résultats à ceux du rapport précédent nous avons également tracé des courbes similaires. En effet, les deux prochains graphiques présentent le nombre de satellites propice à l'occultation en fonction du temps. Nous avons fixé l'altitude de visé à 300km arbitrairement pour ces mesures, et avons pris des angles d'ouverture de 20 et 60 degrés (pour ne pas surcharger les graphiques avec l'angle de 40°) .



Angle d'ouverture	Type d'occultation	Nombre d'occultation
20°	+5min	8
	+2min	65
	total	69
60°	+5min	204
	+2min	220
	total	223

Ce premier graphique présente le nombre de satellites en occultations uniquement avec l'utilisation de la constellation GPS. C'est à dire avec 31 satellites.



Angle d'ouverture	Type d'occultation	Nombre d'occultation
20°	+5min	22
	+2min	150
	total	160
60°	+5min	530
	+2min	579
	total	584

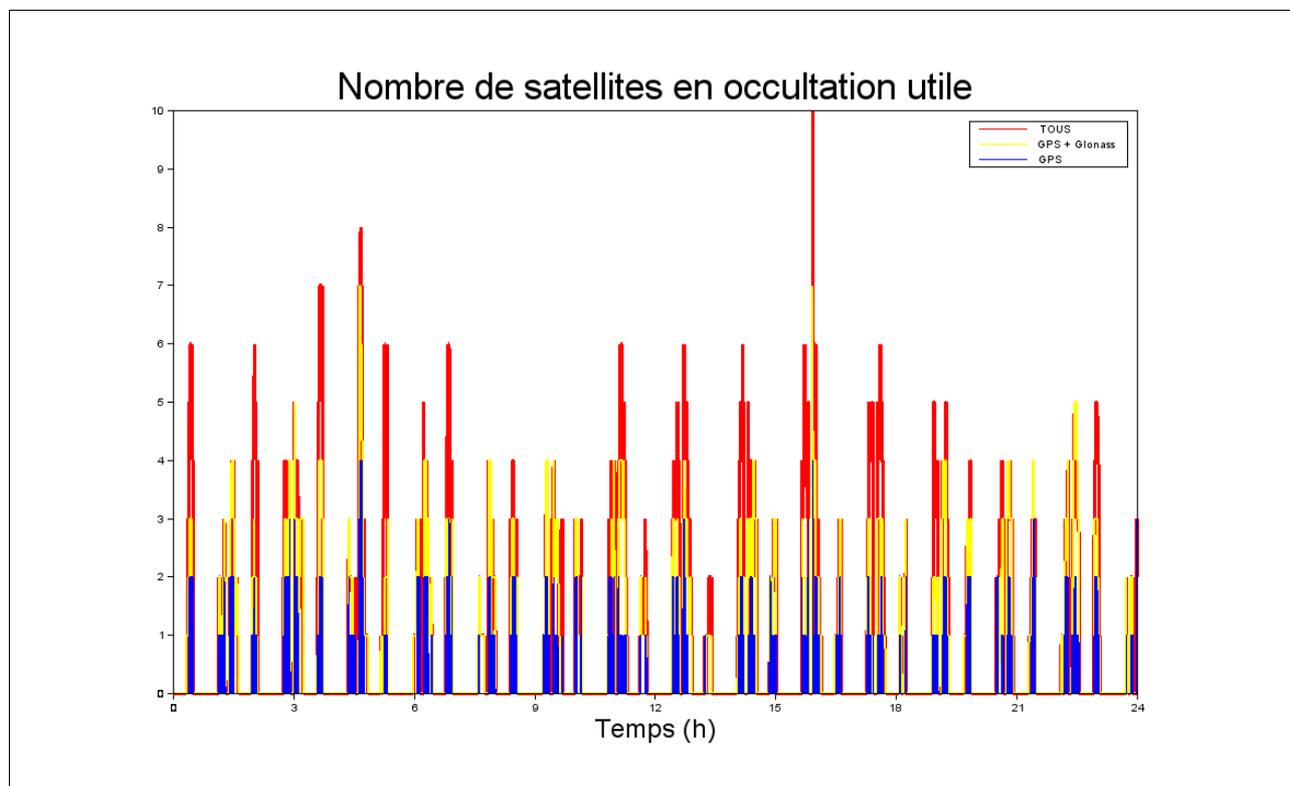
Celui la présente les résultats avec l'utilisation de toutes les constellations de satellites de positionnement utilisables. C'est à dire avec (31+29+15+4) 79 satellites.

Ces deux graphiques nous permettent de nous rendre compte de la fréquence et du nombre de GPS permettant une occultation au cours d'une journée. Ils permettent également de valider les graphiques du précédent rapport à ce sujet (toujours à un facteur 2 près dû à l'antenne).

C- Occultation utile

Dans le cas ou on aurait une limitation énergétique qui nous empêcherait d'occulter tout le temps, on a trié parmi toutes les occultations celles qui nous intéressent le plus : les occultations utiles. (aux pôles et au dessus de l'AAS).

En fixant l'altitude de visée à 300km et l'angle d'ouverture à 60°, on a compté le nombre d'occultation utile en fonction des constellations utilisées dans le temps.



Constellation	Type d'occultation	Nombre d'occultation
GPS	+5min	47
	+2min	89
	total	122
GPS + Glonass	+5min	104
	+2min	172
	total	226
Toutes	+5min	144
	+2min	229
	total	308

Ces graphiques représentent le nombre de satellites en occultation utile en fonction du temps. Le bleu est associé aux GPS seuls, le jaune aux GPS et GLONASS utilisés en même temps et le rouge à toutes les constellations ensemble.

Ce tableau reprend les données du graphique en triant les occultations qui sont susceptibles de servir (qui durent plus de 2min ou 5min) de la même manière que précédemment.

Le nombre d'occultation utile, qui durent plus de 5min double avec l'ajout de la constellation GLONASS et triple avec l'ajout de GLONASS, BEIDOU et GALILEO.

IV – Conclusion

Notre but lors de ce semestre était de confirmer les résultats des études faites précédemment et d'y apporter une meilleure précision.

Pour ce qui est du positionnement, qui nécessite 4 satellites en visibilité par notre NanoSatellite en même temps, nous pouvons conclure que, en se restreignant à la constellation GPS uniquement :

- Notre antenne n'est pas suffisante pour effectuer le positionnement et ce pour tout angle d'ouverture.
- Une seconde antenne identique à la notre fixée à l'avant commence être utile à partir d'un angle d'ouverture de 60° .

Ces résultats encouragent l'étude de l'installation d'une antenne multidirectionnelle.

L'observation de la fluctuation, du nombre et de la qualité des occultations réalisées par notre satellite à travers la ionosphère, nous a permis d'en tirer les conclusions suivantes :

L'altitude de visée, à condition d'être raisonnablement choisie, n'a que peu d'influence sur le nombre d'occultation, il faudrait donc privilégier l'altitude aux environs de 300km pour avoir des signaux plus nets.

L'angle de 20° est beaucoup trop faible pour fournir des résultats suffisants, ceux de 40° et 60° fournissent tout deux un nombre considérable d'occultations. L'angle de 60° fournit beaucoup plus d'occultations longue (plus de 5min) par rapport aux deux autres, il serait donc, pour le moment, l'angle à privilégier. Cependant avec une telle ouverture il y a des risques potentiels à prendre quand aux précisions des mesures. Pour faire le choix définitif il faut également étudier le stockage des données et voir si les 60° sont vraiment nécessaire ou si un angle plus petit ne suffirait pas.

Enfin, pour ce qui est du choix des constellations, le meilleur cas serait d'avoir accès au maximum de satellites possibles, mais il faudra étudier la compatibilité entre les différentes constellations pour voir si c'est faisable dans notre satellite à 3Unités (pesant 3kilos, consommant 3Watt et mesurant $3dm^3$, en principe).

Ainsi dans ce qui nous semble le meilleur des cas, c'est à dire, en prenant un angle d'ouverture de 60° , en visant à l'altitude de 300km, et en utilisant toutes les constellations, nous pouvons espérer avoir environ 150 occultations dites utiles par jour qui durent au moins 5 minutes, c'est à dire environ 6 occultations par heures. Il faut donc poursuivre l'étude sur le matériel embarqué pour permettre d'assurer au moins ces 150 mesures de l'occultation à travers la couche ionosphérique par jour.

V - Bibliographie

Sites internet :

<http://www.spaceflight.nasa.gov>

<http://www.heliodon.net>

<http://aa.usno.navy.mil>

<http://www.astronomia.fr>

<http://celestrak.com/>

sources pour les images :

http://univearths.in2p3.fr/sites/default/files/--- PROJETS ---/K2/05-ressources/jpeg/couleur/2-igosat_RVB_orange_degrade.jpg

<http://sam.electroastro.pagesperso-orange.fr/dossiers/ISS/orbite.JPG>

http://spaceflight.nasa.gov/realdata/sightings/SSapplications/Post/JavaSSOP/SSOP_Help/2line.gif