

Dossier

Dossier préparé
par Karol Barthelemy

Qui ne s'est jamais demandé pourquoi Ariane 5 devait décoller au sein d'une fenêtre horaire de lancement ? Et comment, pourquoi le lanceur suit-il telle ou telle trajectoire, parfois étourdissante ? Et que cachent ces mots quelque peu barbares pour le commun des mortels : apogée, périégée, azimut... ? Latitude 5 a enquêté pour vous, a rencontré des professionnels dans ces domaines pour comprendre comment se prépare un lancement et quels outils sont mis en place à cet effet au CSG.

Suivez le guide !

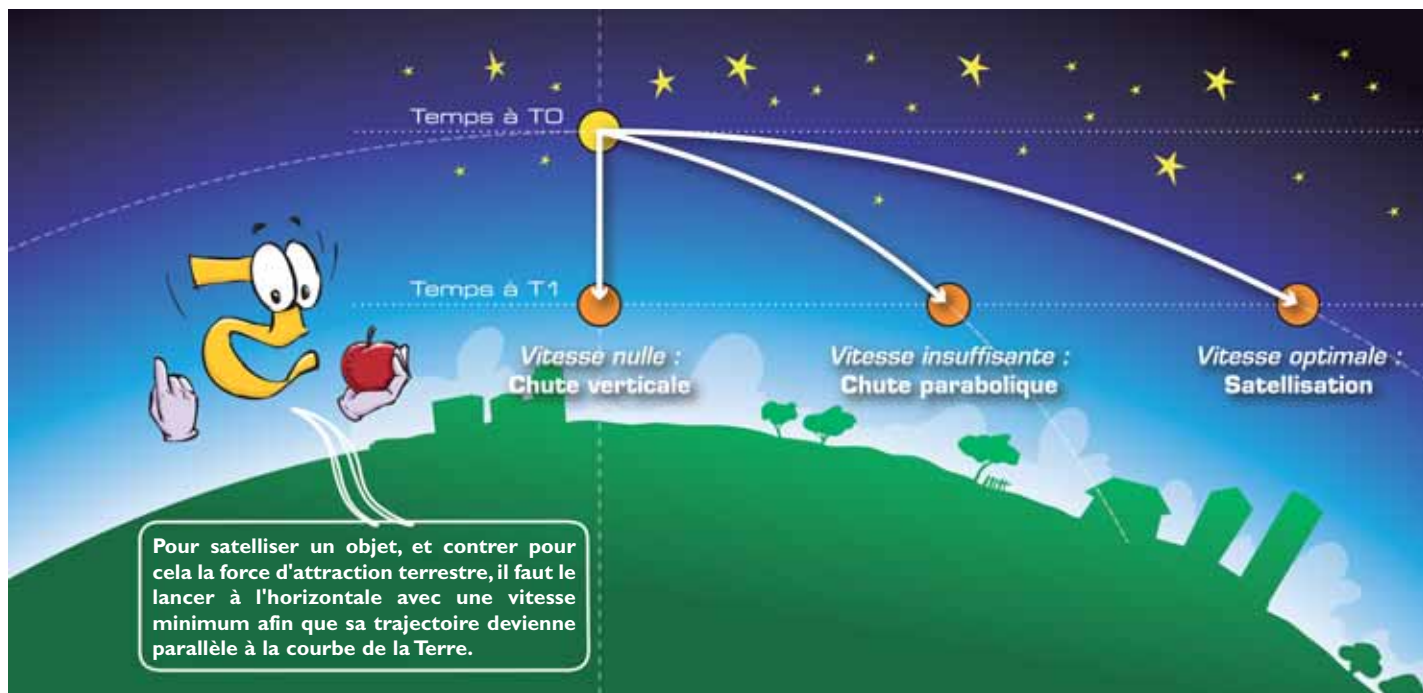


Sur orbite



L'objectif d'un transport spatial est de donner une vitesse et une position précise dans l'espace (une orbite) à une charge utile pour la satelliser ou la libérer de l'attraction terrestre, éventuellement de la ramener. En résumé, nous avons à faire à un effet domino : la fonction d'un satellite conditionne sa position orbitale qui elle-même conditionne la trajectoire du lanceur, trajectoire qui implique une fenêtre de lancement.

Le CSG et Ariane 5, ce sont approximativement 80% de lancements de satellites de télécommunications injectés par paires sur la même orbite de transfert géostationnaire ou presque, et 20% de missions scientifiques ou militaires aux trajectoires très particulières. Approfondissons donc la configuration d'un lancement double Ariane 5 de satellites commerciaux. Pour de plus amples explications du vocabulaire, rendez vous page 21.



Objectif : rejoindre l'orbite géostationnaire

Le lanceur transporte ses passagers commerciaux sur une orbite dite de transfert géostationnaire (GTO), orbite elliptique d'environ 250 km d'altitude au périhélie et 36 000 km à l'apogée. Déposé sur cette orbite, le satellite va la suivre jusqu'à son apogée. Ses propres moteurs vont alors devoir effectuer des boosts successifs pour circulariser cette orbite et en réduire l'inclinaison jusqu'au plan de l'équateur, c'est-à-dire 0° d'inclinaison : il peut de ce fait couvrir une zone géographique donnée au-dessus de laquelle il se trouve toujours à la verticale car il circule désormais sur l'orbite géostationnaire (GEO) à la même vitesse que celle de rotation de la Terre. La position à 5° de latitude nord du CSG en fait un site de lancement idéal, délivrant les satellites sur un plan peu incliné, demandant donc moins d'énergie aux satcoms pour s'installer dans le plan de l'équateur.

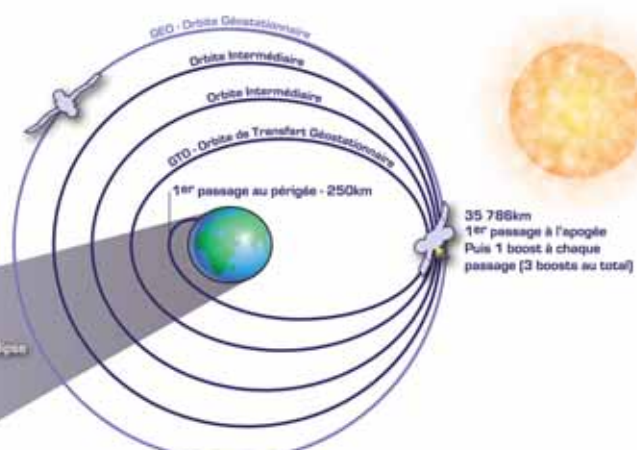
Définir une fenêtre

“Une fenêtre de lancement est la période dans une journée donnée pendant laquelle le satellite peut être lancé sur l'orbite visée” définit Virginie Salvador, Interface Lanceur avec Arianespace pour Thales Alenia Space (TAS), constructeur de satellites. Or, chaque satellite présente diverses contraintes :

- ☛ le besoin de visibilité du satellite au moment de la séparation par les stations sol qui, en plus de la télémesure reçue, permettront de commander les poussées (boosts) successives du satellite pour circulariser son orbite.
- ☛ Les angles d'ensoleillement : les panneaux solaires et autres équipements d'un satellite, notamment optiques, ne supportent pas une certaine exposition au Soleil, soit qu'ils ne peuvent endurer une montée en température, soit qu'ils risquent un éblouissement ou une dégradation de la qualité de mesure, comme par exemple le *Star Tracker*, équipement optique de positionnement par rapport aux étoiles. Les analystes de mission définissent donc des « cônes interdits » d'angles solaires.
- ☛ Les contraintes de durée entre l'injection du satellite et la première entrée en éclipse : comme l'explique Virginie, “une fois injecté, l'objectif du satellite est de déployer une partie de ses panneaux solaires pour charger au plus vite ses batteries, qui vont délivrer la puissance nécessaire au satellite pour fonctionner et circulariser son orbite. Or, circulant autour de la Terre, celui-ci peut entrer à chaque révolution dans une zone d'éclipse du Soleil par notre planète, durant laquelle les batteries ne se rechargent pas. Il faut donc que les panneaux solaires aient été suffisamment exposés au soleil avant l'entrée en éclipse.” A ce stade, Virginie apprécie l'une



Virginie Salvador en salle Jupiter 2 pour V196



La plupart des lancements d'Ariane 5 ont lieu à la nuit tombante en Guyane, condition *sine qua non* pour que les satellites, lancés vers l'Est, se retrouvent quelques heures plus tard de l'autre côté de la Terre où il fait jour, ce dont les générateurs solaires ont rapidement besoin pour alimenter le satellite en électricité afin de rejoindre l'orbite GEO.

des grandes qualités d'Ariane 5 qui "nous dépose sur orbite en 30 minutes environ. Avec certains lanceurs comme Proton, de par la forte inclinaison de l'orbite induite par la situation géographique du site de lancement, il faut 7 à 9 heures avant la séparation, ce qui implique une autonomie des batteries du satellite particulièrement importante."

☛ D'autres contraintes ne sont pas liées au satellite lui-même : par exemple, à chaque passage au point d'apogée, au fur et à mesure que le satellite se rapproche de l'orbite circulaire GEO avec une inclinaison zéro, il risque de croiser ses nombreux homologues de télécommunications qui y évoluent déjà. Autre exemple : le lanceur Ariane 5 a lui aussi ses contraintes thermiques ou d'approvisionnement en ergols, qui peuvent restreindre la fenêtre de lancement. Enfin, partir en duo à bord du lanceur européen implique de se référer au manuel utilisateur Ariane 5 qui définit une fenêtre standard d'environ 45 minutes, pour assurer un minimum de temps commun entre les fenêtres des deux co-passagers.

Ces contraintes définies, un analyste de mission du constructeur satellite va pouvoir calculer la fenêtre de lancement optimale en fonction de l'orbite souhaitée par l'opérateur du dit satellite, et de la contrainte la plus dimensionnante.

Mizrachi, du département Analyse de Mission et Programme de Vol de la Direction des Programmes d'Arianespace à Evry. A grand renfort de simulations informatiques, la définition d'une trajectoire répond aux contraintes lanceur et satellites selon deux étapes. Pour la phase propulsée, du décollage jusqu'à l'extinction de l'ESC (Etage Supérieur Cryotechnique), des logiciels optimisent la trajectoire qui va être introduite dans le programme de vol, en tenant compte de la performance du lanceur. Ainsi que l'explique l'analyste, "conçue pour emporter en moyenne 7 à 9,5 tonnes de charge utile, Ariane 5 délivre toujours la même énergie ; mais plus on veut mettre de masse en orbite, plus il nous faut de l'énergie. Pour un lancement comme V196 avec 7,3 t emportées, nous devons nous éloigner de la trajectoire optimale pour dépenser une énergie dont nous n'avons pas besoin puisque nous avons pour obligation de vider les réservoirs de l'ESC avant de le laisser en orbite."



Julien Mizrahi

FENÊTRE DE LANCEMENT



Définir une trajectoire

Vient le moment pour Arianespace de définir la trajectoire du lanceur pour mener sa mission à bien. En amont, l'opérateur de lancement européen, qui signe ses contrats indépendamment les uns des autres, a donc défini les paires de satellites potentiellement co-passagers. Partant du point d'arrivée pour remonter au site de lancement, la définition d'une trajectoire relève d'un calcul mathématique optimal.

"Pour définir une trajectoire, nous recevons les spécifications de la part des deux clients satellites, en termes d'orbites sur lesquelles ils veulent être injectés, et d'attitude à la séparation, c'est-à-dire l'orientation du satellite vis-à-vis de l'orbite, du Soleil et de la Terre" entame Julien

En bref, les contraintes de trajectoire

Contraintes satellites : orbite souhaitée, attitude, contraintes d'ensoleillement, flux aérothermiques (contraintes générées par les frottements de l'atmosphère sur le satellite jusqu'à environ 180 km d'altitude et qui vont définir le moment de largage de la coiffe), visibilité par les stations au sol au point d'injection.

Contraintes lanceur : flux aérothermiques (après le largage de la coiffe, le satellite haut n'est plus protégé), visibilité d'observation par les stations au sol, lieu de retombée d'étages (EAP au large de Kourou, EPC avant les côtes africaines, et coiffe), la sauvegarde en champ proche et zones lointaines (éviter de passer au-dessus de zones d'habitations denses), respect du domaine de vol.

Précisons ici que le lanceur procède en deux étapes : d'abord sortir de l'atmosphère en donnant une poussée maximale pour s'arracher à l'attraction terrestre, travail du premier et second étages, puis acquérir de la vitesse. On fait appel pour cela à l'étage supérieur ESC-A, qui ne délivre pas une forte poussée mais en revanche éjecte très vite ses produits de combustion, le rendant particulièrement efficace pour atteindre la vitesse de satellisation recherchée (voir page 21).

Pour la phase balistique, où il n'y a plus de propulsion et où l'ensemble avance sur son orbite, un autre logiciel va "créer une séquence d'une trentaine de manœuvres destinées à orienter et séparer les satellites selon leurs besoins respectifs puis à éloigner l'ESC pour éviter toute collision. L'optimisation de ces opérations reste confiée à la compétence d'un expert, en fonction des résultats des différentes simulations renvoyés par le logiciel" commente Julien. A terme, une simulation globale de prévision de vol conjugue l'ensemble de ces allégories pour s'assurer que le point d'injection en début de phase balistique est bien le même qu'en fin de phase propulsée, seul point commun entre ces deux étapes.

Une vérification indispensable à la maîtrise des risques

“En tant que concepteur architectural des lanceurs Ariane, la Direction des Lanceurs (DLA) du CNES effectue ses propres vérifications : là où la Sauvegarde Vol du CNES/CSG va s'assurer de la compatibilité de la trajectoire avec les mesures de protection locales vis-à-vis des couloirs de vol (voir page 19), la DLA va contrôler le respect du domaine qualifié. Cela consiste à vérifier certains critères pertinents, comme la pression dynamique (pression de l'écoulement d'air qui s'applique sur tout le lanceur, qui ne doit pas être trop forte) pour garantir que la conception des étages peut supporter la trajectoire demandée. Par ailleurs, les ergols résiduels de l'étage supérieur doivent être capables d'absorber certains aléas comme une surconsommation excessive d'un étage ou encore un guidage difficile.”

Propos recueillis auprès de Philippe PASCAL, Sous Directeur Techniques Systèmes de Transport Spatial du CNES/DLA

Au final, définir une trajectoire réclame environ six semaines. Auparavant, des études ont lieu chez Arianespace (analyse de mission préliminaire pour démontrer la compatibilité des satellites avec un lancement double sur Ariane 5 et un co-passager réaliste), puis chez Astrium pour l'analyse de mission finale. Cette dernière est soumise à l'approbation d'Arianespace, du CNES et des clients afin d'autoriser la production du programme de vol contenant la trajectoire ainsi définie.

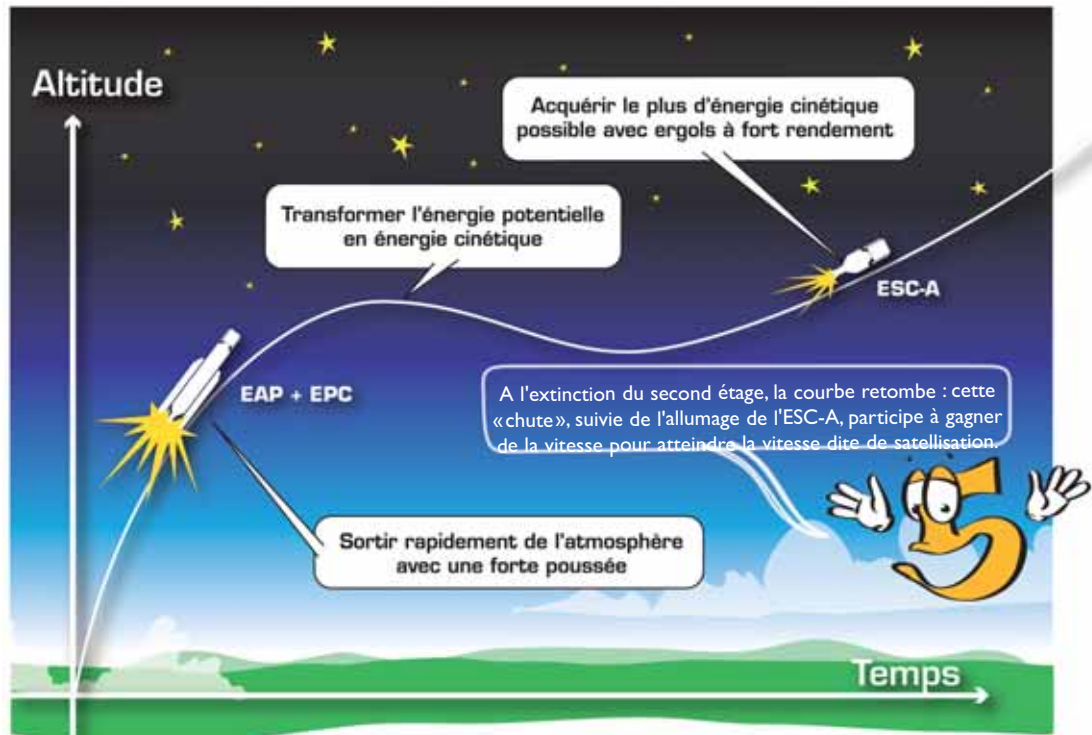
Notons que si les satellites de télécommunications, construits sur cinq ou six plates-formes récurrentes, sont aisément couplés, certaines missions scientifiques ou militaires doivent partir seules compte tenu d'une architecture originale, d'une orbite inhabituelle et donc d'une trajectoire particulière. Dans ces derniers cas, Arianespace réalise des études de faisabilité bien en amont du lancement.

“Pour Soyuz” souligne Julien, “nous allons fonctionner de la même façon, mais avec les industriels russes comme TSSKB et Npo Lavotchkine. Globalement, les trajectoires Soyuz sont plus compliquées à mettre en place car le dernier étage, réallumable, permet des phases propulsives et balistiques alternées qui multiplie d'autant le nombre de solutions de trajectoires d'orbites, rendant l'optimisation plus complexe.”

Déclarer un lancement

“Tout lancement doit faire l'objet d'une double déclaration par le Directeur des Opérations (DDO) du CNES/CSG responsable du lancement” explique Thierry Vallée du service Opérations. D'une part, il doit envoyer le VIM (Vehicle Information Message) au US Space Command, au NORAD et à la NASA, pour déclarer la date et l'heure de lancement, l'orbite visée et tous les débris qui vont rester dans l'espace, essentiellement pour la gestion des débris spatiaux.

D'autre part, dans le cadre de la mise en place d'accords inter gouvernementaux contre la prolifération des missiles balistiques, le DDO doit remplir le H-COC (*The Hague-Code Of Conduct*), “prévenant ainsi qu'un projectile va décoller de Guyane sans menace aucune” développe Thierry. Il s'agit d'une déclaration auprès de la Direction de la Stratégie et de la Programmation du CNES Paris, qui la transmet aux instances internationales, ainsi qu'au Haut Fonctionnement de la Défense à la Direction Centrale de la Sécurité. Par ailleurs, sur l'orbite GEO, les longitudes orbitales, ou points



de stationnement des satellites, étant limitées en nombre, l'Union internationale des télécommunications UIT gère ces positions et donne les autorisations aux opérateurs satellites en amont du lancement. “Pour les autres orbites, généralement fréquentées par des satellites institutionnels, cela relève d'une entente inter-agences,” complète le DDO, “surtout afin de prévenir les risques de collisions, particulièrement faibles dans l'espace profond où est envoyée la plupart des missions scientifiques.”

Le **NORAD** (North American Aerospace Defense Command) est une organisation américano-canadienne dont la mission est la surveillance de l'espace aérien nord-américain : contrôle des objets volants humains, détection, validation et alerte suite à des attaques contre l'Amérique du Nord par des avions, missiles ou véhicules spatiaux. [<http://www.norad.mil>]

L'**UIT** est l'institution spécialisée des Nations Unies pour les technologies de l'information et de la communication. Conformément à sa Constitution, l'UIT est chargée d'attribuer le spectre et d'inscrire les assignations de fréquence, les positions orbitales ainsi que d'autres paramètres de satellites, « afin d'éviter les brouillages préjudiciables entre les stations de radio-communication des différents pays ». [<http://www.itu.int>]

Garantir la trajectoire

Catherine Wang à la Sauvegarde Vol et Stéphane Rousseau à l'Analyse Systèmes Mesures, les deux ingénieurs du CNES/CSG oeuvrent en parallèle et de concert avec Arianespace pour valider la trajectoire finale d'Ariane 5 et suivre le lanceur dans les meilleures conditions.

Rencontre croisée.

En campagne comme en vol, le service Sauvegarde assure la mission régaliennne du CNES : garantir la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement. A ce titre, il fournit à Arianespace des couloirs de vol standard. Puis "Arianespace nous fournit les informations de trajectoire, les zones de retombées des éléments lanceur ainsi que les seuils de diagnostic de bonne santé du lanceur" entame Catherine Wang. "Dès lors nous réalisons une soumission de trajectoire : définition des limites d'intervention Sauvegarde, c'est-à-dire la zone de l'espace (en altitude et en terme géographique) où nous pouvons intervenir, vérification de la conformité des zones de retombées, et estimation des risques en cas de défaillance du lanceur lors de survol de terres. Nous réalisons également des contrôles d'intégrité et de formats, que nous mettons à disposition des Adjoints Mesures pour leurs analyses en parallèle" poursuit-elle. En effet, le service Mesures intervient dès ce stade, chargé de mettre à disposition de la Sauvegarde Vol et d'Arianespace les moyens de suivre le lanceur en temps réel : "Avant le lancement, nous devons nous assurer que les moyens dont nous disposons permettront de couvrir la trajectoire définie dans des conditions optimales. C'est un processus bien rodé" estime Stéphane Rousseau, "le système est conçu pour être robuste à une perte, grâce à une redondance de tous les moyens de localisation et de télémétrie. La Sauvegarde Vol utilise les premiers lorsqu'Ariane survole la Guyane, tandis qu'Arianespace va se baser sur le réseau télémétrie pour le CVI (Contrôle Visuel Immédiat) et pour suivre le lanceur jusqu'à la fin de sa mission."

"La Sauvegarde Vol est comme une assurance"

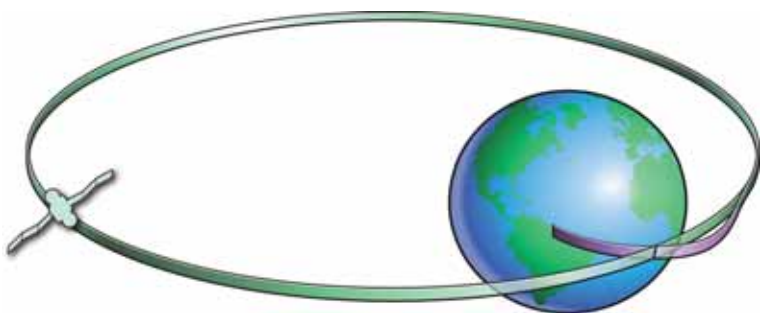


Stéphane Rousseau (Mesures) et Catherine Wang (Sauvegarde Vol)

Au terme de la soumission de trajectoire, la Sauvegarde valide ou non la trajectoire définie par l'opérateur de lancement, la priorité étant de rester dans les limites d'intervention de la Sauvegarde. Car intervenir signifie potentiellement neutraliser le lanceur, grâce à la station télécommande gérée par le service Mesures. Au-delà de cette zone d'intervention, la Sauvegarde conserve une mission de surveillance et d'alerte.

Comme l'exprime justement Catherine, "la Sauvegarde Vol est comme une assurance que nous espérons ne pas utiliser : on prend toutes les précautions." Parmi ces dernières, le CVI Sauvegarde, en parallèle du CVI d'Arianespace (voir page 20), les deux étant rendus possibles grâce aux moyens Mesures. "Pour le CVI Sauvegarde, nous avons besoin de visualiser certains paramètres de propulsion et d'altitude du lanceur qui, intégrés aux informations de trajectoire, permettront le cas échéant de prendre une décision selon des critères prédéfinis" explique Catherine Wang. "Nous avons pour cela des entraînements en et hors campagne. C'est un véritable processus de formation et de dialogue opérationnel au sein de l'équipe" apprécie l'ingénieur Sauvegarde.

L'un dans l'autre, le calcul de cette fameuse trajectoire relève donc d'un processus itératif entre Arianespace, la Sauvegarde Vol et le service Mesures du CNES/CSG. Un trio éprouvé qui conforte l'avenir : "Avec l'arrivée de Soyuz et Vega, aux couloirs de vol différents, nous adapterons nos outils de traitement des trajectoires pour un fonctionnement multi lanceurs de la base" spécifie l'ingénieur Sauvegarde. Côté Mesures, l'ajustement est déjà bien avancé : le premier lancement du lanceur russe au CSG en 2011 relevant d'une trajectoire particulièrement compliquée, "nous nous sommes longuement entretenus avec Arianespace pour simplifier au maximum le réseau télémétrie qu'il a fallu spécifiquement confectionner, comme pour l'ATV" confie Stéphane. Ainsi, pour le lancement Pléiades au départ de Guyane, Soyuz sera suivi par des stations télémétrie aux Bermudes, en Corée, en Australie, en Inde et au Canada. ✓



Lancement en live !

Nathalie Philippe. La voix dans l'oreillette du DDO durant le lancement d'Ariane 5, c'est elle une fois sur trois. Responsable du département Ingénierie Technique à la Direction des Programmes d'Arianespace depuis douze ans, Nathalie garde un œil attentif sur le lanceur durant toute sa mission en vol. Explications.

Elle arrive toujours à Kourou quelques jours avant le lancement pour endosser le rôle de Responsable CVI, le Contrôle Visuel Immédiat, et préparer son équipe. Selon Nathalie Philippe, *“le CVI est le contrôle en temps réel du lanceur pour vérifier que tout se passe bien et, en cas d'anomalie, pouvoir réagir très rapidement mais aussi avoir une communication immédiate avec le client. Nous gardons toujours en vue le lancement suivant, ayant tout intérêt à anticiper un problème lanceur et réajuster au mieux.”* Pour cela, Nathalie est en relation permanente avec toutes les stations du réseau télémesure et les équipes techniques au CSG. Car *“le CVI est une extraction de la télémesure reçue des stations aval qui, elles, enregistrent tout. Ce que nous récupérons par la suite pour une exploitation complète 10 jours plus tard”* explique-t-elle. Cependant, dès la demi-heure suivant la fin du vol, le CVI permet à Arianespace de fournir à chaque client un diagnostic de satellisation avec la position et l'orientation du satellite, confirmation de la spécification initiale.

L'équipe du CVI est installée dans la station télémesure Galliot au sommet de la Montagne des Pères, dans une petite salle dédiée, avec quatre postes informatiques : un pour la trajectoire, un pour le contrôle de vol, un pour la propulsion et un poste de synthèse, celui de Nathalie, *“qui regroupe toutes les informations du séquentiel et reprend les valeurs numériques des paramètres de propulsion pour pouvoir les annoncer facilement”* précise la Responsable CVI. Ces quatre opérateurs relèvent du CPAP (Chef de Programme Ariane Production) : deux représentants d'Arianespace, un de la Direction des Lanceurs du CNES et un d'Astrium. Chacun a donc en charge durant le vol d'observer les paramètres qui lui sont attribués et d'annoncer les principaux événements, les courbes qui se dessinent en direct sur les moniteurs attestant de la conformité attendue. Mais Nathalie est seule autorisée à retransmettre oralement la synthèse aux instances décisionnelles au Centre de Contrôle Jupiter II et aux opérationnels du Centre de Lancement CDL3. Parmi ces derniers, les équipes du COEL

le CVI est le contrôle en temps réel du lanceur



Nathalie Philippe en salle CVI, à Galliot.

(Chef des Opérations sur les Ensembles de Lancement) et du CPAP (Chef de Programme Ariane Production, responsable de la production puis de la préparation du lanceur) sont particulièrement attentives. Ce sont elles qui devront analyser le caractère acceptable ou non d'une éventuelle anomalie et déterminer comment la gérer. Prête à intervenir en renfort immédiat le cas échéant, la base arrière à Evry, regroupant Arianespace, le CNES et les industriels d'Ariane 5, est également à l'écoute du CVI. Précisons qu'il existe aussi le CVI Sauvegarde, sous la responsabilité du CNES/CSG (voir page 19).

Pour se préparer au HO, l'équipe de Nathalie simule le CVI lors de la Répétition Générale, en rejouant la bande d'un vol précédent le plus similaire possible. Par ailleurs, à J-1, ils s'entraînent grâce à des enregistrements précédents pour coordonner leurs annonces, en modes optimal et dégradé, afin que chacun prenne conscience des difficultés potentielles. *“VI57 est pertinent à rejouer”* estime Nathalie, *“pour montrer comment tout s'est très vite dégradé sans que l'on puisse identifier que le problème venait de l'EPC...”* Alors à la question *“comment gérez-vous la tension ?”*, Nathalie répond que *“le stress arrive peu avant le décollage. La dernière minute du décompte est particulièrement silencieuse ! Au début du vol, il se passe beaucoup de choses, il y a beaucoup de vérifications de paramètres à réaliser et d'annonces à faire, il ne faut rien rater ! Si le DDO doit «filtrer» ces informations pour faire un commentaire au grand public, pour ma part je dois tout annoncer, que ce soit bon ou pas. Il faut donc rester le plus factuel et le plus calme possible.”*

Pour Nathalie, *“venir à Kourou est un aboutissement, la chance d'aller au bout du travail en amont. C'est aussi un bon moyen de créer une unité en rencontrant les équipes des industriels et du CSG avec qui nous travaillons beaucoup. Et puis la Guyane, c'est agréable, ça change du quotidien !”* ✓

Mécanique spatiale

On ne peut parler de trajectoire et d'orbite sans aborder la mécanique spatiale, fruit des travaux de grands personnages, et dotée d'un « jargon » spécifique dont nous vous proposons un petit décodage.

Les pères fondateurs

Très synthétiquement, **Galilée** (1564-1642) ouvrit la voie en énonçant que tous les corps ont dans le vide la même loi de chute : la vitesse d'un satellite en orbite ne dépend que de son altitude et pas de sa masse. Puis les patientes observations des mouvements des corps célestes par **Tycho Brahé** (1546-1601) ont permis au remarquable esprit de synthèse de **Johannes Kepler** (1571-1630) d'établir les trois lois régissant le mouvement des planètes et des satellites, la première et plus célèbre affirmant que les planètes décrivent une ellipse dont le Soleil occupe l'un des deux foyers. Dans la foulée, la compréhension du phénomène de gravitation (deux corps quelconques s'attirent d'autant plus qu'ils sont lourds) par **Isaac Newton** (1642-1727) et les lois qu'il en a déduites, ont fini de poser les bases de la mécanique spatiale. **Albert Einstein** enfin généralisera la gravitation en l'incluant dans sa théorie de la relativité générale.

Orbite : trajectoire que dessine dans l'espace un corps autour d'un autre corps (comme un astre) sous l'effet de la gravitation. Située dans un plan plus ou moins incliné qui passe forcément par le centre de l'astre, elle décrit une ellipse. Cela relève d'un équilibre permanent entre la vitesse de l'objet et la force gravitationnelle exercée par l'astre.

Inclinaison : position du plan d'orbite par rapport à l'équateur. A 0° le plan est dans l'équateur, à 90° il est perpendiculaire à l'équateur.

Apogée, périgée et dérivés

Les termes génériques apoastre et périastre d'un objet céleste désignent respectivement le point de l'orbite le plus éloigné et le plus proche de l'astre autour duquel il gravite. Selon l'astre en question, le vocabulaire s'adapte : ainsi on parle d'apogée/périgée s'il s'agit de la Terre (du grec *gê*, Terre), d'aphélie/périhélie pour le Soleil (du grec *hélios*, Soleil), et par analogie d'apolune/périlune pour la Lune ou d'apojove/périjove pour Jupiter.

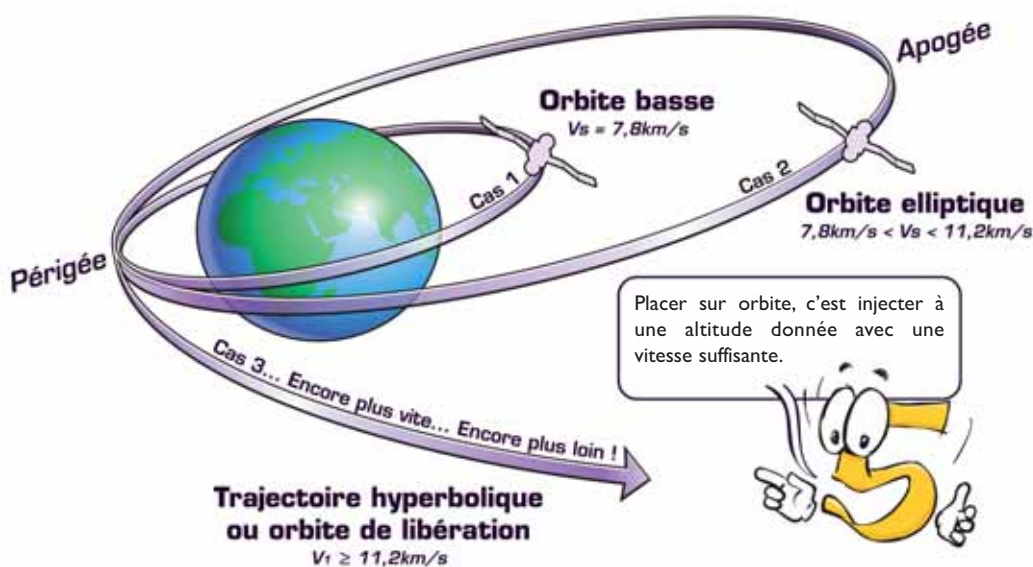
Attention aux termes **azimut** et **élévation** que l'on entend au CSG. Ce ne sont pas des paramètres orbitaux mais des paramètres caractérisant le mouvement d'équipements au sol comme les antennes pour suivre un objet céleste et déterminer sa position. Ainsi, de 0 à 360° , l'azimut est une mesure horizontale, tandis que, de 90 à -90° , l'élévation est verticale.

Quasiment rien ne vient ralentir le mouvement d'un objet dans l'espace : un objet en orbite tourne donc pendant très longtemps à la même distance de son astre.

Les trajectoires et orbites d'un véhicule spatial dépendent de la vitesse communiquée à l'engin au point d'injection P.

Si la vitesse communiquée au véhicule spatial placé au point P est trop faible, il retombe sur Terre.

Pour une vitesse bien définie, en relation avec l'altitude, le véhicule ne peut pas retomber, mais décrire une trajectoire circulaire. Cette vitesse, dite vitesse de satellisation V_s , est de l'ordre de $7,8 \text{ km/s}^{-1}$ pour une orbite décrite à 800 km d'altitude (cas 1).



Si la vitesse communiquée est légèrement supérieure à V_s , le véhicule spatial décrit une trajectoire elliptique dont le périgée P correspond au point d'injection sur orbite (cas 2).

Libération de l'attraction terrestre : lorsque la vitesse atteint la vitesse de libération V_1 ($> 11,2 \text{ km/s}^{-1}$, soit $> 40\,300 \text{ km/h}$), le véhicule s'éloigne indéfiniment de la Terre (cas 3), la trajectoire devient une parabole ou une hyperbole. Dans ce cas, le seul « moteur » du véhicule est désormais la gravité des corps qu'il croise sur son chemin. Toutefois, les moyens de propulsion d'un satellite artificiel lui permettront d'accélérer ou de ralentir pour modifier sa trajectoire, tout en restant dans son plan orbital.

Une orbite est liée à la fonction du satellite

En fonction de sa tâche, un satellite rejoindra une orbite plutôt qu'une autre. Les plus utilisées sont les orbites circulaires ou quasi-circulaires, à savoir les orbites basses, moyennes et hautes (LEO, MEO, GEO). Par exemple, les satellites d'observation de la Terre sont généralement placés sur des orbites basses qui leur permettent de faire le tour complet de la Terre en quelques heures et d'acquérir des images détaillées de la surface terrestre.

Les orbites elliptiques présentent une excentricité plus ou moins importante, et l'un de leurs foyers coïncide avec le centre de la Terre. C'est le cas de l'orbite de transfert géostationnaire GTO, orbite d'injection des satellites par le lanceur. Il s'agit d'une orbite intermédiaire qui leur permettra de rejoindre l'orbite géostationnaire. Cette dernière est idéale pour les satellites commerciaux et météorologiques : à 36 000 km au-dessus de l'équateur, ils se déplacent à la même vitesse que celle de la rotation de la Terre et donc semblent immobiles vus de la Planète bleue. "Vu que la Terre tourne autour de l'axe des pôles, il faut absolument être dans le plan de l'équateur et l'orbite doit être parfaitement circulaire pour que la vitesse ne varie pas" explique Stéphane Rousseau. Enfin les orbites dites de libération, ou trajectoires hyperboliques, concernent les sondes spatiales qui doivent échapper à l'attraction terrestre pour naviguer dans l'espace profond.

Pour rester sur orbite, un satellite doit avoir une très grande vitesse, qui dépend de sa hauteur. A 300 km d'altitude, à une vitesse de 7,8 km/s, un satellite effectue un tour complet autour de la Terre en 90 minutes.

$$\Sigma \vec{F} = \vec{0} \Rightarrow \vec{v} = \vec{Cte}$$

Première loi de Newton

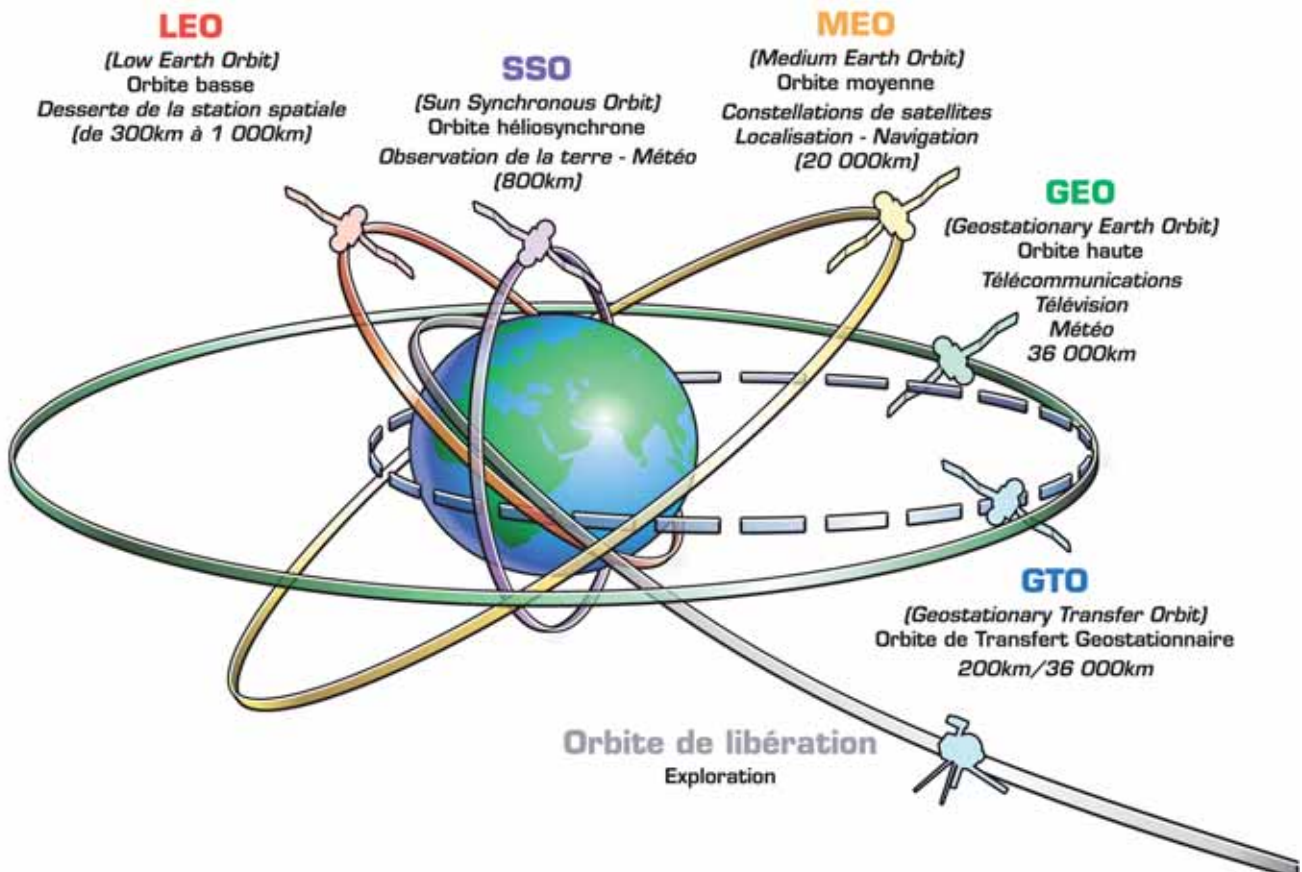
ou principe de l'inertie (initialement formulé par Galilée) :

Dans un référentiel galiléen, le centre d'inertie G d'un solide soumis à un ensemble de forces dont la somme vectorielle est nulle est soit au repos, soit animé d'un mouvement rectiligne et uniforme (le vecteur vitesse demeure constant).



Orbites de transfert, voyages en classe économique

Pour passer d'une orbite circulaire à une autre, dans le même plan et le même sens de parcours, la manœuvre la plus économique consiste à décrire une demi-ellipse, une extrémité étant tangente à l'orbite initiale et l'autre à l'orbite finale. Le transfert de Hohmann - c'est le nom de la manœuvre - ne nécessite en théorie que 2 impulsions. Ce type de transfert est utilisé pour la mise à poste de satellites géostationnaires ou encore pour effectuer le voyage Terre - Mars. [<http://www.cnes.fr>]

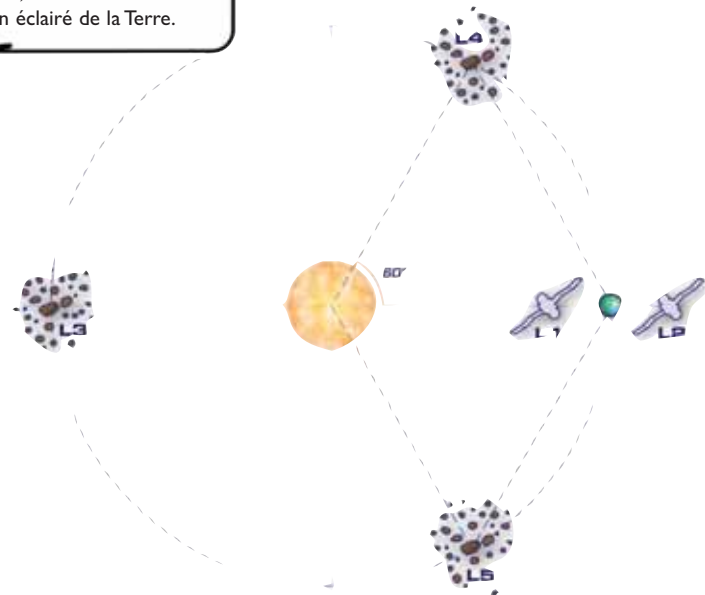


Les points de Lagrange, sites d'observation spatiale

Découverts par le mathématicien français Joseph-Louis Lagrange, les points portant son nom sont des points d'équilibre dans la dynamique céleste, en lesquels les forces gravitationnelles s'annihilent. Autrement dit, si l'on considère deux corps de très grande masse (Terre et Soleil par exemple), les points de Lagrange sont des positions privilégiées pour un troisième corps de masse négligeable. Ces points tournant à la même vitesse que le corps tournant autour du corps central (la Terre), les points de Lagrange sont donc des endroits dans l'espace où un troisième corps comme un satellite peut rester fixe par rapport aux deux autres. De ce fait, ils nécessitent souvent peu de carburant pour rester en place. De tous ces points, il y en a 5 en tout ; seuls L4 et L5 sont stables, la matière a tendance à s'accumuler à ces endroits. Les autres sont instables, c'est à dire qu'à la moindre perturbation, un objet s'éloigne de ces positions, mais ne nécessite le cas échéant que de minimes corrections de trajectoire. Cette propriété fait des points de Lagrange des sites d'observation spatiale remarquables. Ainsi le satellite d'observation du Soleil SOHO orbite-t-il depuis 1996 autour de L1, tandis que les télescopes européens Herschel & Planck, déposés sur une orbite de libération à partir du CSG, ont rejoint L2 en 2009. Le James Webb Telescope, successeur de Hubble, les y rejoindra prochainement.



L1 et L2 se situent à environ 1,5 million de kilomètres de la Terre, L1 dans la direction du Soleil, L2 du côté non éclairé de la Terre.



Assistance gravitationnelle

Egalement appelé effet de fronde, l'assistance gravitationnelle apparaît quand un vaisseau spatial passe à proximité d'une planète ou d'un satellite important. L'attraction de la planète va modifier son orbite en influant sur sa vitesse (selon qu'il passe devant ou derrière la planète) et sa direction. Les missions d'exploration spatiale comme la sonde Rosetta, partie du CSG en 2004 pour rejoindre la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko en 2014 (voir ci-dessous et page 27), ou Cassini-Huygens, actuellement en orbite autour de Saturne, vont utiliser cette assistance gravitationnelle à plusieurs reprises pour atteindre leur objectif. ✓

Trajectoire de Rosetta

- Lancement ☉ > AG Terre 1 ☉
- AG Terre 1 ☉ > AG Mars ☉
- AG Mars ☉ > AG Terre 2 ☉
- AG Terre 2 ☉ > AG Terre 3 ☉
- AG Terre 3 ☉ > 67P/C-G ☉

AG : Assistance Gravitationnelle

① Lancement : 03/2004

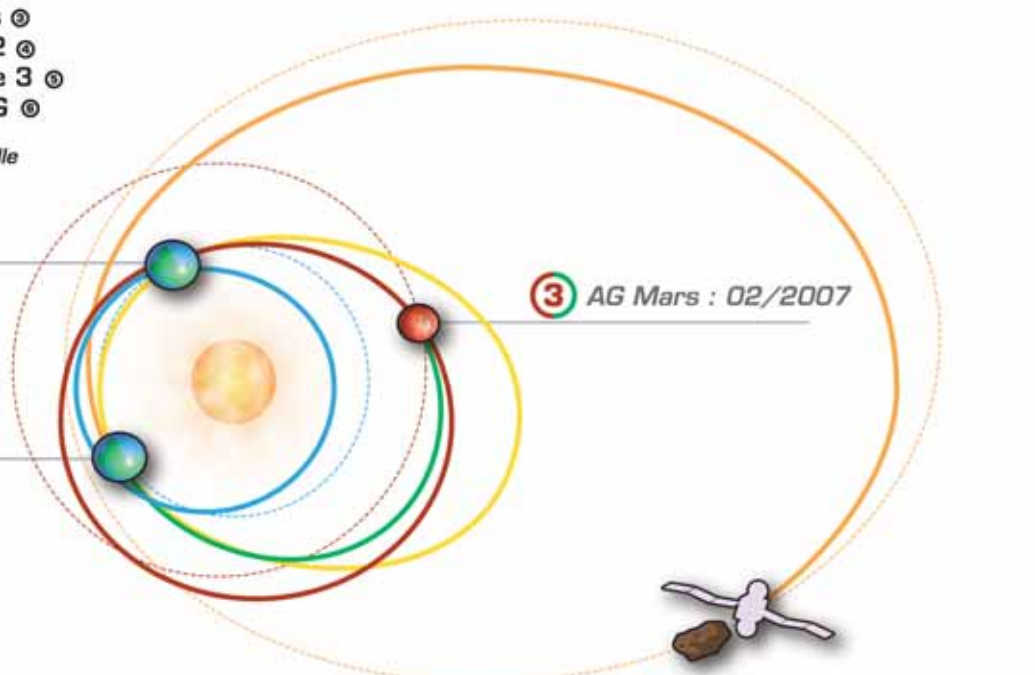
② AG Terre 1 : 03/2005

③ AG Mars : 02/2007

④ AG Terre 2 : 11/2007

⑤ AG Terre 3 : 11/2009

- Orbite de la Terre
- Orbite de Mars
- Orbite de 67P/C-G



⑥ Rendez-vous : 08/2014

67P/CHURYUMOV - GERASIMENKO

Partie du CSG en 2004, la sonde européenne Rosetta mettra au final 10 ans pour rejoindre la comète 67P/Churyumov Gerasimenko. Sa trajectoire fait appel aux lois de la mécanique spatiale, et tout particulièrement à l'assistance gravitationnelle des planètes bleue et rouge.