

Le système GALILEO, une technique d'avenir pour la géodésie spatiale de très haute exactitude

■ Florent DELEFLIE, François BARLIER, Pierre EXERTIER

GALILEO est le programme européen de radio-positionnement par satellite. Il sera mis en place dès 2008 et sera complémentaire, tout en étant concurrent, aux systèmes américain GPS et russe GLONASS. L'ensemble des trois systèmes constituera le "Global Navigation Satellite System", système global et unique de navigation par satellite.

En doublant le nombre de satellites dédiés à la radionavigation, en améliorant l'exactitude et la précision des mesures, le système GALILEO va faire s'accroître considérablement le nombre des applications, notamment civiles, du système GPS existant. Parmi elles figurent également toutes les études de géodésie spatiale qui nécessitent le suivi continu du positionnement d'une balise placée au sol (immobile), ou dans l'espace (en mouvement). Grâce à l'association des différents systèmes de radionavigation par satellite aux autres techniques classiques ou émergentes de géodésie spatiale, il va être enfin possible de décrire le fonctionnement du système "Terre" dans son ensemble (terre solide, océans, glaces, atmosphère) de manière pérenne et continue, uniforme, globale et cohérente.



Figure 1 : Vue d'artiste de satellites de la constellation GALILEO.

(Doc ESA)

Comme cela est écrit et répété dans le rapport GALILEO publié en 2003 par le Bureau des longitudes, l'Académie de marine, l'Académie nationale de l'air et de l'espace, la construction d'un repère spatio-temporel sur la Terre et dans son environnement n'est pas une entreprise occasionnelle. C'est une évolution majeure et irréversible du système technique sur lequel repose le fonctionnement de notre société, et des recherches sur la conquête spatiale et la compréhension de notre univers.

Dans une perspective historique, la construction d'un tel repère spatio-temporel est la solution ultime d'un problème auquel l'astronome et plus généralement l'homme est confronté depuis les origines de la civilisation : connaître dans l'espace et dans le temps sa position et celle des engins qu'il fabrique. La

navigation par satellite depuis l'espace est ainsi l'aboutissement d'un effort engagé depuis l'origine de la civilisation pour étudier la forme de la Terre, et pour définir des échelles de temps. Le développement des techniques qui structurent le mode contemporain, les transports et les télécommunications notamment, engendre une croissance explosive du besoin de la navigation par satellite, tant sur le plan de la recherche fondamentale que sur celui des applications.

Nous présentons ici les caractéristiques principales du programme GALILEO tout en montrant ses spécificités et surtout sa complémentarité par rapport aux systèmes existants. Plus particulièrement, nous mentionnons les applications scientifiques de ce programme, notamment en géodésie spatiale.

Les constellations GPS et GALILEO

La radionavigation par satellite repose sur une constellation de satellites artificiels en orbite autour de la Terre. Deux systèmes principaux sont actuellement opérationnels : le système américain GPS, et dans une moindre mesure le système russe GLONASS. L'arrivée programmée du système européen GALILEO va bouleverser le nombre et la diversité des applications civiles du positionnement par satellite, en se révélant à la fois concurrent mais surtout complémentaire aux systèmes déjà en place.

La constellation GPS est constituée de 27 satellites répartis sur 6 plans d'orbite différents (inclinaison moyenne de 55°), à laquelle viennent s'ajouter des satellites du système GLONASS (inclinaison moyenne de 64,8°). La constellation

■ ■ ■ GALILEO sera, elle, constituée de 30 satellites répartis dans 3 plans d'orbite différents (inclinaison moyenne de 56°). La définition des paramètres orbitaux d'une constellation comme celle sur laquelle repose le système GALILEO est donc le résultat de compromis nombreux et complexes liés d'une part à des exigences fonctionnelles (en particulier la couverture terrestre) et d'autre part à des contraintes liées aux coûts de lancement et de dépenses de la puissance électrique nécessaire à bord (plus le satellite est lointain, plus la puissance nécessaire pour émettre des signaux doit être grande).

L'excentricité de l'orbite, par exemple, doit être très faible car une orbite quasi-circulaire est la mieux à même d'assurer l'obtention de résultats homogènes et également comparables en tout point de la Terre. L'inclinaison est un autre paramètre orbital de base. Il représente l'angle entre le plan de l'équateur terrestre et le plan de l'orbite; un satellite

d'inclinaison nulle a ainsi une trajectoire parallèle à l'équateur et ne peut convenir à l'observation des régions polaires. Les inclinaisons des plans d'orbite des constellations GPS et GALILEO ont ainsi été choisies de telle sorte que tous les points de la Terre puissent disposer dans leur ciel local (la portion du ciel qu'ils ont en visibilité) d'un nombre minimum de satellites de ces constellations, assurant ainsi une bonne géométrie de la configuration Terre-constellation satellites. On remarquera que les inclinaisons des constellations GPS et GALILEO, à couverture mondiale, sont relativement proches, alors que le système GLONASS a tendance à privilégier un peu plus les zones de hautes latitudes nord, en tant que système conçu à l'origine pour le positionnement dans l'ex-URSS.

Le troisième paramètre orbital fondamental est le demi-grand axe des satellites (pour des orbites circulaires: altitude des satellites augmentée du rayon

de la Terre). Plus un satellite est haut, plus il est visible d'une grande partie de la Terre. Par exemple et à titre de référence, un satellite de demi-grand axe 12 000 km (altitude de 5 600 km) est visible d'une zone de la Terre d'environ 6 000 kilomètres de rayon: il se situe à la verticale de Dakar quand il est très proche de l'horizon à Paris. Quant aux satellites des constellations GPS et GALILEO, ils sont situés bien plus hauts, respectivement à environ 20 000 et 24 000 km d'altitude. Notons qu'en conséquence, la couverture des régions polaires sera meilleure avec le système GALILEO qu'avec le système GPS.

Une altitude encore plus élevée assurerait certes une couverture dense de tous les points du globe avec relativement peu de satellites, mais nécessiterait à l'inverse des coûts de lancement plus élevés. Il faudrait en outre et surtout une dépense énergétique bien plus grande pour assurer la transmission

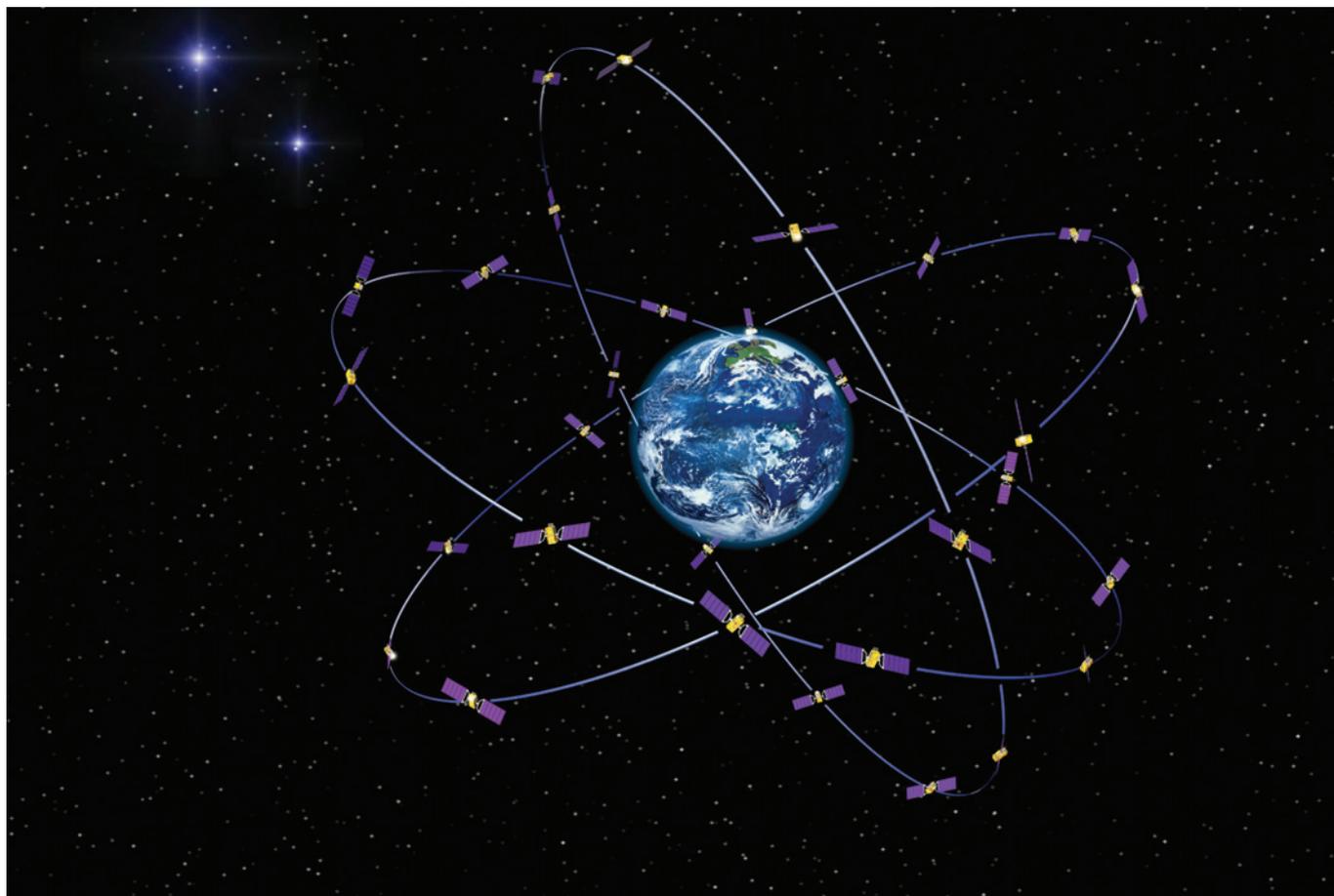


Figure 2 : La constellation GALILEO comporte 30 satellites répartis dans 3 plans orbitaux de même inclinaison par rapport à l'équateur. Ces plans sont complètement orientés dans l'espace par la donnée d'un second angle appelé longitude du nœud ascendant.

(Doc ESA)

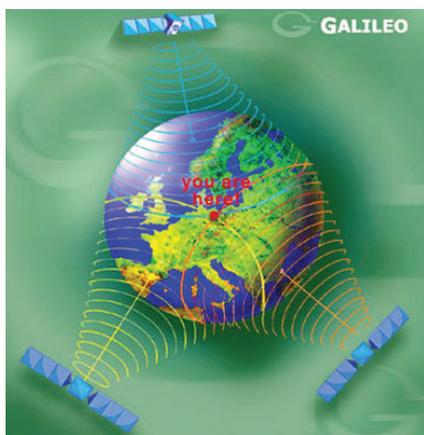
jusqu'au sol des signaux radioélectriques émis par les satellites.

Le positionnement par satellite

Les satellites de navigation émettent des signaux radioélectriques. Ce sont ces signaux qui sont captés par des récepteurs qui calculent ensuite la position où ils sont placés à un instant donné: les systèmes GPS et GALILEO sont dits "descendants" car c'est au sol qu'est effectivement réalisé le positionnement. Un des avantages majeurs d'un tel mode de fonctionnement est le nombre illimité de récepteurs potentiellement utilisables: de ce point de vue, les systèmes GPS et GALILEO ne peuvent jamais être saturés.

Le positionnement par satellite consiste à repérer la position d'un point situé à l'intérieur de l'espace délimité par les satellites formant la constellation. Ce point peut être situé à la surface de la terre solide (terres émergées), à la surface des océans, ou dans l'espace (jusqu'à quelques centaines ou milliers de kilomètres d'altitude).

Le récepteur reçoit essentiellement deux types d'informations en provenance d'un satellite donné: la position du satellite à la date d'émission du signal, ainsi que cette date. Connaissant la vitesse de propagation de l'onde¹, le récepteur peut alors calculer la distance qui le sépare du satellite puisqu'il a



(Doc ESA)

Figure 3 : Trois satellites sont nécessaires pour assurer le positionnement unique d'un point donné, abstraction faite des erreurs commises par les horloges.

daté, grâce à son horloge interne, l'instant de réception du signal en provenance de ce satellite: le point que le récepteur cherche à positionner se situe alors à la surface de la sphère définie par tous les points situés à égale distance du satellite. De plus, si le récepteur peut capter simultanément les signaux émis par trois satellites différents, l'ambiguïté sur le positionnement peut être levée, le point à positionner étant alors situé à l'intersection de trois sphères distinctes.

D'un point de vue théorique, il faut donc que le récepteur puisse capter les signaux émis par trois satellites différents pour pouvoir calculer sa position: la répartition de tous les satellites de la constellation dans l'espace est organisée de telle sorte que ce soit toujours le cas. En pratique, il vaut même mieux que davantage de satellites (au moins quatre ou cinq) soient en visibilité d'un même récepteur, pour assurer une redondance des informations et donc une meilleure précision de la localisation². Dans ce cas, en effet, le calcul est moins sensible aux éventuelles erreurs commises par l'ensemble du système (position des satellites, datation, ...).

On le voit de suite, la précision du positionnement dépend pour beaucoup de la synchronisation des horloges embarquées sur satellites mais aussi de celles disponibles sur les récepteurs. Une erreur de mesure de l'intervalle de temps qui sépare l'instant d'émission du signal émis par le satellite et l'instant de réception par le récepteur d'une picoseconde (10-12 s) par exemple correspond, pour un signal qui se propage à la vitesse de la lumière, à une distance de 3 mm. Seules les horloges atomiques les plus précises, et donc aussi les plus onéreuses, peuvent atteindre une telle qualité de synchronisation et de précision. Puisque le point le plus critique est la synchronisation des horloges entre elles, la bonne méthode pour travailler consiste à faire capter les signaux émis non pas par au moins 3

- (1) la vitesse de la lumière.
- (2) et/ou pour pallier à des difficultés propres à l'environnement dans lequel est placé le récepteur, par exemple si, en milieu urbain, un immeuble se situe dans la direction récepteur-satellite.



Figure 4 : Une horloge à rubidium.

mais bien par au moins 4 satellites. Cela permet alors d'estimer avec grande précision la synchronisation de l'horloge du récepteur par rapport à l'ensemble de toutes les horloges en orbite.

Un fonctionnement en temps réel, en mode absolu ou différentiel

Les modes de fonctionnement des systèmes GPS et GALILEO sont proches. Les performances sont également proches, même si celles de GALILEO sont annoncées meilleures que GPS. Aujourd'hui, un observateur au sol muni d'un récepteur GPS peut connaître en temps réel sa position (dans les trois dimensions d'espace), sa vitesse de déplacement et son heure locale avec une précision qui dépend très fortement de la qualité du récepteur et des conditions de son utilisation. Typiquement et de manière standard, la précision du positionnement peut être de niveau métrique et la synchronisation meilleure que la dizaine de nanosecondes.

Chaque satellite GPS est équipé de trois horloges atomiques au césium. Les premiers satellites GALILEO seront, eux, équipés de deux masers à hydrogène et de deux horloges à rubidium. L'Europe ne maîtrise malheureusement pas encore la technologie des horloges à césium embarquables à bord des satellites, horloges qui sont les horloges de référence pour construire l'échelle de base du Temps Atomique International. De gros efforts techniques sont encore nécessaires pour résoudre cet aspect du projet GALILEO qui apparaît comme étant pour l'instant un point critique.

Le principe que l'on vient de décrire est

■ ■ ■ un principe de positionnement absolu : la position du récepteur est calculée uniquement à partir des signaux émis par les satellites de la constellation. Aujourd'hui, les deux principales sources d'erreur du positionnement sont essentiellement liées à la qualité des éphémérides des satellites transmises en temps réel et à la modélisation non parfaite de la traversée des couches atmosphériques par les ondes radioélectriques qui ne se propagent pas en ligne droite et qui sont retardées : l'atmosphère, à la structure complexe, est à l'origine de biais en temps introduits dans les signaux captés par les récepteurs, biais qu'il est impossible de modéliser parfaitement.

Une des solutions consiste à répéter les messages sur plusieurs fréquences si l'on veut s'affranchir, au moins en partie, de ces distorsions. L'attribution des fréquences fait donc l'objet de négociations difficiles entre américains et européens, même si la coordination d'au moins cinq bandes de fréquences pour la radio-navigation spatiale en bande L (1,1-1,3 GHz et 1,5-1,6 GHz) est en très bonne voie. Les satellites GPS émettent en effet pour l'instant leurs signaux dans deux bandes différentes (1,2 et 1,5 GHz), et la nouvelle génération de

ces satellites, qui sera lancée à partir de 2005, émettra dans trois bandes de fréquences. Les satellites de la constellation GALILEO seront aussi tri-bandes ; les tous premiers devraient être lancés en 2005, en attendant le début opérationnel de la constellation des 30 satellites annoncé pour la fin 2008. Le système GPS étudie aussi des nouveaux satellites de troisième génération.

Il existe un autre mode de fonctionnement, qui consiste à repérer la position d'un récepteur par rapport à un point dont on connaît la position très exacte (par toutes sortes de moyens par exemple à partir de la technique laser ou par assimilation de données GPS sur des grandes périodes de temps) : c'est le positionnement différentiel. Le récepteur capte dans ce cas non seulement les signaux émis par les satellites de la constellation, mais également un signal spécifique émis par ce point de référence, qui diffuse l'écart (qui n'est pas nul puisque des sources d'erreur existent) entre sa position qu'il mesure en temps réel et sa position de référence. En pratique, il y a plusieurs façons de diffuser cette information, par exemple à l'aide de satellites géostationnaires ou par des émetteurs situés sur des phares, ou même par Internet. Ce sont des

récepteurs spécifiques qui doivent alors être utilisés, et qui trouvent des applications dans nombre de domaines, comme la navigation maritime à proximité des côtes : les marins ont été les premiers à utiliser de tels systèmes.

Les mesures de phase et les services internationaux

La structure des signaux émis par les satellites contient en réalité un très grand nombre d'informations codées. En particulier, les ondes radioélectriques sont émises sous forme de sinusoïdes (appelées porteuses) caractérisées par des amplitudes et des phases. Le positionnement le plus précis, utilisé quasi-exclusivement à des fins scientifiques, est plus complexe que la "triangulation spatiale" (ou trilatération) que nous avons présentée : il s'appuie en fait sur la mesure des phases des porteuses, et peut atteindre la précision la plus ultime qui peut être de niveau millimétrique, dès lors que la longueur d'onde de la porteuse utilisée est de l'ordre de 20 centimètres, ce qui est le cas. L'importance de cette mesure est tellement grande dans toutes les applications les plus exigeantes en matière de précision qu'il faut en dire un mot et en

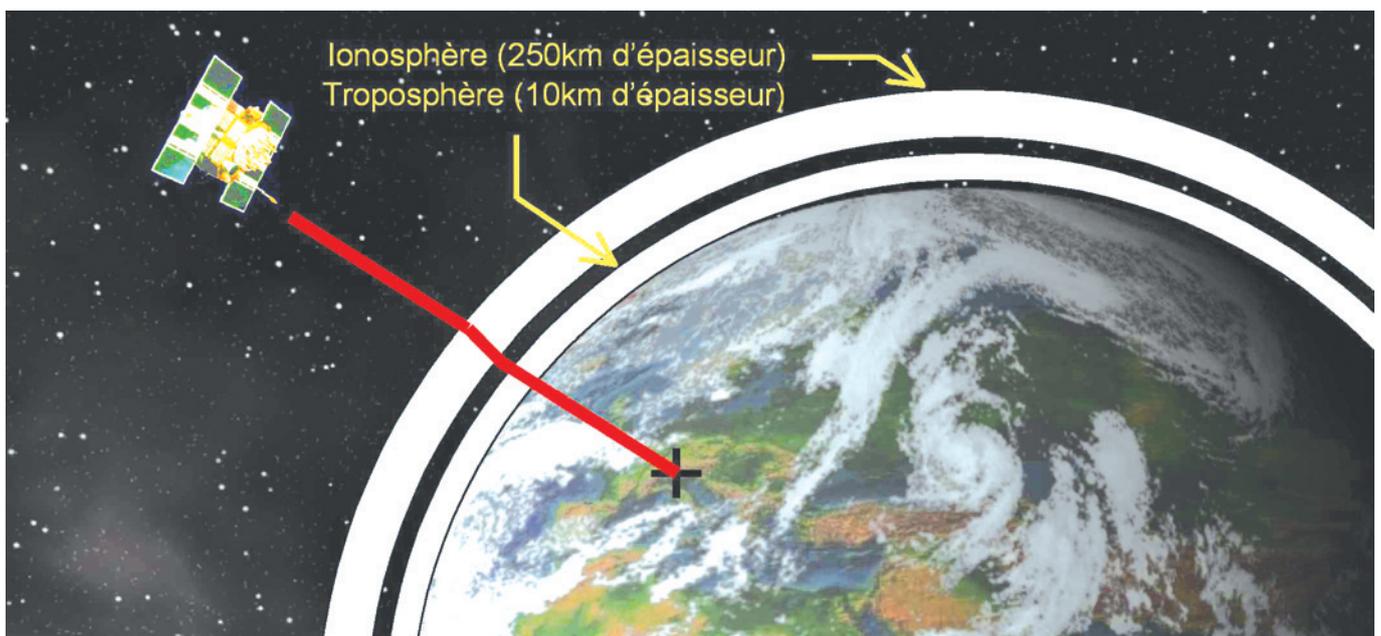


Figure 5 : La traversée de certaines zones de l'atmosphère terrestre perturbe la propagation rectiligne des ondes radioélectriques émises par les satellites, ce qui est source d'erreurs importantes si ces perturbations dans l'ionosphère puis la troposphère ne sont pas corrigées, au moins en partie. Il s'agit essentiellement d'un retard dans les temps de propagation.

donner le principe par ailleurs très simple.

La distance satellite-récepteur correspond à un nombre entier de longueurs d'onde de la porteuse, a priori inconnu, auquel il faut ajouter la distance correspondant à la mesure de phase proprement dite. En suivant la mesure de phase, on peut donc suivre les variations de distance satellite-récepteur avec une précision millimétrique, pourvu que la continuité de réception des signaux soit assurée. Cette information est suffisamment riche pour que l'analyse simultanée des mesures de phase sur plusieurs satellites, jointes le cas échéant à des mesures des signaux codés, permette de réaliser la détermination très précise des trajectoires. Cela est effectivement réalisé dans des centres internationaux comme le JPL (Jet Propulsion Laboratory) à Pasadena, Ca., ou au CODE (Center for Orbit Determination in Europe), à Berne.

Une description plus poussée de cette procédure sortirait du cadre de ce texte, mais il faut vraiment souligner l'efficacité avec laquelle les utilisateurs scientifiques de GPS ont su s'organiser pour échanger et combiner leurs données; cette coopération a été exemplaire et remarquable et a donné naissance à l'International GPS Service (IGS). Des centres de collectes des données ont été développés (citons celui de l'IGN en France) et coopèrent entre eux, notamment dans le cadre de l'IERS (International Earth Rotation Service) qui définit les protocoles d'utilisation, de combinaison et d'échange des données de géodésie spatiale.

Il est d'ores et déjà prévu que les données du futur système GALILEO soient utilisées et exploitées dans le cadre de ces services internationaux, constituant là une nouvelle pierre angulaire dans l'édification d'un système mondial unifié de navigation par satellite (projet GNSS: Global Navigation Satellite System).

GALILEO, un système civil et pérenne

Une autre spécificité capitale du système GALILEO est son caractère civil. Le projet est né de la volonté d'indé-

pendance de l'Europe en matière de positionnement par satellite, face à l'actuel système GPS, pleinement opérationnel depuis 1992. Mais le système GPS est un système aux mains des militaires, même s'il est largement utilisé de par le monde à des fins civiles: en cas de grave crise internationale, la précision du système pourrait être grandement dégradée (par des techniques qui sont ici hors de propos), compromettant alors la plupart des applications, civiles ou scientifiques.

Le système GALILEO, à l'inverse, est un système civil. Même si les aspects de stratégie et de défense ne peuvent être ignorés, un tel fonctionnement doit par définition s'inscrire dans la durée et la continuité sans aucune interruption: le système GALILEO est un système pérenne, et toutes les applications peuvent dès leur conception être prévues sur le très long terme.

La gestion du système a été confiée à une structure européenne nouvelle et originale, la "Joint Undertaking", en charge de l'organisation du fonctionnement et du financement. Cette structure a été mise en place conjointement par l'Agence Spatiale Européenne et la Commission Européenne, qui ne regroupent pas forcément les mêmes états (la Suisse par exemple fait partie de l'ESA, mais pas de l'UE). Elle est destinée à mettre en œuvre et à gérer les différents aspects du programme GALILEO: aspects politiques, financiers, industriels.

Pour assurer le déploiement de la constellation, le financement est prévu dans la prochaine programmation du budget de l'Union. Il tiendra compte d'une contribution financière du secteur privé. Le budget total des phases de développement et déploiement est estimé à 3,3 milliards d'euros. Pour l'instant, seuls 4 des 30 satellites sont financés (développement, construction et lancement pour 1,1 milliard d'euros, ainsi qu'une partie du segment sol). Pour le déploiement complet de la constellation, 2,2 milliards d'euros sont donc encore à trouver notamment dans le secteur privé. Mais tout est en train d'évoluer positivement très vite dans ce domaine.

Les applications civiles

de GALILEO

Le secteur privé devrait générer avec GALILEO un chiffre d'affaires très important, en proposant des applications nouvelles, dont certaines payantes. En particulier, on doit citer celles qui sont fondées sur des synergies des systèmes de positionnement, navigation et télécommunications, qui devraient jouer un rôle très important dans des domaines aussi variés que, pour reprendre la liste dressée sur le site Web de l'ESA: transports, énergie, personnes handicapées, routes, télécommunications, protection civile, rail, finance, assurance, référence de temps, aviation, construction et travaux publics, science, transport en commun, agriculture, loisirs, transports maritimes, pêche, sécurité, environnement, projets pilotes, ... De la même manière que personne ne peut désormais plus se passer de connaître l'heure, personne ne pourra bientôt plus se passer de savoir la position exacte de l'endroit où il se trouve, grâce par exemple au moyen de récepteurs intégrés aux téléphones portables. Ceci n'est d'ailleurs pas sans poser un certain nombre de questions, parmi lesquelles certaines d'ordre philosophique notamment sur le respect des libertés individuelles, mais il s'agit là d'un tout autre débat.

Notons maintenant que la distinction entre les deux notions que sont la précision et l'exactitude est extrêmement importante en métrologie, puisque l'on peut très bien positionner un point avec une précision optimale tout en commettant des erreurs systématiques très grandes. Avec le fonctionnement en mode différentiel, l'exactitude peut être améliorée de plus d'un ordre de grandeur par rapport au mode absolu.

Citons ici un des exemples qui illustrent la nécessité impérative de doubler le système GPS. C'est de ce point de vue que GPS et GALILEO sont indissociables et complémentaires. Dans ce cadre, les futurs récepteurs intégreront les signaux émis par chacun des deux systèmes GPS et Galileo, assurant dans le même temps une meilleure exactitude des positions, en particulier sur la composante verticale (l'altitude). Dans le transport aérien par exemple, l'intégrité du seul système GPS n'est pas suf-

■ ■ ■ fiquement sûre pour faire atterrir les avions en mode complètement automatique. À l'heure actuelle, les avions, munis uniquement du système GPS, ne peuvent pas détecter assez rapidement des erreurs systématiques toujours possibles de quelques mètres. Pour promouvoir la navigation aérienne avec ces systèmes satellite, en particulier pour s'affranchir définitivement des aléas météorologiques, le système doit être sûr à 100 %. Avec GALILEO, i.e. avec au moins deux systèmes satellites indépendants, c'est un objectif réalisable à l'échelle de quelques dizaines d'années, voire moins.

Les applications scientifiques de GALILEO

Les applications scientifiques de GALILEO sont elles aussi légions comme c'est déjà le cas avec GPS. Au-delà de toutes les possibilités liées à la connaissance des positions de récepteurs, qui peuvent être variables dans le temps (déplacements d'animaux par exemple), les applications de GALILEO en géodésie spatiale, et plus largement en astronomie fondamentale, sont regroupées en quelques grandes catégories: la construction de systèmes de référence d'espace dans l'environnement terrestre, l'exploitation de la quatrième dimension (le temps) pour la construction et l'exploitation d'échelles de temps internationales, l'étude des déformations de la Terre à des échelles locales et régionales, l'étude de l'atmosphère, et l'orbitographie de satellites de basses altitudes, particulièrement importante pour certaines applications en Sciences de la Terre.

Pour chacune de ces catégories, ce n'est plus un positionnement en temps réel qui est utilisé, mais un positionnement basé sur l'assimilation d'un grand nombre de mesures quasi-simultanées. Une telle approche permet d'accroître encore la précision et l'exactitude: dans beaucoup de cas, elles augmentent avec la racine carrée du nombre de mesures, pourvu que la position puisse être considérée fixe dans un intervalle de temps donné.

Un dénominateur commun à ces applications scientifiques est l'étude spécifique des interactions à développer entre



Figure 6 : Toute une gamme de récepteurs pour toute une gamme d'applications.

les différentes techniques de géodésie spatiale, en particulier avec le système GPS et la télémétrie laser, voire le système DORIS, évoqué ci-après. Non seulement cela permettra à chaque technique de recentrer ses efforts sur ses domaines d'excellence, mais surtout, la redondance des systèmes assurera une bien plus grande exactitude des calculs menés dans les différents thèmes de la géodésie spatiale, et donc une bien plus grande fiabilité. Pour l'instant, les possibilités d'étalonnage de l'ensemble des techniques sont réduites, ce qui laisse les scientifiques à la merci de certaines erreurs systématiques. Comme nous l'avons indiqué plus haut, une grande précision ne suffit plus en géodésie spatiale, il faut aussi une plus grande exactitude pour rendre compte dans les différents produits (champ de gravité, repères de référence, ...) de la qualité des mesures désormais prodigieuse.

En résumé, tout ce qui se fait aujourd'hui avec GPS sera désormais fait dans la nouvelle synergie GPS/GALILEO, mais en mieux, plus rapidement, avec une garantie supérieure de qualité et de pérennité et avec des nouveaux services et des nouvelles possibilités. Il faut également noter la force du mode différentiel qui se développera pour certaines applications ultra précises de positionnement en temps réel, comme la topographie des océans, les mouvements d'origine sismique ou volcanique.

On peut distinguer deux grandes catégories d'applications scientifiques: d'une part celles fondées sur des récep-

teurs fixés au sol, d'autre part celles fondées sur des récepteurs embarqués à bord de satellites bas.

Utiliser GALILEO pour le positionnement

Les récepteurs placés au sol de manière permanente sont en général fixés sur des piliers de béton. Ils assurent le suivi des variations temporelles de la position de leurs points de rattachement.

Divers phénomènes, caractérisés par des périodes qui leur sont propres, sont à l'origine de ces variations: le spectre des périodes ou des fréquences est très large. À l'échelle de quelques heures, on retrouve les phénomènes d'origine atmosphérique (variations de pression), qui modifient la composante verticale du positionnement de quelques millimètres. À l'échelle de la journée, ce sont les marées terrestres, d'une amplitude de quelques dizaines de centimètres dans les séries de positionnement. À l'échelle de quelques mois voire de quelques années, ce sont les phénomènes d'origine tectonique qui sont mis en évidence, pouvant atteindre dans des cas extrêmes le décimètre: le déplacement des plaques tectoniques se traduit par des variations séculaires de la latitude et longitude, les séismes se traduisant par des ruptures de la continuité de ces séries.

Les récepteurs fixés au sol sont organisés en véritables réseaux, lorsqu'ils sont suffisamment nombreux et répartis de manière homogène dans une région du globe donnée. En France par



Figure 7 : Le récepteur GPS permanent de l'Observatoire de la Côte d'Azur, sur le plateau de Calern (France).

exemple, quelques dizaines de récepteurs répartis sur tout le territoire constituent le RGF (Réseau GPS Français). Ces réseaux contribuent à la définition et à la construction du repère international terrestre de référence. Des réseaux plus "locaux", qui sont aussi plus denses, sont aussi utilisés pour étudier les déformations de régions soumises à des contraintes géophysiques fortes. En France, le réseau REGAL permet d'étudier l'évolution géodynamique des Alpes; et c'est au Japon et en Californie, que l'on trouve les réseaux GPS les plus denses au monde, en raison des nombreux séismes présents dans ces régions, et que les géophysiciens cherchent à modéliser et peut-être un jour à prévoir. Une autre application de ces réseaux denses est l'étude de la structure de l'atmosphère à travers la réalisation de tomographies en trois dimensions: puisque les signaux émis par les satellites ont un trajet modifié par l'ionosphère et la troposphère, la propagation des signaux GPS/GALILEO constituent, avec des réseaux denses, des mesures indirectes de ces couches de l'atmosphère.

Utiliser GALILEO pour reconstruire la dynamique des mouvements autour de la Terre

Un autre grand domaine d'applications de la navigation par satellites est celui de la dynamique orbitale des satellites artificiels en orbite autour de la Terre: la quasi-totalité des nouvelles missions spatiales placées sur des orbites basses (citons les missions de géodésie, CHAMP, GRACE, JASON-1), emportent désormais à leur bord des récepteurs GPS de haute précision, en attendant les futurs récepteurs mixtes GPS/GALILEO. Ils permettent de connaître la position du centre de masse du satellite, ainsi que son orientation dans les trois dimensions d'espace, avec une très grande exactitude³.

Construire une orbite consiste à relier les positions et les vitesses telles qu'elles sont prédites par les modèles d'orbite aux positions et vitesses qui

(3) c'est ce qu'on appelle aussi la restitution d'attitude d'un satellite.

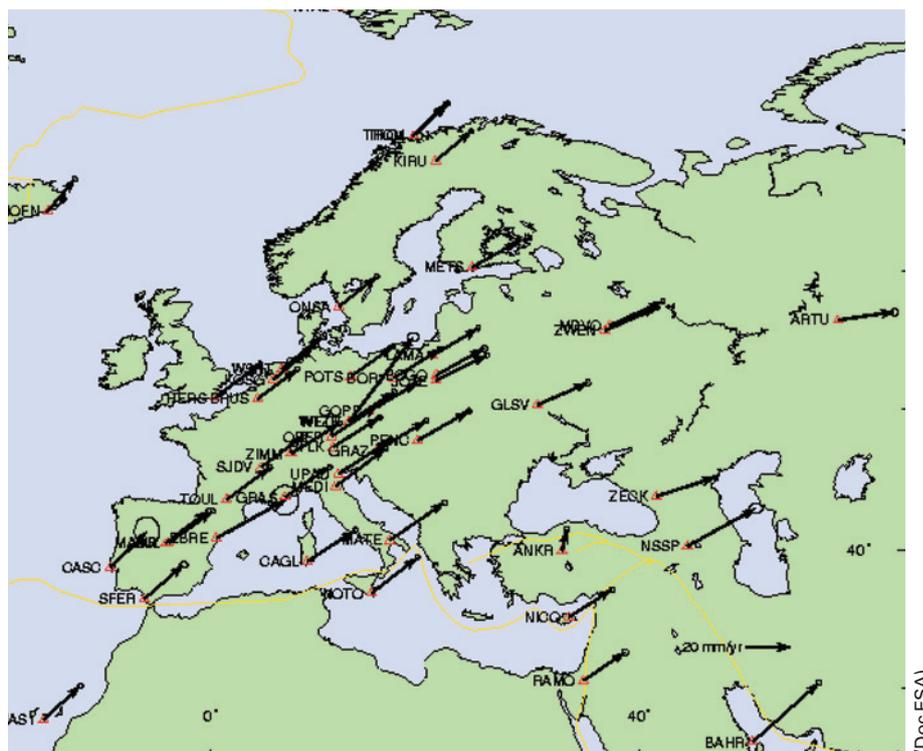


Figure 8 : Les déplacements de la plaque eurasienne, tels qu'ils sont reconstruits grâce aux différentes techniques de géodésie spatiale.

sont effectivement observées au cours du temps. La qualité d'une orbite dépend non seulement de la qualité des mesures, mais également de la qualité du modèle d'orbite. Un modèle d'orbite est défini par le modèle des forces qui perturbent le mouvement du satellite (champ de gravité terrestre, influence de la Lune et du Soleil, freinage atmosphérique, pression de radiation solaire, effets relativistes, etc...), ainsi que la valeur des paramètres qui caractérisent ce modèle: les études de dynamique spatiale permettent, grâce à des méthodes dites de perturbations, de mieux connaître l'environnement dans lequel sont placés les satellites grâce à la détermination simultanée de ces paramètres géodynamiques et d'autres paramètres propres à l'orbite.

Les systèmes GPS et GALILEO vont ainsi renforcer l'arsenal des techniques de géodésie spatiale qui ont toutes leurs avantages et leurs défauts. Un exemple manifeste est celui des nouvelles missions spatiales d'étude de la Terre qui sont lancées sur des orbites de faibles altitudes (quelques centaines de kilomètres). Ces orbites offrent une bien plus grande sensibilité au champ de gravité que celles d'altitude plus éle-

vées sur lesquelles sont placés des satellites passifs comme LAGEOS-1 ou STELLA, complètement recouverts de réflecteurs laser, et qui conservent des applications spécifiques. À ces altitudes basses, le positionnement par GPS et/ou GALILEO constitue de très loin le meilleur moyen de disposer d'observations "par le haut" de la position d'un satellite comme CHAMP par exemple (lancé en 2000), dédié à la construction de modèles de champ de gravité et de champ magnétique: c'est le principe SST-hl (pour Satellite to Satellite Tracking - high low). Autre exemple: la nouvelle mission GRACE, lancée en 2002, exploite, en plus, la variation de la distance entre les deux satellites qui la composent et qui sont placés sur la même orbite, pour la construction de modèles de champ de gravité incluant la détermination de composantes variables dans le temps.

Chaque satellite de cette mission est équipé de récepteurs GPS, et d'un lien spécial qui mesure exactement la distance inter-satellite. Ces différentes mesures contribuent à la construction mathématique de la trajectoire des deux satellites, reposant sur le principe dit SST-II (pour Satellite to Satellite

Tracking- low low).

Les systèmes de radionavigation apportent ainsi des mesures d'une nature nouvelle en géodésie spatiale. En permettant de positionner les satellites artificiels dans les trois dimensions d'espace, les systèmes de radionavigation apparaissent de plus en plus comme indispensables pour la construction des trajectoires des véhicules spatiaux en orbite autour de la Terre, et ont d'ores et déjà permis un saut irréversible dans l'exactitude de ces trajectoires.

GALILEO et les échelles de temps

Parallèlement à la construction des trajectoires figure un autre domaine d'applications sous-jacent aux études de dynamique orbitale, celui de la construction et de la diffusion d'échelles de temps internationales. Leurs exploitations concernent aussi bien la vie quotidienne - les applications tant civiles que scientifiques -, et en particulier le domaine de la

physique fondamentale (expériences de transferts de temps, calcul de certains paramètres relativistes...).

Historiquement, les échelles de temps utilisées pour construire les orbites des satellites artificiels sont des échelles où le temps est supposé s'écouler de manière uniforme. Dans ce cadre, les effets relativistes ont longtemps été considérés comme de "simples" corrections à prendre en compte dans le mouvement. Aujourd'hui, grâce aux progrès constants de l'exactitude et de la précision des différents types de mesure acquises en géodésie spatiale, l'ensemble des équations du mouvement du satellite artificiel devrait (et devra) être réécrit dans le cadre de la relativité générale, même si certaines hypothèses simplificatrices sont encore complètement justifiées. L'évolution majeure dans ce domaine sera l'utilisation de nouvelles échelles de temps de plus en plus exactes conçues dans un cadre relativiste.

GALILEO, une technique de géodésie spatiale parmi d'autres

Les différents exemples mentionnés ci-dessus ont pour but de convaincre le lecteur que l'arrivée programmée du système GALILEO est une réponse à bien des enjeux qui sont loin d'être seulement et purement d'ordre économique ou politique. Sur le plan scientifique, de plus, l'objectif n'est pas seulement de faire en mieux ce que fait déjà le GPS. À terme, il s'agit effectivement d'intégrer chaque technique de géodésie spatiale dans le cadre d'un réseau utilisant, combinant, et exploitant, les avantages de chaque technique. Non seulement une telle approche permettra de décorrélérer certains des paramètres calculés en géodésie spatiale, mais en outre et surtout, l'utilisation combinée d'au moins deux systèmes indépendants de radionavigation (GPS et GALILEO) permettra de détecter certaines erreurs systématiques pour l'instant indétectables. Pour le positionne-

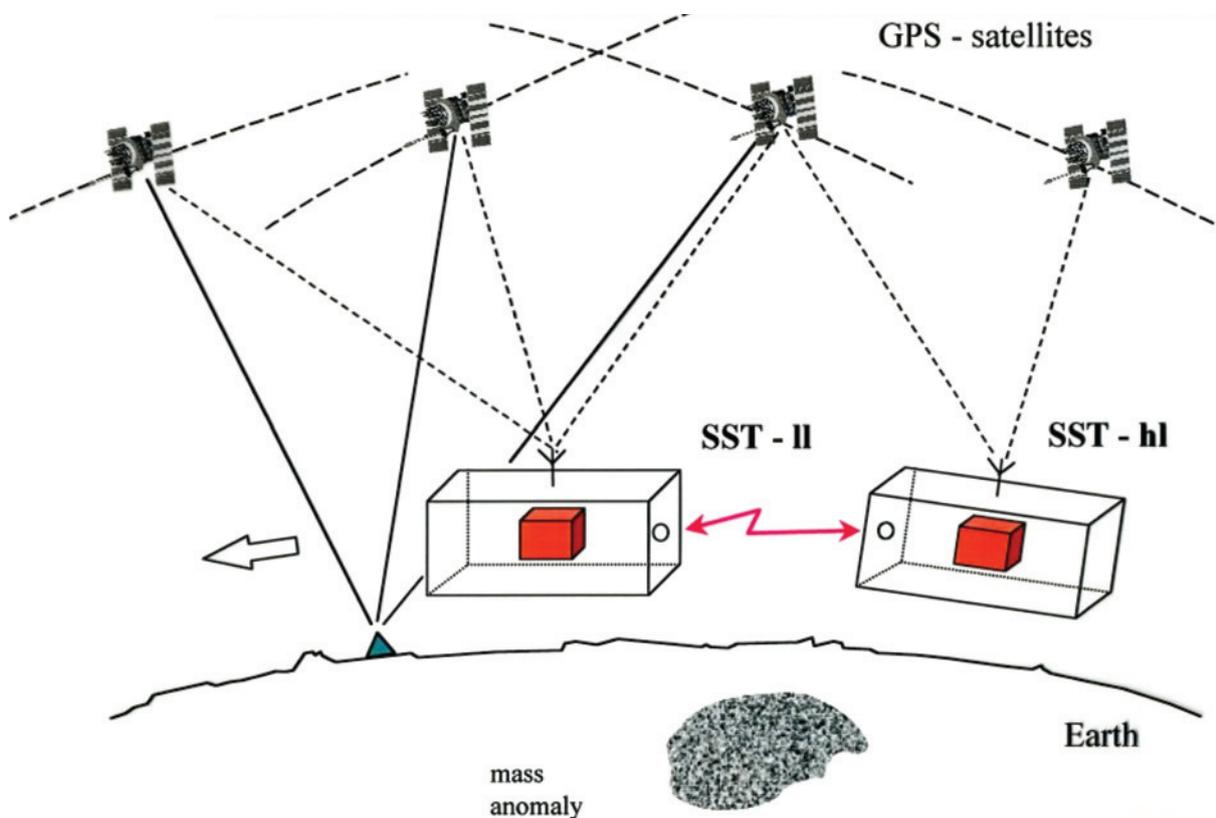


Figure 9 : Les deux satellites de la mission GRACE emportent à leur bord des récepteurs qui les positionnent par rapport aux satellites hauts. Ils ont une altitude basse de manière à avoir une grande sensibilité aux anomalies de masse présentes à la surface ou à l'intérieur de la Terre. C'est également sur l'évolution de la distance inter-satellite qu'est basée la construction de nouveaux modèles de champ de gravité .

(Doc. GRGS)

ment en temps réel, le gain sera appréciable. Pour les produits scientifiques, l'exactitude des paramètres sera également améliorée: cela permettra notamment de quantifier plus précisément, après analyse des perturbations des satellites artificiels, les transferts de masse entre les différentes composantes de notre planète (terre solide, océans, glaces, atmosphère). La géodésie spatiale permettra ainsi d'encore mieux contraindre certains modèles d'évolution de la géophysique.

Plus généralement, c'est un étalonnage global des différentes techniques de géodésie spatiale qui sera possible avec GALILEO. En particulier si des récepteurs GPS sont placés à bord des satellites GALILEO et inversement, ou si des réflecteurs laser sont disposés sur les satellites GALILEO, comme c'est déjà le cas pour certains satellites GPS.

Plusieurs types de mesures permettent de calculer les orbites de satellites artificiels. D'un point de vue historique, après les mesures par méthodes photographiques, les mesures de l'effet Doppler sur les signaux radio-électriques émis ont permis la construction mathématique de l'orbite des satellites artificiels à partir de la mesure de leurs vitesses radiales. Il a été possible d'en déduire les grandes caractéristiques (ou longueurs d'onde spatiales) du champ de gravité terrestre. L'effet Doppler est encore largement utilisé aujourd'hui avec le système français DORIS, embarqué à bord de plusieurs satellites parmi lesquels certains dédiés à l'océanographie spatiale. Historiquement aussi, l'essor de la télémétrie laser sur satellite (SLR: Satellite Laser Ranging) ou sur la Lune (LLR: Lunar Laser Ranging), qui permet de mesurer la distance entre les satellites équipés de réflecteurs et une vingtaine de stations au sol réparties de par le monde, a permis à la géodésie spatiale de multiplier le nombre et la qualité des produits qu'elle a pu fournir à la communauté scientifique. Citons en particulier la connaissance détaillée des premiers coefficients du champ de gravité terrestre avec leurs variations temporelles. Citons aussi la masse de la Terre⁴, connue aujourd'hui avec dix chiffres significatifs, qui contribue à

Tableau 1 : Contributions respectives des différentes techniques à la construction des produits de géodésie spatiale.

| PRODUITS | LLR | VLBI | SLR | GPS GALILEO | DORIS | SST-II |
|---|-----|------|-----|----------------|-------|--------|
| Repère extragalactique | | *** | | | | |
| Rattachement au système solaire | *** | * | | | | |
| Rattachement à la Terre | | | | | | |
| Précession-Nutation | ** | *** | * | * | | |
| Temps Universel | * | *** | | | | |
| Rotation de la Terre | | | | | | |
| Longueur du jour | | *** | * | ** | | |
| Mouvement du pôle | | *** | ** | *** | * | |
| Repère terrestre | | | | | | |
| Homogénéité de la couverture mondiale | | * | * | ** | *** | |
| Centre de masse (GM) | | | *** | * | * | |
| Centre de figure | | ** | | | | |
| Mouvement des plaques tectoniques | | *** | ** | *** | *** | |
| Densification | | | * | *** | ** | |
| Orbitographie des satellites hauts | | | | | | |
| Type : GPS/GALILEO | | | * | *** | | |
| Type LAGEOS, ETALON | | | *** | | | |
| Orbitographie des satellites bas | | | | | | |
| Type : TOPEX/Poséïdon, JASON-1 | | | ** | *** | *** | |
| Type : ERS, ENVISAT | | | ** | *** | *** | |
| Type : CHAMP, GRACE | | | * | *** | | *** |
| Champ de gravité | | | | | | |
| Grandes longueurs d'onde | | | *** | ** | * | |
| Moyennes et courtes longueurs d'onde | | | ** | *** | * | |
| Variations temporelles | | | ** | * | | *** |

fixer l'échelle des systèmes géodésiques terrestres. L'interférométrie à très longue base, enfin, apporte également une autre contribution très importante et unique à la définition des repères de référence spatio-temporels et à l'orientation de notre planète dans l'espace, par l'observation au moyen de radiotélescopes de radiosources extra-galactiques.

L'avenir de la constellation

(4) à travers la constante géocentrique GM.

GALILEO

Chaque satellite de la constellation GALILEO est conçu pour avoir une durée de vie opérationnelle de l'ordre d'une quinzaine d'années. Le remplacement "par grappe" (plusieurs satellites seront placés en orbite simultanément par une même Ariane 5) est d'ores et déjà prévu, pour maintenir la pérennité de la configuration initiale de la constellation. Le problème est donc d'étudier la "désorbitation" des satellites arrivés en fin de vie, afin de savoir sur quel type d'orbites par-

king on peut les placer, avant que tout le carburant à bord ne soit épuisé. De telles études font appel à des méthodes et théories de mécanique céleste et spatiale, afin notamment d'étudier l'évolution naturelle (i.e. hors manœuvres) des trajectoires sur plusieurs dizaines voire certaines d'années.

Dans la gamme d'altitudes des orbites MEO (Medium Earth Orbits), comme celles de GALILEO et GPS, l'influence gravitationnelle de la Lune et du Soleil est très importante et a tendance, en particulier, à faire croître l'excentricité des orbites. Cela a pour effet, à terme, de faire couvrir aux orbites MEO un large spectre d'altitudes, parmi lesquelles celle de l'orbite géostationnaire (42000 km), ce qui n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes en raison du grand nombre de satellites actifs dans cette région de l'espace. De plus, l'altitude choisie fait de ces orbites des orbites qui sont fortement soumises à des effets de résonance: certaines perturbations dues au champ de gravité, habituellement négligeables, sont démultipliées. Ces orbites ont certes été choisies pour des raisons pratiques, mais les stratégies de maintien à poste (en phase opérationnelle) et de désorbitation doivent être soigneusement étudiées, en particulier pour assurer la stabilité de la constellation avec un minimum de carburant. Des études sont actuellement en cours notamment au CNES, ainsi qu'à l'ESA et à GEMINI Département de l'Observatoire de la Côte d'Azur.



(Doc. GRGS)

Figure 10 : La géodésie spatiale est une science multi-disciplinaire qui repose sur la construction mathématique du mouvement des satellites artificiels en orbite autour de la Terre.

Épilogue

Le fonctionnement global du système GALILEO reposera sur des moyens humains et technologiques importants. En particulier, le rôle du segment-sol est essentiel, car il permettra de détecter et de corriger certaines dérives des modèles d'orbites, donc des positions prévues, diffusées par les satellites de la constellation. Ces dérives, de l'ordre de quelques centimètres, sont dues principalement à l'influence de la Lune et du Soleil non parfaitement modélisée, ainsi qu'à certains effets non gravitationnels qu'il est impossible de modéliser parfaitement à toute époque et tout lieu, comme ceux dus à la pression de radiation solaire.

L'épopée GALILEO ne fait que commencer. Sur le plan européen, le projet GALILEO est d'ores et déjà à inscrire sur la liste de ceux qui ont fait le succès d'Airbus ou d'Arianespace: il s'agit là d'un projet fédérateur qui soutiendra et fera se développer l'industrie européenne de haute technologie, à la fois dans ses segments-sol et spatial. Ce projet donnera lieu à la mise en place de nouveaux services civils fondés sur le positionnement, la navigation, les moyens planétaires modernes de télécommunication, y compris des services de sauvetage.

Les applications principales ne concernent pas seulement les transports aérien, terrestre, maritime. Les applications scientifiques liées à l'utilisation du système GALILEO sont fondamentales. Un fonctionnement en mode "très haute exactitude" nécessite la participation d'équipes scientifiques intégrés au déroulement du programme GALILEO; des récepteurs mixtes GPS/GALILEO devront être développés. Il ne s'agit pas seulement de faire "plus vite et plus précis" que le GPS; il ne s'agit pas non plus seulement d'améliorer la précision globale du positionnement pour une meilleure exactitude, une meilleure fiabilité, pour une garantie de la continuité des services et une intégrité du système; il s'agit bien de définir les fondements d'une stratégie globale de radionavigation par satellite. Des applications fascinantes sont à attendre, avec des retombées dont la plupart sont encore à imaginer. L'interdépendance des systèmes de positionnement, pour les applications civiles ou

scientifiques, apparaîtra très rapidement indispensable et irréversible. ●

Références

- *Un système de positionnement GALILEO, un enjeu stratégique, scientifique technique*, rapport 2003, Académie de marine, Bureau des longitudes, Académie nationale de l'air et de l'espace
- *Le GPS amélioré* - Pour la Science N° 320 - juin 2004,
- De nombreuses informations sont disponibles sur les sites Web de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et de la Commission Européenne.

Contact

Florent Deleflie, François Barlier, Pierre Exertier
Observatoire de la Côte d'Azur, UMR GEMINI,
Av. N. Copernic, F-06130 Grasse
Florent.Deleflie@obs-azur.fr

ABSTRACT

Galileo is a new European program of satellite radio positioning and navigation. Since the US government has opened GPS to civil applications, officially up to 2005, many applications and developments started with GPS, the Global Positioning System. The success and the immense interest of these applications is such that these services could not now be interrupted without dramatic economic and scientific disadvantages. Only a civil service, and not a military system as it is now, can guarantee such applications on a very long-term basis with, for example, a reliability of 100% for air navigation control in real time. Therefore, Europe has decided to develop, on a cooperative basis, a lasting European undertaking of immense strategic importance with GPS and Glonass. With Galileo, the number of satellite will double and all the possible applications, described here, will be dramatically enhanced with a better precision and a better accuracy. For example, scientific researches have specific applications in many fields, related to the understanding of the Earth and the atmosphere, as well as the remarkable time distribution service around our planet. The merging of different space techniques including GPS and Galileo, but also other geodetic techniques such as Satellite Laser Ranging and DORIS, enables to obtain space and time data of unparalleled precision for science applications.