

Galileo-5 et -6 sur une mauvaise orbite

Florent Deleflie, Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides,

Michel Capderou, LMD École Polytechnique

16 septembre 2014

Le lancement des satellites numéro 5 et 6 de la constellation Galileo, futur GPS européen, ne s'est pas passé comme prévu le 22 août dernier. C'est le Fregat, étage supérieur de la fusée Soyouz, lancée depuis le centre spatial guyanais (CSG), qui pour une raison encore en cours d'investigation, n'a pas propulsé les deux satellites jusqu'à l'orbite nominale de la constellation.

Cette orbite nominale, pour les 30 satellites de la constellation Galileo (27, plus un en réserve pour chacun des 3 plans orbitaux) est circulaire, à 23 222 km d'altitude, et inclinée de 56° sur l'équateur. Les trajectoires des satellites Galileo-5 et -6 en est très éloignée : (i) les demi-grands axes sont respectivement de 26199km et 26182km, correspondant à des altitudes équivalentes (en soustrayant à ces valeurs le rayon équatorial terrestre) de 19821km et 19804km. C'est le demi-grand axe qui fixe, selon la troisième loi de Képler, la période orbitale des satellites, prévue initialement pour assurer une trace répétitive au sol, à l'instar des autres constellations de radionavigation par satellite. Pour Galileo, ce sont 17 révolutions en 10 jours sidéraux qui sont prévues, correspondant à un demi-grand axe de 29600km ; (ii) en lieu et place d'une trajectoire circulaire, assurant des différences d'altitudes minimales, donc une précision dans le signal émis quasiment uniforme à la surface de la Terre, c'est sur une trajectoire excentrique, avec une excentricité de 0,23 qu'ont été placés les satellites Galileo-5 et -6... En conséquence, leurs altitudes varient entre 13725km et 25921km pour Galileo-5, et entre 13704km et 25908km pour Galileo-6 ; (iii) l'inclinaison sur l'équateur, de 49°, est sans doute le paramètre orbital qu'il sera le plus difficile de modifier, tant il nécessite une quantité d'énergie grande pour être changé. Il faut dire qu'il s'agirait alors de modifier le plan de révolution, qui détermine en particulier les latitudes terrestres depuis lesquelles on peut observer les satellites au zénith. Avec 7 degrés d'écart par rapport aux spécifications, en ligne d'ailleurs avec celle de l'homologue américain de Galileo, la situation semble irrécupérable.

Tout porte à croire que la quantité d'énergie disponible à bord des satellites, prévue à l'origine pour les toutes petites corrections de trajectoires pendant une quinzaine d'années ainsi que la manoeuvre finale de désorbitation en fin de vie opérationnelle, n'est pas suffisante pour propulser Galileo-5 et -6 sur la bonne orbite.

Techniquement, utiliser ces satellites au sein de la constellation Galileo est possible, puisqu'ils délivrent en permanence un signal de radionavigation. Mais la question, complexe, est à l'étude au sein des opérateurs des segments sol et spatial : adapter à cette nouvelle orbite les logiciels de bord qui diffusent l'information de radionavigation représente un travail donc un coût considérable. Mais il n'est toujours pas assuré que le signal diffusé par ces satellites aura un niveau de précision similaire à celui des autres satellites : il est en effet à craindre que les récepteurs Galileo ne pourront pas acquérir de signaux de bonne qualité, car ils ne sont pas adaptés à une telle différence de type "effet Doppler" (à travers la vitesse relative satellite-récepteur, et surtout sa variation), et de puissance de signal. Rappelons que Galileo doit fournir des positions à un ou deux mètres près pour ses applications commerciales, et jusqu'au centimètre voire moins pour les applications scientifiques. L'apport de deux satellites qui diffuseraient des signaux de précision moindre n'est pas évident, même si la redondance du système s'en trouve alors augmentée. Notons cependant que si elle est "pratique" d'un point de vue géométrique, la répétabilité des trajectoires de la constellation par rapport à la rotation de la Terre est à l'origine d'erreurs systématiques en positionnement précis, qu'il est impossible de corriger puisqu'elles sont liées justement aux périodes orbitales et nodales. C'est sans doute le seul cadre où les trajectoires "exotiques" de Galileo-5 et -6, à la période non commensurable avec la rotation de la Terre, pourraient éventuellement trouver une utilité pour la radionavigation, mais cela reste à confirmer.

Ces deux satellites sont donc probablement inutiles, placés là où ils sont. Les opérateurs pourront les utiliser à des fins de tests et de calibration ; les scientifiques pourront imaginer des expériences particulières pour exploiter

les originalités de la trajectoire, et en particulier l'excentricité, qui engendre des variations de vitesse importante entre le périégée et l'apogée, ce qui pourrait être intéressant pour des tests de physique fondamentale.

Des tests de sensibilité doivent encore le confirmer, mais il semble que l'évolution long terme des trajectoires de Galileo -5 et -6 est remarquablement stable sur un siècle : l'évolution des éléments d'orbite est purement périodique, et il semble qu'aucun effet de résonance, dû en particulier à la présence de la Lune et du Soleil, ne viendra perturber de manière significative les trajectoires, à l'instar des satellites placés sur les bonnes trajectoires mais qui peuvent dans certains cas devenir chaotiques, donc imprédictibles, sur le très long terme. Il faut dire que ces phénomènes de résonance, conséquences des lois de la gravitation universelle, sont gouvernés principalement par la valeur du demi-grand axe du satellite et de son inclinaison sur l'équateur. Ces propagations long terme sont devenues la règle, depuis l'entrée en vigueur de la Loi sur les Opérations Spatiales (LOS) en décembre 2010, à des fins de préservation de l'environnement spatial : il est désormais obligatoire d'étudier, avant même le lancement de tout satellite, les scénarios de définition d'orbites parking ou de rentrées atmosphériques, pour chacun des engins envoyés dans l'espace. Dans le cas présent, c'est après coup qu'il faut cependant l'envisager.

À ce jour, tout laisse donc à penser que l'on risque très vite de ne surveiller ces deux satellites que du coin de l'œil. Évoluant dans une région de l'espace très peu utilisée par les opérateurs de satellites, les probabilités de collision avec d'autres objets sont très certainement infimes, même avec une excentricité qui fait parcourir aux deux engins une large gamme d'altitudes. Le lancement d'une prochaine paire de satellites Galileo est prévue le 18 décembre prochain.

TABLE 1 – Éléments d'orbite pour 3 des satellites actuels de la constellation Galileo, dont les deux derniers lancés sur une mauvaise orbite. Éléments calculés à partir des TLE les plus proches de la date du 8 septembre 2014. R désigne le rayon équatorial terrestre.

	GALILEO-FM2 (PRN E12)	GSAT0105	GSAT0106
Demi-grand axe moyen a (km)	29600.251953	26199.269531	26182.314453
Excentricité moyenne	0.000525	0.232755	0.233052
Distance relative [a/R]	4.640893	4.107668	4.105010
Altitude de l'apogée (km)	23252.005801	25921.421362	25908.286103
Altitude du périégée	23220.955137	13725.378443	13704.588897
Altitude équiv. (km) = $a - R$	23222.115234	19821.132812	19804.177734
Argument du périégée (deg)	268.524600	25.215000	25.172000
Inclinaison (deg)	55.005901	49.694599	49.694901
Période (anomal.) (min)	844.701111	703.376221	702.693604
Période (dracon.) (min)	844.680603	703.334900	702.652283
Pér. keplérienne (min)	844.700623	703.385620	702.702942
a kepl. pour $T_o=T_d$ (km)	29599.798828	26198.023438	26181.070312

GALILEO-FM2 (PRN E12)

Trace de l'orbite

Phasage - [2; -3; 10] 17

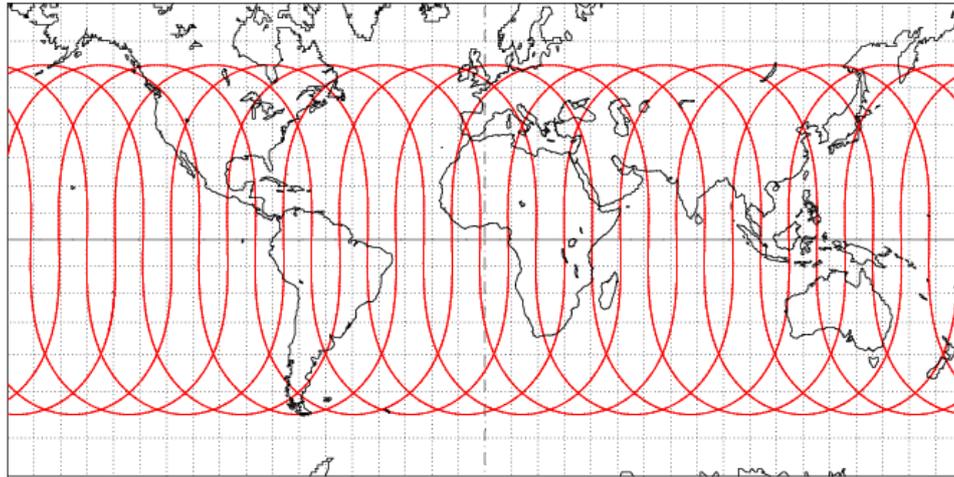
2014 09 08 15:12:12 TUC >>> 10,00 jours

Altit. équival. = 23222.1 km a = 29600.252 km

Inclinaison = 55.01 e = 0.000525

Période = 844.68 min * Révol./j. = 1.70

h_a = 23252 km ; h_p = 23221 km ; arg. périgée : +268.52



Projection : Mercator

Centre Project.: 0.0 ; 0.0

Noeud asc : -160.93 [22:32 TSM]

IXION

Propriété : Conforme

Aspect : Direct

[NOHAD] Révolution : 1416

MC * LMD

⊕ T.:Cylindrique - Grille : 10

M.2 [+90.0/ +0.0/ -90.0] [+0] EIGEN6C2

[NOHAD] 2014 01 29 09:15:20 TUC

ΑΤΛΑΣ

FIGURE 1 – Une trajectoire nominale pour un satellite de la constellation Galileo, avec une trace de l'orbite sur la surface de la Terre qui est répétitive, due à la période orbitale choisie de telle sorte qu'un satellite de la constellation fait exactement 17 fois le tour de la Terre pendant dix jours sidéraux. Cas du satellite Galileo-FM2 (PRN E12). (c) Michel Capderou - LMD - logiciel IXION.

GSAT0105 (GALILEO-FM5)

Trace de l'orbite elliptique

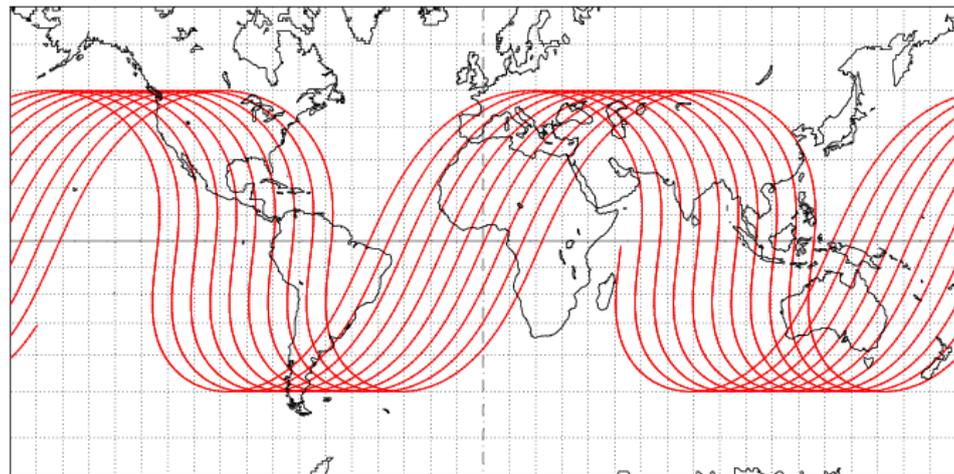
2014 09 08 15:13:54 TUC >>> 10,00 jours

Altit. équival. = 19821.1 km a = 26199.270 km

Inclinaison = 49.69 e = 0.232755

Période = 703.33 min * Révol./j. = 2.05

h_a = 25921 km ; h_p = 13725 km ; arg. périgée : +25.22



Projection : Mercator

Centre Project.: 0.0 ; 0.0

[NOHAD] 2014 09 06 11:06:43 TUC//R= 30

IXION

Propriété : Conforme

Aspect : Direct

Noeud asc : -65.29 [06:46 TSM]

MC * LMD

⊕ T.:Cylindrique - Grille : 10

M.2 [+90.0/ +0.0/ -90.0] [+0] EIGEN6C2

Apogée : -147.76

ΑΤΛΑΣ

FIGURE 2 – La trajectoire de Galileo-FM5, éloignée des spécifications de la constellation, propagée sur la même période de 10 jours. La trace n'est pas répétitive, l'inclinaison par rapport à l'équateur (que l'on peut lire en repérant les latitudes terrestres maximales atteintes) n'est pas la bonne, et la vitesse du satellite par rapport à la Terre est différente entre les traces montantes et les traces descendantes, mettant en évidence les effets de l'ellipticité de la trajectoire. (c) Michel Capderou - LMD - logiciel IXION.