



HAL
open science

La navigation par satellites

Daniel Ochoa, Ilarion Pavel

► **To cite this version:**

Daniel Ochoa, Ilarion Pavel. La navigation par satellites. Sciences de l'Homme et Société. 1997.
hal-01908526

HAL Id: hal-01908526

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01908526>

Submitted on 30 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ÉCOLE DES MINES
DE PARIS
Corps Techniques de l'État

MÉMOIRE DE TROISIÈME ANNÉE

LA NAVIGATION PAR SATELLITES

BIBLIOTHÈQUE
DE L'ÉCOLE DES MINES
60, boulevard St-Michel
75272 PARIS CEDEX 06
Téléphone : 40 51 90 56

IE 1 [363]

Daniel OCHOA
Ilarion PAVEL

1997

SOMMAIRE

INTRODUCTION

LA NAVIGATION PAR SATELLITE : GÉNÉRALITÉS

- Systèmes classiques de navigation
- Principe de fonctionnement du GPS
- Historique du GPS
- Description technique du GPS
- Evolution du GPS
- Glonass

SYSTEMES DE COMPLEMENTS LOCAUX ET REGIONAUX

- Insuffisance du GPS
- Systèmes de compléments locaux
- Systèmes de compléments régionaux : EGNOS
- Le système GNSS1

UTILISATEURS ET MARCHÉ POTENTIEL

- Catégories d'utilisateurs civils
 - Navigation aérienne
 - Navigation maritime et fluviale
 - Chemins de fer
 - Navigation des automobiles et camions
 - Applications industrielles et scientifiques
 - Loisirs et télécommunications
 - Autres applications
- Marché des utilisateurs et services

ASPECTS POLITIQUES ET INSTITUTIONNELS

- États-Unis
- Russie
- Europe
- Problèmes juridiques et institutionnels
- Aspects militaires

GNSS2 : OPTIONS DE RÉALISATION

- Pourquoi GNSS2 ?

- Option 1 : Utilisation de Glonass
- Option 2 : Systèmes de satellites dédiés
 - Comment diminuer les coûts de GNSS2 ?
 - Microsatellites ou constellation télécom : financement et validité
- Option 3 : Utilisation d'une constellation Télécom
 - Réalisation technique
 - Satellites LEO
 - Satellites MEO

CONCLUSION

ANNEXE :

Liste de personnes contactées

INTRODUCTION

L'objet de ce mémoire est de faire le point sur la situation actuelle de la navigation par satellite et d'envisager son avenir. Nous avons discuté avec des personnes de divers organismes (CNES, ESA, STNA, Armée de l'Air, Alcatel, Matra Marconi Space, Thomson, Commission Européenne) dont la liste se trouve en annexe. Les avis sont parfois très différents et nous avons essayé de garder un point de vue neutre et général sur le sujet.

Actuellement le GPS (Global Positioning System) exerce un quasi-monopole sur le marché de la navigation par satellite. Cette dernière est cependant un élément essentiel de l'indépendance stratégique militaire et économique des pays. Le GPS étant sous contrôle exclusif du Department of Defense américain, l'Europe est inquiète. Elle voudrait qu'un système civil voie le jour. Son projet GNSS1 (Global Navigation Satellite System), qui sera réalisé pour répondre aux besoins de l'aviation civile, amorce l'étude d'un tel système mais reste insuffisant car dépendant du GPS. Sa succession, le projet GNSS2 devrait être un système totalement indépendant qui permettrait de satisfaire la plupart de ses utilisateurs. Le GNSS2 n'est pas encore bien défini et personne ne sait exactement comment il se réalisera ni qui sera prêt à le financer.

Après une introduction sur la navigation par satellite et sur ses deux systèmes actuels GPS et Glonass, nous développerons le projet EGNOS (partie européenne de GNSS1), ses raisons politiques et économiques, ses acteurs et son état d'avancement. Nous décrirons ensuite les différents utilisateurs de la navigation par satellites ainsi que leur marché réel et potentiel ce qui permettra d'évaluer l'importance économique des projets GNSS. Nous en arriverons finalement au projet GNSS2 dont la définition se heurte à quelques difficultés d'ordre politique, institutionnel et financier mais qui a une importance stratégique pour l'Europe. Dans la dernière partie nous envisagerons enfin les différents scénarios possibles de réalisation de ce projet et celui qui a notre préférence.

LA NAVIGATION PAR SATELLITE : GÉNÉRALITÉS

La navigation est le principe qui permet à tout utilisateur, sur Terre ou dans les airs, de connaître sa position et de pouvoir parvenir à destination. La navigation par satellite utilise principalement des signaux émis par des satellites alors que la navigation classique utilise des signaux provenant de repères au sol, essentiellement de radiobalises.

Systèmes classiques de navigation

La détermination de la position instantanée d'un mobile peut se faire de plusieurs façons :

- à l'estime : la position est calculée par intégration de la vitesse mesurée à partir d'un point de départ connu sans recourir à des repères extérieurs.
- observée : la position est estimée à partir de repères extérieurs.

La navigation à l'estime est peu précise car ses erreurs se cumulent. Elle nécessite donc de faire constamment le point à l'aide de moyens de navigation observée. Pour les avions volant de nuit ou dans les nuages, la vue du sol ou des astres n'étant pas toujours possible, la seule méthode de navigation par tous temps est la radionavigation. C'est une technique de navigation observée qui utilise des repères radioélectriques.

Les systèmes principaux de radionavigation sont les suivants :

Omega

C'est un système hyperbolique : il est basé sur la mesure de la différence de temps de propagation à partir de paires de stations synchronisées. Il utilise des ondes radio VLF et a une couverture mondiale (huit stations). Il a une très grande portée (>500 km) mais sa précision n'est que de 2 à 4 miles nautiques. Il est utilisé par la marine et l'aviation civile pour la phase en route.

Loran-C

C'est également un système hyperbolique. Avec 29 stations, il ne couvre qu'une partie du globe. Comme Omega, il a une grande portée. Sa précision est d'une centaine de mètres. Il est très utilisé dans l'aviation civile, surtout aux États Unis et est bien connu des marins dans l'Atlantique Nord.

VOR / DME

Ces systèmes sont locaux et utilisent des hautes fréquences.

Le DME (Distance Measuring Equipment) est un système circulaire de mesureur de distance : il est basé sur la mesure du temps de propagation entre le mobile et une station radioélectrique. Le VOR (Very High Frequency Omnidirectional Range) fait partie de la catégorie des radiophares omnidirectionnels. C'est un système angulaire : il fournit la direction de propagation des ondes reçues, mesurées soit par rapport à un axe de référence du mobile, soit par rapport à une direction de référence terrestre.

Ces deux systèmes sont surtout utilisés par l'aviation civile, à proximité des aéroports. Leur portée est de 200 miles nautiques et ils nécessitent une visibilité directe. Leur précision est de ± 90 m pour VOR et de ± 185 m pour DME.

Pratiquement tous les avions utilisent VOR. On compte 180000 utilisateurs VOR et 900000 utilisateurs DME aux États Unis. Ces systèmes sont cependant coûteux en maintenance.

ILS (Instrument Landing System)

Ce système est, comme VOR, un système angulaire. Il a une portée courte (<50 km) et utilise des fréquences élevées. Il est essentiellement utilisé pour les approches de précision des avions. Il peut fournir une précision verticale de 0,8 m pour la dernière phase d'atterrissage (Catégorie III). La majorité des stations ILS concerne cependant les approches de catégorie I avec une précision verticale de 6m. Un grand nombre d'aéroports sont aujourd'hui équipés d'ILS, à cause des conditions météorologiques souvent difficiles.

MLS (Microwave Landing System)

Ce système avait été conçu comme remplacement possible de l'ILS. Il permet d'éviter les problèmes propres à ce dernier, comme ceux liés à la rareté du spectre radio, aux interférences. MLS émet en SHF, est très coûteux, et a des performances supérieures à ILS. Il a été installé jusqu'à présent dans un petit nombre d'aéroports dans le monde. En Europe la plupart des stations MLS se trouvent en Angleterre. L'Europe ne compte pas étendre l'installation de stations MLS en remplacement des stations ILS, préférant attendre une banalisation de la navigation par satellite.

Tous ces systèmes de navigation classique ont chacun leur fonction propre et sont généralement locaux. Ils ne permettent pas de s'adapter de façon flexible à la plupart des utilisateurs et de couvrir les régions océaniques ou désertiques. La navigation par satellite apporte une réponse à ces problèmes. Un système de navigation par satellite peut être global, utiliser un standard unique et satisfaire à la demande de la plupart des utilisateurs.

Outre cet avantage évident de la navigation par satellite, les systèmes de navigation classique demandent des infrastructures au sol qui sont chères et difficiles à mettre en oeuvre. La

navigation par satellite ne demande aucune infrastructure au sol pour l'utilisateur qui se contente d'un simple récepteur, récepteur également plus simple d'utilisation qu'un récepteur de système classique. Ceci rend la navigation accessible à une plus large catégorie d'utilisateurs.

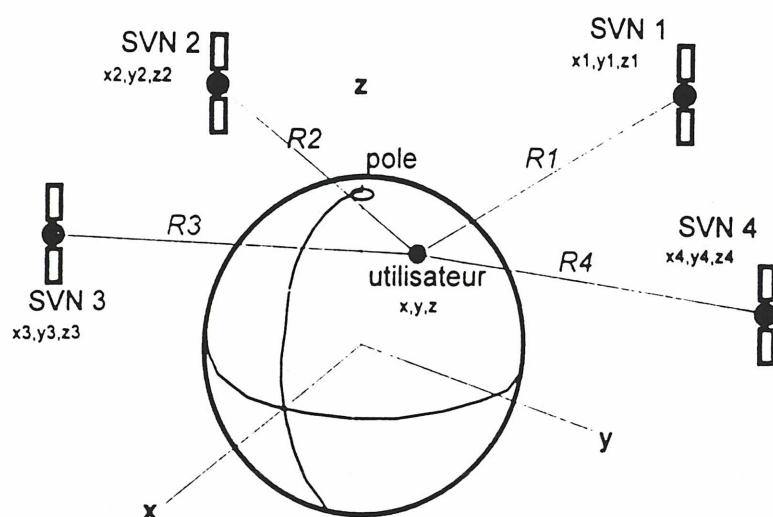
Actuellement, le service standard en matière de navigation par satellite est le GPS américain.

Principe de fonctionnement du GPS

Le GPS utilise le principe de la mesure de distance. Le récepteur de l'utilisateur reçoit les signaux émis par les satellites. Ces satellites sont répartis dans le ciel de manière homogène, avec, si possible, une répartition angulaire maximale. Les satellites connaissent leur position de façon précise, qui leur est fournie en permanence par des éphémérides et mise à jour depuis des stations de contrôle au sol. Les satellites disposent en outre d'une information de temps très précise, grâce à des horloges atomiques embarquées.

Ces deux informations (position et temps) sont envoyées par chaque satellite vers l'utilisateur. Le récepteur comporte une horloge à quartz qui lui permet de mesurer le temps mis par chaque signal pour lui parvenir et donc la distance du satellite en question. Avec la position de trois satellites et la distance qui l'en sépare il peut théoriquement déterminer sa position propre.

Le problème vient du fait que l'horloge à quartz de l'utilisateur est nettement moins précise que les horloges atomiques des satellites. Cette imprécision engendre des erreurs importantes dans le calcul de la position. Ce problème est résolu par l'ajout d'un quatrième satellite.



Avant de décrire plus précisément le système GPS, voici la définition de quatre termes fondamentaux qui traduisent les qualités d'un système de navigation :

- la précision donne le rayon de la sphère dans laquelle l'utilisateur se trouve,

- l'intégrité donne la probabilité que le signal soit fiable,
- la disponibilité traduit la probabilité de disposer du signal quand on en a besoin,
- la continuité donne la probabilité de conserver le signal une fois qu'on en dispose.

Historique du GPS

C'est dans les années 60 que les deux armées américaines, l'US Air Force et la Navy, ont commencé à réfléchir sérieusement à la possibilité de localiser leurs avions et leurs bateaux par satellites. Dès 1965 la société Aerospace Corporation proposait un projet pour le compte de l'US Air Force qui faisait intervenir 16 satellites en orbite géosynchrone avec des horloges atomiques. Des essais concluants furent effectués dans le Nouveau Mexique en utilisant des ballons à la place des satellites.

Dans le même temps le Naval Research Laboratory de la Navy lançait le projet TIMATION utilisant 21 à 27 satellites sur des orbites inclinées.

En 1973 le DoD (Department of Defense) américain, ne pouvant continuer à financer ces deux projets, décida de les fusionner. Le nouveau projet GPS résulta ainsi d'un compromis. Il fut développé à partir de 1980 avec dix satellites de première génération (Block I) lancés entre 1973 et 1985. Les lancements des vingt-quatre satellites de deuxième génération (Block II) étaient prévus initialement à l'aide des navettes spatiales. L'accident de Challenger a retardé de près de deux ans la mise en orbite du premier de ces satellites. En 1993 le vingt quatrième satellite était lancé et le système était opérationnel.

Description technique du GPS

Un système de navigation par satellite est constitué de trois segments :

- Un segment spatial constitué des satellites.
- Un segment de contrôle constitué des stations au sol chargées de vérifier l'état des satellites.
- Un segment utilisateur constitué de l'ensemble des récepteurs.

Segment Spatial

La constellation GPS est composée de 24 satellites construits par Rockwell International, Satellite Systems Division. Ces satellites évoluent sur 6 orbites quasi circulaires inclinées de 55° par rapport à l'équateur et à une distance de 20200 km de la surface de la Terre. Leur

période de rotation est d'environ 12 heures. Ils pèsent chacun 844 kg et leur durée de vie est estimée à 7 ans.

Les satellites du bloc II sont équipés de 4 horloges (deux au Césium, deux au Rubidium) dont la stabilité à une semaine est de l'ordre de 10^{13} . Ces horloges de très grande qualité ont permis de définir le temps GPS (continu), dont l'origine a été fixée au 6 janvier 1980.

Segment de Contrôle

Il est constitué de 5 stations au sol sur les sites suivants :

- Colorado Spring (Master Control Station)
- Hawaï
- Ile d'Ascension
- Ile de Diego Garcia
- Ile de Kwajalein

Ce segment est sous contrôle exclusif des militaires américains, il est chargé de maintenir le segment spatial. Les stations vérifient l'état des satellites, rendent compte à la Master Control Station qui détermine les corrections à apporter sur les informations de temps et sur les paramètres orbitaux. Ces corrections sont envoyées aux satellites concernés. Ce segment est également chargé de dégrader volontairement la précision du signal, dégradation qui est identifiée par le terme S/A (Selective Availability). Ceci consiste en l'introduction d'erreurs sur la position (informations erronées introduites dans la partie éphémérides du message de données) et sur l'information de temps de chaque satellite.

Segment utilisateur

Il existe une grande diversité de récepteurs qui dépendent fortement de leur type d'utilisation. Ils peuvent être mono fréquence ou bi fréquence. Selon l'utilisateur, ils peuvent posséder des capacités particulières comme l'intégrité avec le système RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) et le dialogue avec d'autres systèmes (centrale inertielle ou gyroscopique). On peut distinguer les utilisateurs civils des utilisateurs militaires selon le service auquel ils peuvent prétendre, les utilisateurs à forte dynamique (aéronautique) ou à faible dynamique (géodésie).

Les deux principales catégories de récepteurs sont les suivantes :

- Récepteurs civils : Service de positionnement standard (SPS).

Ce service est destiné aux utilisateurs civils. Il utilise la fréquence L1 exclusivement à 1575,42 MHz, signal que l'on nomme également C/A pour Coarse Acquisition. La précision initiale de ce service est de ± 25 m mais le DoD américain le dégrade volontairement de façon à ce que la précision ne soit plus que de ± 100 m, sous réserve que la géométrie des satellites soit bonne. Cette politique S/A permet en principe de rendre le signal complètement inutilisable en temps de conflit.

- Récepteurs militaires : Service de positionnement précis (PPS).

Ces récepteurs nécessitent l'utilisation d'une clé de décryptage pour opérer à leur niveau de précision maximal qui est de ± 20 m. Les récepteurs PPS reçoivent le signal sur deux fréquences différentes L1 et L2. L'emploi d'une deuxième fréquence sert à corriger le retard du signal dû à sa propagation dans l'ionosphère. Le signal L2 est crypté, durci contre certaines techniques de brouillage et réservé aux forces américaines et à certains autres utilisateurs habilités.

Coût du Système

Le segment spatial a lui seul aura coûté environ 10 milliards de dollars. Le segment sol représente 300 millions de dollars et les coûts de fonctionnement et de renouvellement sont évalués à 400 millions de dollars par an.

Évolution du GPS

Le GPS est un système stratégique vital pour les américains. Son développement est actuellement entièrement financé par le DoD et continuera probablement de l'être. Le DoD commence cependant à collaborer avec le DoT (Department of Transports) en vue d'une gestion partagée du système. Cette collaboration a des difficultés à réellement s'établir et doit compter avec la lourdeur de la bureaucratie militaire américaine. Le GPS restera très certainement sous le contrôle exclusif du DoD.

Les responsables américains garantissent que le signal GPS restera disponible gratuitement aux utilisateurs civils. Des études ont montré que l'introduction d'une redevance aux utilisateurs du GPS serait très difficile à mettre en oeuvre et très coûteuse. En outre la politique du gouvernement américain vise à développer au maximum l'industrie d'équipements et de services qui utilisent le GPS.

En revanche la doctrine de Selective Availability S/A qui consiste à dégrader volontairement le signal L1 destiné aux utilisateurs civils, disparaîtra très certainement d'ici 5 à 10 ans. Les forces

armées américaines utilisent en effet de façon de plus en plus fréquente le signal L1 en complément au signal L2. Le signal L1 est plus vulnérable au brouillage mais est plus facile d'utilisation et a une acquisition plus rapide que le signal L2. Ainsi la S/A serait nuisible en temps de conflit, non seulement aux forces adverses qui ne disposent de toute façon que d'un service dégradé du GPS, mais également aux militaires américains. Dans un deuxième temps, la S/A a beaucoup perdu de ses justifications stratégiques. Si le GPS était à l'origine principalement utilisé par des militaires pour des missions tactiques, il est aujourd'hui largement utilisé de part le monde pour des besoins très divers. En outre Glonass, les nombreux systèmes de radionavigation ainsi que les compléments différentiels, constituent autant d'alternatives au GPS dont peuvent disposer des forces adverses. Ces dernières se contentent généralement de systèmes de navigation ayant des précisions faibles.

Il est ainsi plus judicieux pour le DoD de supprimer la S/A et de mettre au point des systèmes de brouillage locaux. Dans le cadre du National Warfare Program (NAVWAR), le DoD a lancé plusieurs programmes de recherche qui vont dans cette direction. Ces recherches visent à rendre les récepteurs militaires indépendants du signal L1 et très résistants au brouillage, ainsi qu'à mettre au point des brouilleurs. Elles devraient aboutir à des systèmes opérationnels vers les années 2001-2006.

En dernier lieu une troisième fréquence L5 sera ajoutée aux satellites GPS de nouvelle génération. Cette fréquence permettra de corriger les erreurs de mesure dues à la traversée de l'ionosphère par les signaux de navigation. Avec les deux fréquences L1 et L5 et sans la S/A, les utilisateurs civils devraient pouvoir disposer d'une précision de $\pm 20\text{m}$ d'ici l'an 2005.

Le GPS évolue cependant assez lentement. Seul l'ajout de la fréquence L5 apporte une réelle évolution majeure dans la conception des satellites du block 2F qui constitueront la prochaine génération de satellites.

En conclusion, le système GPS évolue lentement certes mais constamment. D'ici une dizaine d'années, avec la suppression de la S/A, l'ajout de la fréquence L5 et la mise au point de systèmes de brouillage locaux, il constituera un système de navigation par satellite performant et demeurera certainement au premier rang des systèmes de navigation par satellite.

GLONASS

Le système Glonass est un système de navigation par satellite très similaire au GPS. Il a été développé dans les années 70-80 par le ministère de la défense Russe et a été rendu opérationnel en 1996.

D'un point de vue technique il est composé des même trois segments que le GPS : segments spatial, utilisateur et de contrôle.

Le segment spatial est constitué d'une constellation de 24 satellites qui orbitent à une altitude de 19000 km dans trois plans inclinés à 65°. La principale différence avec le GPS est que tous les satellites de Glonass utilisent des fréquences différentes alors que ceux de GPS utilisent la même fréquence. Les fréquences de Glonass se trouvent toutes situées dans la bande L.

Comme GPS, Glonass offre deux types de services :

- un service précis PPS (Precise Positioning System) réservé aux forces armées russes.
- un service standard SPS (Standard Positioning System) destiné aux applications civiles et militaires.

Les militaires russes utilisent en réalité les deux services PPS et SPS pour corriger la dégradation du signal lors de sa traversée de l'ionosphère.

Les signaux émis par Glonass sont observés et analysés en permanence par les occidentaux, en particulier par le Lincoln Laboratory du MIT. Il s'agit d'un système de très bonne qualité qui comporte même quelques avantages techniques par rapport au GPS :

- l'étalement des fréquences le rend tout d'abord moins sensible au brouillage,
- la plus grande inclinaison de ses orbites lui donne une couverture du globe plus homogène,
- le service standard n'est pas dégradé volontairement par le ministère de la défense russe et ce dernier affirme qu'il ne le sera jamais. Les utilisateurs civils du Glonass disposent ainsi d'une précision de base de $\pm 20\text{m}$ sans l'emploi d'aucun système d'amélioration.

Le Glonass connaît en revanche quelques difficultés actuellement, principalement liées à la situation économique de la Russie.

La durée de vie de ses satellites n'est que d'un an, alors que celle des satellites français est d'environ 15 ans. Ceci ne s'explique pas entièrement par la plus faible quantité d'hydrazine embarquée à bord des satellites. Il pourrait s'agir d'un problème de conception ou d'électronique.

Glonass est en outre confronté à un sérieux problème d'interférences avec des systèmes de télécoms mobiles et des applications astronomiques. Ce problème peut être résolu par le décalage des fréquences du SPS vers des fréquences plus basses.

Le principal problème de Glonass vient des difficultés financières du domaine spatial russe. Le renouvellement de la constellation ne serait pas assuré entièrement. Il semble aujourd'hui qu'il ne resterait plus que 13 satellites en fonctionnement sur les 24 initiaux.

Enfin, les récepteurs Glonass sont plus encombrants et moins conviviaux que les récepteurs GPS. Ils sont généralement réservés aux forces armées russes et sont en nombre limité. Il n'existerait que quelques milliers de récepteurs Glonass alors qu'on trouve sur le marché plus de 2000 types de récepteurs GPS différents.

Malgré toutes ces difficultés le gouvernement russe s'engage à toujours maintenir le Glonass. Sa motivation principale est de contribuer au développement économique du pays, qui passe par l'amélioration d'infrastructures clés comme les aéroports. Or les aéroports russes sont aujourd'hui gravement déficients en matière de contrôle aérien. La deuxième raison est le maintien d'une compétence dans la navigation par satellite pour éviter de laisser le monopole aux américains.

Les principales actions du gouvernement russe sont d'une part la promotion du Glonass auprès de l'OACI, d'autre part la mise au point de récepteurs hybrides GPS/Glonass qui devraient se substituer aux récepteurs GPS d'ici l'an 2000. De tels récepteurs auraient de gros avantages par rapport à des récepteurs Glonass ou GPS simples. Tout d'abord la précision serait meilleure, ainsi que la continuité, l'intégrité et évidemment la disponibilité car la probabilité de recevoir 4 satellites en simultané est supérieure. Le système serait ensuite plus sûr car il pourrait continuer à fonctionner en cas de problème ou d'arrêt de fonctionnement de l'un ou de l'autre des systèmes.

SYSTEMES DE COMPLEMENTS LOCAUX ET REGIONAUX

Insuffisance du GPS

Le signal du GPS ne satisfait pas aujourd'hui à l'ensemble des besoins des utilisateurs.

D'un point de vue technique, le signal n'est pas assez précis et ne dispose pas de la continuité, de l'intégrité et de la disponibilité requis par certains utilisateurs comme l'aviation civile :

- La couverture du globe terrestre n'est tout d'abord pas suffisamment homogène. Lorsque l'utilisateur se trouve dans un trou de celle-ci, le signal GPS est totalement inutilisable.
- D'autre part l'information d'intégrité n'est pas disponible : il n'y a pas moyen de savoir si l'information sur la position est erronée.
- Enfin il faut attendre parfois trop longtemps pour disposer d'un signal GPS utilisable.

Il est évident que de tels problèmes sont incompatibles avec les exigences de sécurité demandées par l'aviation civile.

D'un point de vue stratégique, le GPS est contrôlé par les autorités militaires américaines, qui peuvent couper le signal en cas de crise majeure. Pendant la Guerre du Golfe la fréquence civile a été rendue inutilisable et seule la fréquence militaire codée était disponible pour les unités militaires alliées. Dans ces conditions, on voit difficilement comment des industriels pourraient prendre le risque de bâtir un réseau de services pour des utilisateurs civils sur une infrastructure comme celle de GPS. Cela risque de freiner de façon considérable le marché civil très prometteur.

Les mêmes considérations sont valables pour le système Glonass. L'arrivée sur le marché de récepteurs hybrides GPS/Glonass permet d'apporter une réponse à certains des problèmes techniques. Cela reste malgré tout insuffisant. Certains utilisateurs ont des exigences si précises qu'un système global restera toujours insuffisant pour répondre à leurs attentes.

Des systèmes de compléments sont donc nécessaires. On distingue parmi ces systèmes des compléments locaux qui ne fonctionnent qu'à proximité d'installations comme des aéroports et des compléments régionaux qui couvrent des régions de la taille d'un continent.

Systèmes de compléments locaux

Il est possible d'améliorer la qualité du signal GPS en utilisant des compléments locaux basés au sol. Ces compléments fonctionnent grâce à des systèmes de correction différentielle DGPS constitués par des réseaux d'émetteurs radiofréquence. Ces émetteurs connaissent leur position très précisément et corrigent les signaux GPS. Le DGPS apporte également à l'utilisateur une information d'intégrité car il surveille la validité du signal GPS.

Les performances de tels systèmes sont parfois très bonnes : leur précision va de quelques mètres à quelques dizaines de centimètres. Seulement ces systèmes ne couvrent que des régions très localisées, de l'ordre de la centaine de kilomètres. L'infrastructure nécessaire est peu onéreuse et facile à mettre en oeuvre.

Les systèmes de compléments locaux DGPS sont surtout utilisés pour les besoins de la marine à proximité des côtes. Les américains sont ainsi complètement équipés avec plus de 50 stations appartenant à l'USCG.

Les systèmes de compléments locaux connaissent un succès croissant dans la plupart des pays, avec une demande de plus en plus forte de la part des utilisateurs, qu'il s'agisse de la navigation maritime, des applications de géodésie ou des sociétés d'ingénierie. Ils sont généralement financés par des fonds public pour des raisons de sécurité du trafic maritime.

Il existe actuellement un très grand nombre de systèmes locaux d'amélioration du GPS. Ces systèmes répondent bien aux besoins de la plupart des utilisateurs mais leur couverture reste très limitée et ils n'offrent donc pas de service géographiquement cohérent qui soit global.

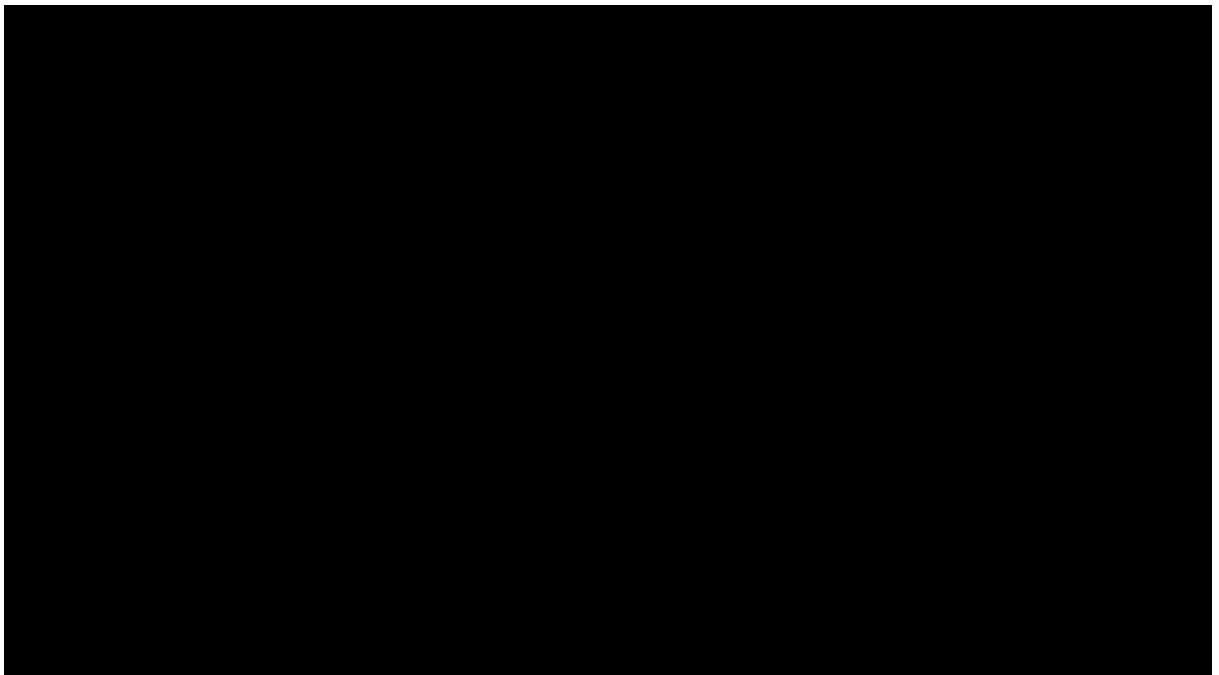
Systèmes de compléments régionaux : EGNOS

Certaines sociétés proposent déjà des services d'amélioration du GPS pour des besoins spécifiques avec des couvertures régionales. Il s'agit principalement d'apporter une information de précision et d'intégrité supplémentaires au GPS. D'ici l'an 2000, trois systèmes régionaux majeurs verront le jour: EGNOS, WAAS et MTSat. A eux trois ils constitueront le systèmes GNSS1 qui constituera un complément global au GPS.

Pour satisfaire aux exigences de l'aviation civile, qui est un des utilisateurs les plus intéressés par la navigation par satellite, l'Europe a pris l'initiative de construire un système de complément géostationnaire appelé EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System). Il s'agit d'un complément au GPS destiné à améliorer la qualité du signal et non pas d'un système de navigation par satellite indépendant. EGNOS constitue cependant une étape préliminaire vers un système de navigation par satellite GNSS2 entièrement civil, indépendant du GPS ou du Glonass. La réalisation d'EGNOS donnera à l'Europe une compétence en

matière de navigation par satellite et la dotera d'un savoir-faire indispensable pour se lancer dans ce projet ambitieux.

Le système EGNOS est constitué principalement de deux répéteurs disposés sur des satellites géostationnaires INMARSAT, de plusieurs stations RIMS (Ranging and Integrity Monitor Station) et de trois (ou quatre) stations MCC (Master Control Center) constituées de CPF (Central Processing Facility) et de CCF (Central Control Facility). Le signal émis par les satellites GPS (et/ou Glonass) vers l'utilisateur est reçu par les stations RIMS. Ces dernières ont une position fixe au sol, connue avec une grande précision. Les stations MCC collectent les données provenant des différentes stations RIMS, comparent les positions de ces dernières avec celles données par le GPS, en déduisent les éventuelles corrections à apporter au signal et envoient le tout vers le satellite géostationnaire à l'aide d'antennes NLES. Ce dernier renvoie alors vers l'utilisateur l'information d'intégrité et les corrections à apporter au signal GPS. Les informations entre RIMS, MCC, NLES transitent au travers d'un réseau appelé EWAN (Egnos Wide Area Network).



Le satellite géostationnaire aura également le rôle d'un satellite GPS supplémentaire et comme sa position est fixe à la verticale de la Terre, il sera toujours en vue de l'utilisateur. Ceci limitera les trous de couverture et augmentera la disponibilité. Le signal EGNOS contiendra finalement des corrections différentielles, des informations de pseudo-distance (l'équivalent des informations de distance données par les satellites GPS) mais aussi des informations d'intégrité.

Le financement du projet EGNOS est chiffré à 220 Millions de dollars et est réalisé par un groupe tripartite : ESA, Commission Européenne et Eurocontrol. L'ESA, qui a les compétences techniques, est le responsable du développement du système, et finance EGNOS à hauteur de 60%, la Direction des Transports (DG VII) de la Commission Européenne en finance 30 % et Eurocontrol, organisme européen responsable du contrôle du trafic aérien est en charge de la certification du système et contribue à hauteur de 10 %.

Les deux satellites Inmarsat 3 ont déjà été lancés, il ne reste plus qu'à mettre en place le segment sol. Dans un an, les signaux correspondant à l'un des deux satellites seront disponibles. La première étape d'EGNOS (qui s'appelle Euridis) sera achevée. Une deuxième étape (niveau 2) consistera à rendre le deuxième satellite opérationnel et à déployer une quinzaine de stations RIMS aux frontières de l'ECAC (zone de service d'EGNOS). La dernière étape (niveau 3) consistera à rajouter des stations RIMS (30 à 40) pour offrir un service encore plus précis. L'objectif est d'atteindre des précisions suffisantes pour permettre aux avions les approches de catégorie I. Cette troisième étape se divise en réalité en deux sous étapes : 3A avec l'utilisation de GPS seulement et des précisions qui devraient atteindre 10 m en vertical (insuffisant pour la Cat I), 3B avec l'utilisation conjointe de GPS et Glonass et des précisions de 6 m en vertical compatibles avec les exigences de la Cat I.

Le système entrera progressivement en service en 1998, il sera partiellement opérationnel en 2001 lorsque la phase AOC (Advanced Operational Capability) sera terminée. Il deviendra complètement opérationnel en 2005 avec l'achèvement de la phase FOC (Full Operational Capability) qui, par rapport à l'AOC, aura rajouté des redondances au sol, des géostationnaires et aura amélioré la disponibilité du service.

La France joue un rôle important dans le projet EGNOS. Thomson, qui est le leader mondial du trafic aérien (radars, centres de contrôle, aides à la navigation), est en effet chargé de la maîtrise d'ouvrage de la totalité du segment sol.

Le développement des récepteurs s'inscrit dans le cadre des projets Magnet A et B soutenus par la Commission Européenne. Ces projets sont présentés par un consortium européen mené par Dassault Electronique et ont démarré en 1996. La société française Sextant Avionique n'a pas pu être retenue pour ce marché à cause de la présence de Thomson dans le projet. Dans le cadre d'EGNOS les industriels doivent en effet obéir au principe du "retour géographique" qui veut que la part d'infrastructures réalisée par les industriels d'un pays soit proportionnelle à la part de financement du projet par le pays en question. Thomson s'étant vu attribuer une partie importante du développement des infrastructures d'EGNOS, il ne restait plus de place pour un autre industriel français. La partie récepteurs sera ainsi réalisée par la firme MAN (Allemagne). DASA développera en outre les stations CPF ainsi que les NLES. En ce qui concerne les autres pays européens, Matra Marconi Space a été chargé de réaliser les charges

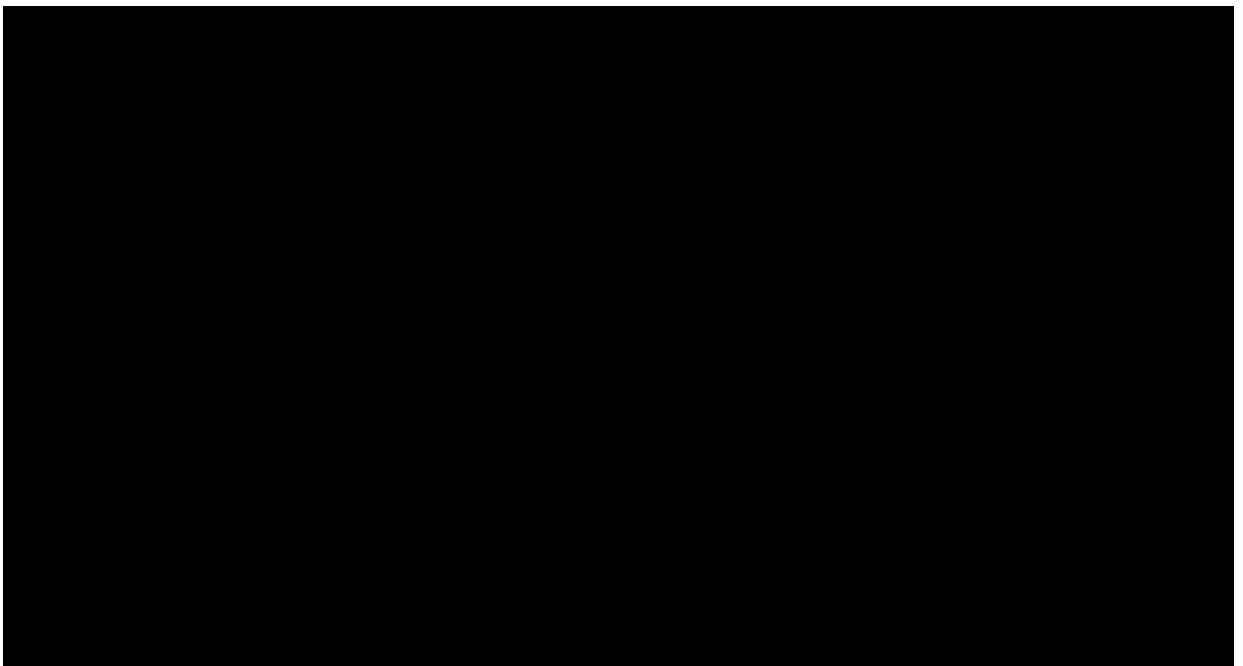
utiles des deux satellites Inmarsat 3, Alenia (Italie) développera les CCF, la Grande Bretagne ainsi que l'Espagne développeront les RIMS.

L'idée d'un complément géostationnaire a été reprise par l'Administration Fédérale d'Aviation (FAA) qui a financé le développement d'un système appelé WAAS (Wide Area Augmentation System) qui sera opérationnel en 2001. WAAS coûtera 460 millions de dollars et sera développé par Hughes Electronics. Il sera très similaire à EGNOS, il utilisera en particulier deux répéteurs loués sur des satellites Inmarsat 3. La différence majeure entre WAAS et EGNOS réside dans le fait que WAAS n'utilisera pas les signaux de Glonass.

Un projet similaire appelé MTSat (Multifunctional Telecommunication Satellite) est en cours de développement au Japon. Ce système utilisera des satellites géostationnaires dédiés à la navigation qui auront également des fonctions de collecte et de transmission d'informations météorologiques ainsi que de relais de communications aéronautiques. MTSat devrait coûter un milliard de dollars, il sera interopérable avec WAAS.

Le système GNSS1

Ces trois systèmes de complément géostationnaire EGNOS, WAAS et MTSat constitueront une première étape vers un système de navigation à couverture mondiale appelé GNSS1. La couverture géographique du GNSS1 en 2003 est donnée dans la figure suivante. GNSS1 fournira des signaux de pseudo-distance, d'intégrité et de correction supplémentaires aux signaux GPS. Sa précision devrait être de l'ordre de ± 7 m.



Même si GNSS1 améliorera la qualité du signal de façon suffisante pour la plupart des utilisateurs, le problème viendra de ce que ce système contiendra le GPS et le Glonass en son coeur. Le problème stratégique énoncé auparavant sera loin d'être résolu. La solution serait de construire un système entièrement civil, appelé GNSS2 qui puisse satisfaire tous les utilisateur civils et permettre le développement d'un marché civil dont le potentiel est si important.

UTILISATEURS ET MARCHE POTENTIEL

Le GPS a été conçu initialement pour des besoins exclusivement militaires, pour la localisation des avions et des bateaux militaires et pour le guidage des missiles de croisière lancés par des sous-marins en plongée au milieu des océans. Très vite le système a commencé à servir à des objectifs tactiques, pour la localisation des unités d'armée sur les théâtres d'opérations. Le GPS a montré son efficacité lors de la Guerre du Golfe, en 1991, alors qu'il n'était pas complètement opérationnel, la moitié des satellites de la constellation n'ayant pas encore été lancés.

Aujourd'hui, de plus en plus d'utilisateurs civils sont intéressés par ce moyen de navigation facile à utiliser et peu coûteux.

Catégories d'utilisateurs civils

Navigation aérienne

Aujourd'hui les avions disposent de plusieurs systèmes de navigation classique qui sont utilisés pendant les différents étapes de vol. L'ILS (Instrument Landing System) est utilisé pour les approches de précision lors des atterrissages. Le VOR/DME (Very High Frequency Omnidirectional Range/ Distance Measuring Equipment) est utilisé pendant le vol en route. Loran et Omega sont des systèmes de longue portée nécessaires à la navigation au dessus des océans.

Un système de navigation par satellite pourrait se substituer à tous ces moyens classiques car il serait adapté à toutes les phases de vol. Son utilisation serait plus commode et sa maintenance bien moins chère. Grâce à un tel système on réduirait les distances séparant les couloirs aériens et on pourrait ainsi augmenter la capacité du trafic aérien au dessus des zones urbaines. On pourrait également choisir des trajectoires optimales qui permettraient de diminuer les temps de vol et de faire des économies de carburant.

Tout ceci est guidé par le concept CNS/ATM (Communication Navigation Surveillance / Air Traffic Management) qui consiste en un changement radical dans la façon de concevoir la gestion du trafic aérien. Cette dernière repose actuellement sur le fait que la tour de contrôle connaît en permanence la position de l'avion et le guide. Loin des aéroports, l'avion se dirige à l'aide de gyroscopes, de centrales inertielles et de systèmes de radionavigation. Ces moyens manquent parfois de disponibilité, en particulier au dessus des océans, des déserts et des

plaines de Sibérie. L'avion ne pouvant pas se permettre de naviguer seul, il garde donc en mémoire les instructions de la tour de contrôle et reste dans son couloir aérien.

Cette conception classique de la navigation aérienne pose des problèmes : les avions ne peuvent pas changer de route, ils doivent attendre avant d'entrer dans leur couloir aérien ce qui engendre parfois des bouchons et enfin, une fois entrés, les espacements entre eux sont trop importants.

Avec la navigation par satellite les avions disposeraient d'une grande liberté de manoeuvre. Ils auraient le choix de leur route qu'ils pourraient modifier en temps réel. Les couloirs aériens seraient rapprochés ce qui permettrait de diminuer les problèmes d'encombrement aux abords des aéroports. Enfin, la possibilité d'optimiser les trajectoires des avions ferait économiser du carburant et gagner du temps aux passagers.

Les petits aéroports n'auraient alors pas à s'équiper d'installations ILS trop coûteuses pour leurs budgets.

Navigation maritime et fluviale

La navigation par satellite est également très utile pour le transport maritime. Pour la navigation au large elle donne la possibilité de choisir des trajectoires optimales et de réduire les temps de transport et donc de diminuer la consommation de carburant. Mais l'application la plus importante sera l'amélioration de la sécurité concernant la navigation côtière et fluviale. Un système de localisation couplé à des cartes digitales permettra de localiser les éventuels dangers : rochers, îlots, plates-formes pétrolières, changements de profondeur, épaves.

Pour la navigation au large la précision du GPS ($\pm 100\text{m}$) est suffisante, en revanche la navigation côtière et fluviale demande une précision de quelques mètres et doit donc se contenter d'utiliser des systèmes différentiels. La majorité des côtes européennes et américaines sont équipés de tels systèmes, l'exemple du réseau de l'USCG (US Coast Guard) le prouve. Cependant ces systèmes sont tous dépendants du GPS et fonctionnent sur des normes très différentes. L'utilisation d'un système de localisation par satellite qui aurait la précision et l'intégrité suffisantes (comme GNSS1 et 2) permettrait d'harmoniser les standards et coûterait moins cher.

Chemins de fer

La navigation par satellite pourrait être utilisée pour la gestion du trafic ferroviaire ainsi que pour la détection de défauts sur les voies. Les précisions requises sont de quelques mètres et l'intégrité doit être forte. Le marché potentiel se trouve surtout aux États-Unis où le réseau ferroviaire doit être modernisé. En Europe les sociétés de chemin de fer sont déjà bien équipées

en instruments classiques (balises de référence espacées de quelques kilomètres) et ne semblent pas être intéressées par des systèmes de navigation par satellite.

Navigation des automobiles et camions

Couplée à un système de cartes digitales, la localisation par satellites ouvre de nouvelles perspectives à la navigation des véhicules terrestres, en particulier des voitures et des camions. Elle donne le jour à une grande catégorie de services qui s'adressent aux professionnels (gestion et contrôle d'une flotte de camions ou de taxis, optimisation des trajets) ou au grand public (informations sur le trafic, itinéraires bis, informations sur le temps d'arrivée des bus aux arrêts, parcours touristiques). La navigation par satellite peut alors très facilement être associée à des méthodes complémentaires de navigation comme des centrales inertielles ou des gyroscopes. Des applications futuristes envisagent même l'utilisation de la navigation par satellite pour réaliser des moyens anti-collision à bord des voitures.

Ces systèmes d'aide à la navigation à bord des voitures coûtent encore assez cher (environ 15000 FF) et n'équipent pour l'instant que des modèles haut de gamme. Cependant, lorsque ces équipements deviendront abordables, ils s'intégreront très certainement dans la majorité des modèles. Ils finiront même probablement par se standardiser, lorsque les utilisateurs se seront habitués au confort de conduite qu'ils procurent.

Applications industrielles et scientifiques

La navigation par satellite joue un rôle de plus en plus important pour les applications industrielles et scientifiques. Elle permet d'améliorer les méthodes de cartographie, de mieux gérer la construction des bâtiments et l'aménagement du territoire. Elle facilite l'étude de la tectonique des plaques ainsi que des risques de séismes. Les professionnels qui utilisent la navigation par satellite pour des applications industrielles ou scientifiques se contentent généralement d'une intégrité faible mais ont besoin d'une bonne précision. Ils tirent alors largement profit de récepteurs GPS couplés éventuellement à des services d'amélioration DGPS, bien plus économiques que des installations classiques (télémètres laser).

Loisirs et télécommunications

Un nombre de plus en plus grand de personnes pratiquant la randonnée, la navigation à voile, les rallyes dans le désert font aujourd'hui appel au GPS. Les téléphones mobiles bénéficieront probablement très bientôt de services de navigation par satellite qui permettront de naviguer, à

l'aide de cartes électroniques. Ce marché est important car les abonnés au téléphone mobile dépasseront certainement les 100 millions d'abonnés en 2010.

Autres applications

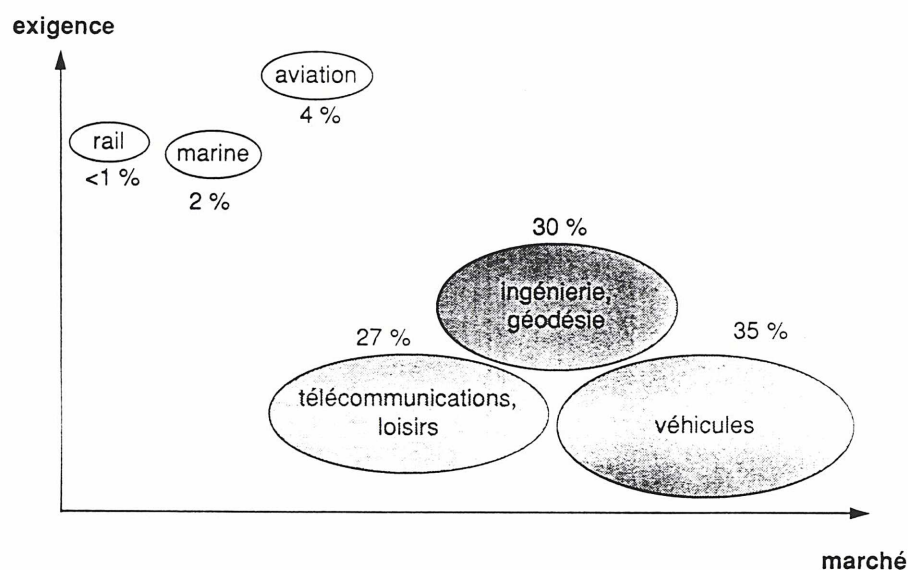
La navette spatiale américaine a récemment pu se placer en orbite grâce au GPS. Dans l'avenir la navigation par satellite pourra servir à guider d'autres satellites, à corriger leur trajectoire sans passer par le sol. Avec l'agriculture intensive elle permet déjà aux agriculteurs de mieux doser les engrais en fonction de la fertilité du sol. Elle facilite enfin l'exploitation rationnelle des forêts, la localisation des bancs de poissons ainsi que celle des gisements naturels.

Elle aura vraisemblablement une place primordiale pour des applications de la vie courante qu'on imagine pas encore.

Marché des récepteurs et services

Le marché de la navigation par satellite (récepteurs et services) est très prometteur : il est évalué à 8 milliards de dollars en 2000, 35 milliards de dollars en 2005 (GPS Industry Council, Euroconsult). C'est un marché qui est très concurrentiel, un très grand nombre d'entreprises (surtout américaines) fabriquent des récepteurs GPS. Le principal constructeur est Trimble.

La figure suivante montre la segmentation du marché :



La navigation aérienne est en termes de précision, intégrité, continuité et disponibilité, le plus exigeant des utilisateurs. Elle est la seule à exprimer de façon directe un besoin pour un système

de navigation par satellite performant pour lequel elle serait prête à payer. La taille du marché de la navigation aérienne est cependant limitée : elle représentera seulement 4% du marché total en l'an 2000.

Ce marché se développera conjointement avec le démantèlement des installations de navigation classique VOR, DME et ILS. Ces démantellements se feront certainement plus rapidement aux Etats-Unis qu'en Europe.

Les navigations maritime et ferroviaire ont des exigences aiguës en termes de précision et d'intégrité du signal mais la taille de leur marché est relativement faible.

Le principal marché est celui des applications terrestres, il représentera 92% du marché total en l'an 2000. 27% ira aux applications de loisir et de téléphonie mobile, 35% aux aides à la navigation des véhicules et 30% aux applications industrielles et scientifiques (ingénierie, géodésie).

Ce marché est cependant incertain, il compte beaucoup sur un décollage des ventes des systèmes d'aide à la navigation et des systèmes intégrés dans les téléphones mobiles. Il est également très disparate : les utilisateurs terrestres ont des besoins très différents les uns des autres et demandent des produits spécifiques. Un financement d'un nouveau système de navigation basé sur des taxes s'avérerait difficile à mettre en oeuvre. Les utilisateurs terrestres n'ont enfin pas besoin d'une grande intégrité et sont peu soucieux du contrôle des militaires américains sur le GPS. Le GPS les satisfait donc pleinement et ils s'intéressent peu au développement d'un système amélioré comme GNSS1 ou entièrement civil comme GNSS2.

La problématique est donc la suivante : seule l'aviation civile, les applications maritimes et ferroviaires ont des exigences fortes en matière de précision et d'intégrité et seule l'aviation civile serait prête à participer au financement d'un nouveau système de navigation par satellite plus performant, même si ce financement profiterait à tous les utilisateurs. Le marché de l'aviation civile est cependant très limité, contrairement au marché des applications terrestres.

ASPECTS POLITIQUES ET INSTITUTIONNELS

Avant d'envisager les différents scénarios possibles de réalisation du GNSS2 nous présentons ici quelques aspects de la situation politique et institutionnelle aux Etats-Unis, Russie et Europe qui concernent la navigation par satellite.

Etats-Unis

Le GPS, conçu et réalisé pour des objectifs militaires a vu son domaine d'applications s'élargir de façon spectaculaire vers le marché civil. Une bataille s'est alors engagée au sein de l'administration américaine entre le ministère de la défense (DoD), prônant la sécurité du territoire et le ministère des transports (DoT), adepte d'une logique économique. Le résultat a été tranché au plus haut niveau. La Maison Blanche a décidé de permettre au DoT de gérer le système conjointement avec le DoD, le contrôle demeurant cependant aux mains du DoD. Cela marque une victoire partielle du civil sur le militaire. Mais le DoD a du faire des concessions et il est peu probable qu'il en fera d'autres dans l'avenir.

L'administration américaine serait hostile à des initiatives privées de construction d'un système de navigation par satellite qui pourrait concurrencer le GPS. Ainsi l'initiative privée de la société Hughes d'installer des charges utiles de navigation sur les satellites de la constellation de télécommunications ICO a été bloquée par les autorités américaines.

Par la gratuité du signal et la perspective d'abandon de sa dégradation volontaire, les Etats-Unis essaient de décourager toute construction d'un système analogue concurrent au GPS. Ils souhaitent ainsi garder le contrôle du système de façon à être les seuls à prendre des décisions sur les actions à suivre en cas de crise majeure.

La taille et l'importance du marché de la navigation par satellite dans l'avenir font que les USA feront tout pour garder l'hégémonie mondiale dans ce domaine. Ceci est caractéristique de l'esprit de la culture américaine, les concepts de domination politique et économique y étant profondément enracinés. La stratégie américaine est d'imposer le standard GPS comme norme internationale, de bâtir une multitude de services et d'exploiter le marché. Les Etats-Unis tolèrent mal les standards parallèles à celui du GPS. D'ailleurs, contrairement à son homologue européen, le système de complément géostationnaire américain WAAS n'utilise pas les signaux Glonass même si ces derniers lui permettraient d'augmenter sa précision.

Sur le marché des récepteurs, on constate dès aujourd'hui une présence américaine massive. Environ 90 % du marché civil des récepteurs est détenu par Trimble et 90% du marché militaire par Rockwell-Collins.

Il ne faut pas oublier que l'Espace joue un rôle essentiel dans la politique américaine et que les décisions importantes qui le concernent sont prises au plus haut niveau.

On se rappelle les promesses tenues de J.F. Kennedy sur la conquête de la Lune ou l'Initiative de Défense Stratégique initiée par l'administration Reagan. L'importance de la politique de l'Espace aux Etats-Unis est l'un des héritages de la concurrence acharnée entre les deux superpuissances pendant la Guerre Froide. Nul ne doutait que celui qui dominerait l'Espace, dominerait le monde.

Russie

Le système de navigation par satellite Glonass est techniquement assez comparable au GPS. L'étude Telrus, destinée à évaluer l'état du Glonass, montre que les Russes possèdent une grande maîtrise technique. Ils ont fait preuve d'ingéniosité et ont trouvé des solutions très astucieuses et élégantes aux problèmes de conception du système. Parmi les points forts de Glonass, on remarque la qualité de la plate-forme ainsi que son guidage. Les charges utiles n'ont en revanche pas une bonne fiabilité.

Le point le plus faible est, sans doute, le marché des récepteurs. Aujourd'hui on ne compte que quelques milliers de récepteurs, la plupart dans la dotation de l'armée russe. Ils sont assez encombrants et ne seront visiblement pas adaptés à l'essor du marché civil. En fait ces récepteurs ont été conçus principalement pour des besoins militaires.

Pour des raisons historiques évidentes, l'industrie russe est peu orientée vers le marché de la libre concurrence. Elle s'adaptera bien sûr mais il s'agit d'un processus qui risquera d'être trop lent pour permettre le développement d'un marché Glonass en Russie. Enfin, pour mettre Glonass à jour la Russie se heurtera au problème encore non résolu du retour sur investissement.

Il y a aujourd'hui des initiatives de collaboration industrielles entre des entreprises européennes et des instituts de recherche russes comme par exemple entre Sextant-Avionique et GosNIAS ou entre l'allemand AFGH et l'institut SPNIRI. Ces accords ont comme but la construction de récepteurs multistandards GPS-Glonass-EGNOS et représentent un essai pour promouvoir Glonass. DASA et Dassault ont également développé des prototypes de récepteurs multinormes.

Dans ces conditions la collaboration avec la Russie pourrait-elle s'étendre au segment spatial et au segment sol ? Pourrait-on réaliser un GNSS2 basé sur Glonass ? Des charges utiles et des segments sol européens pourraient-ils compléter les plates-formes russes ?

On essaiera de répondre à ces questions dans le chapitre suivant.

Si une collaboration avec la Russie était possible, il faudrait se poser la question de la pérennité de Glonass. Aujourd'hui le système n'est pas complètement opérationnel car plusieurs satellites de la constellation sont tombés en panne. Même si les autorités russes affichent la volonté politique de continuer des projets spatiaux en Russie, on ne doit pas oublier la situation économique difficile du pays qui a des effets néfastes sur l'industrie spatiale. Si au début des années 80, l'URSS lançait plus d'une centaine de satellites par an, en 1996 ce nombre n'était que de 30 et en 1997 il n'y en aurait plus que 27.

Enfin, il faut être conscient de la difficulté de négociation avec les russes. Ils ont hérité d'une administration communiste, caractérisée par un poids et une lenteur considérables. Victimes de 70 ans de communisme, les russes ont pris des habitudes de négociation assez étrangères au monde des affaires occidental.

Europe

Les difficultés politiques en Europe viennent de la diversité de ses peuples. Quand des négociations ont lieu entre quinze pays de culture et histoire différentes, les désaccords sont pratiquement inévitables. Il faut alors du temps et de la force de conviction pour mener à bien des projets communs.

La navigation par satellite ne fait pas exception à cette règle. Pour EGNOS il aura fallu un an et demi et 19 réunions pour se mettre d'accord sur les pays qui participeront effectivement au financement du projet ! Comme pour le projet Ariane, la France a eu la contribution financière la plus importante. Avec pratiquement 30 % du financement d'EGNOS elle pourra imposer sa volonté plus facilement.

L'accord se trouve parfois au prix de dépassements budgétaires. Dans le cas du projet EGNOS, plusieurs pays ont demandé des stations de contrôle MCC sur leur territoire. Pour trouver un compromis on a construit quatre stations alors que deux auraient suffi pour le fonctionnement du système . Le coût du projet s'en est trouvé augmenté de 10 %.

A la Commission Européenne il existe trois directions concernées par la navigation par satellite : la DG XIII, en charge des télécommunications, la DG VII, responsable des transports et la DG XII qui s'occupe des technologies. On a souvent entendu des critiques

concernant le manque de coordination entre ces directions générales dans les projets de navigation par satellite. Chacune d'entre elles cherche à obtenir le plus d'influence, ce qui conduit à une gestion peu efficace des projets.

Même en France, le pays ayant l'industrie spatiale la plus développée en Europe, il n'existe pas de véritable politique de l'Espace. L'Espace est parfois considéré par les politiques comme une curiosité, un moyen de faire rêver les masses populaires plutôt que comme un moyen de progrès et de développement industriel. Même si aujourd'hui il existe en France des équipes de coordination interministérielles pour le GNSS2, on doute de leur influence réelle auprès des décideurs de la vie politique française.

Problèmes juridiques et institutionnels

L'utilisation de la navigation par satellite pour les besoins de la navigation aérienne pose la question de sa fiabilité. Reconnaître qu'un système est sûr demande une certification.

Par la convention de Chicago, chaque pays est maître de son espace aérien et certifie les systèmes de navigation installés sur son territoire. Si un accident aérien a lieu sur le territoire d'un pays, c'est ce même pays qui sera mis en cause. Il pourra ensuite éventuellement se retourner vers ses administrations compétentes.

En ce qui concerne EGNOS le problème principal vient du fait que le GPS se trouve au coeur du système. L'administration américaine ne peut pas assumer la responsabilité du fonctionnement du GPS en dehors de ses frontières. La certification d'EGNOS passe donc nécessairement par un état de confiance vis-à-vis de ce dernier. Les avis des pays membres de l'Union Européenne divergent à ce sujet. Aujourd'hui la Grande-Bretagne se dit prête à accepter cette certification alors que l'Allemagne est contre. La forte hétérogénéité des pays membres d'Eurocontrol, l'organisme européen responsable des certifications en matière de navigation aérienne, ne facilite pas cette tâche.

On se pose également des questions sur la gestion et le contrôle du système. La création au sein de l'Union Européenne d'une Agence Européenne de Navigation pourrait apporter une réponse à ces questions.

Aspects militaires

Les projets GNSS1 et GNSS2 sont des projets civils mais la navigation par satellite est un enjeu majeur pour l'indépendance politique et militaire de l'Europe. Comment expliquer alors la faible présence des militaires dans ces projets ?

La navigation par satellite n'est pas vitale aux militaires. Ces derniers disposent en effet d'autres moyens de navigation : centrales d'inertie, fichiers d'images, modèles optiques de terrain et même navigation astronomique. La navigation par satellite serait plus facile à utiliser et moins chère mais n'est en aucun cas indispensable. Aujourd'hui, même si les forces armées disposent d'installations relativement modernes de navigation (ILS), elles utilisent encore les balises, les radiocompas et les radars. Contrairement à la logique civile qui veut que les anciennes installations soient démontées et remplacées par de nouveaux systèmes, les militaires préfèrent garder leurs anciennes installations pour des raisons de fiabilité et de redondance.

Au niveau européen, un système militaire de navigation par satellite est difficile à envisager. D'abord le GPS est gratuit et mis à la disposition des alliés de l'OTAN par les Etats-Unis. En vertu d'une règle fondamentale de l'Alliance, chaque pays partage ses moyens militaires avec les autres. Toute initiative militaire européenne de construire un système de navigation propre ne serait alors pas justifiée. Une telle initiative ne pourrait pas seulement venir des autorités militaires. Il faudrait une forte volonté politique européenne pour fonder d'abord une armée européenne commune et pour ensuite la doter des moyens communs de défense comme par exemple d'un système de navigation par satellite militaire européen. Or, aujourd'hui, l'Europe est encore loin d'être unifiée du point de vue politique et de disposer d'une politique de défense commune. Du côté français, la navigation par satellite ne constitue pas un enjeu stratégique majeur. La force de riposte stratégique française est en effet principalement basée sur ses missiles nucléaires balistiques qui ne demandent pas une précision de frappe chirurgicale. Cependant il existe des points de rapprochement entre les civils et les militaires car ils partagent le même espace aérien. Les militaires sont toujours présents en qualité d'observateurs. Ils soulèvent également des problèmes concernant les dangers potentiels du brouillage et du leurrage des signaux ainsi que leur éventuelle utilisation par des forces ennemies.

Outre Atlantique, les américains entreprennent de grands efforts pour rendre le signal plus robuste et plus difficile à brouiller. Pendant la Guerre du Golfe des missiles Tomahawk guidés par le GPS auraient été brouillés par une station de télévision locale.

Les américains cherchent aussi à mettre au point des installations de brouillage. En cas de crise ou de conflit local il est préférable de rendre le signal inutilisable dans une région donnée plutôt que de le couper complètement.

En conclusion ces quelques réflexions sur la situation politique en Europe, aux Etats-unis et en Russie montrent que les difficultés auxquelles le GNSS2 risque de devoir faire face sont nombreuses et variées. Ces difficultés proviendraient aussi bien des problèmes institutionnels de certification du système, que des problèmes d'organisation entre les différents partenaires européens, ou de la volonté américaine de conserver l'hégémonie en matière de navigation par satellite en empêchant les autres projets de voir le jour. Les Russes risquent de ne pas pouvoir être présents dans la compétition pour la domination du marché civil des récepteurs. La France jouera un rôle important en Europe mais ses dirigeants politiques se contenteront vraisemblablement de suivre le mouvement orchestré par l'Europe avec le risque d'être pris de vitesse par des initiatives privées. Les militaires français, eux, auront plus un rôle de conseil que décisionnel.

GNSS2 : OPTIONS DE RÉALISATION

Le chapitre précédent a passé en revue quelques considérations d'ordre politique et institutionnel qui montrent les difficultés que le projet GNSS2 risque de rencontrer lors de son élaboration. Cette élaboration est cependant vitale pour l'Europe, pour des raisons d'indépendance politique et économique. Ce chapitre présente quelques scénarios envisageables pour la réalisation d'un tel projet.

Pourquoi GNSS2 ?

Il convient avant tout de comprendre les raisons essentielles qui poussent l'Europe à construire le GNSS2.

La première raison est l'indépendance stratégique de l'Europe face aux Etats-Unis. Le marché de la navigation par satellite sera certainement important d'ici l'an 2000 et peut exploser du jour au lendemain. Il semble que la responsabilité de l'Europe soit d'empêcher que ce marché ne se développe sur les bases d'un système contrôlé par les militaires américains. Si on ne fait rien, le système russe Glonass risque en outre de ne pas pouvoir se maintenir dans l'état actuel et de laisser aux Etats-Unis le contrôle absolu de la navigation par satellite. Les américains amélioreront le GPS, mettront une nouvelle fréquence à disposition du public pour assurer leur domination économique dans ce domaine en imposant leur norme au monde entier. Le GNSS2, qui devrait être opérationnel vers 2010 serait avant tout un système de navigation purement civil qui apporterait une indépendance stratégique politique et économique à l'Europe. Il est en effet inconcevable que des pays capables de réaliser un tel système acceptent de perpétuer cette dépendance stratégique envers un autre pays, même allié. Cette vision du futur est partagée par plusieurs pays européens et non européens (Chine, Inde, Indonésie et même le Japon).

La deuxième raison de construire GNSS2 est de répondre aux besoins de l'aviation civile. L'aviation civile est en effet la seule à avoir des exigences bien spécifiées en terme de navigation, la seule qui ait signifié son intérêt pour un système amélioré au GPS. EGNOS, la partie européenne de GNSS1 est un complément géostationnaire au GPS qui répond en partie à ces exigences. EGNOS permet d'apporter au signal une intégrité et une précision suffisantes pour le vol en route, les approches de non précision et les approches de Cat I.

Cependant EGNOS ne fournit pas la précision nécessaire aux approches de Cat II et III et surtout EGNOS comporte GPS et Glonass en son coeur et ne peut donc pas être certifié par

l'aviation civile. Un équipement de navigation basé sur EGNOS ne pourra donc pas être utilisé comme moyen unique de navigation. Ce système devra être secondé par des systèmes de secours classiques qui, eux sont certifiés et pour qui on peut trouver des responsables en cas de défaillance. Les avantages que procure la navigation par satellite : son utilisation globale, sa simplicité d'utilisation, sa précision et surtout son faible coût, sont donc grevés par la nécessité d'avoir à seconder à bord des avions tous ses récepteurs par des équipements classiques coûteux. Ces équipements pourraient être supprimés si on pouvait certifier le système de navigation par satellite. EGNOS ne pourra pas être certifié à cause de GPS, mais GNSS2 le sera.

La dernière raison est de permettre à l'Europe d'avoir une indépendance pour choisir ses options sur le très long terme, et surtout d'acquérir une compétence dans le domaine et un meilleur accès à l'industrie mondiale. Cela rendrait surtout possible la mise en place d'un réseau de services basé sur le GNSS2.

GNSS2 pourrait se réaliser de plusieurs manières :

Option 1 : Utilisation de Glonass

La première option qui vient à l'esprit et qui semble être la plus simple serait d'utiliser la constellation russe Glonass. Cette constellation est optimale pour la navigation car elle a été conçue dans ce but.

Le système Glonass a même des performances légèrement meilleures que le système GPS : il permet une précision de $\pm 25\text{m}$, est plus résistant au brouillage, a une couverture du globe plus homogène, une bande de fréquences plus large ce qui permet une conception des récepteurs plus simple. Cependant ce système connaît actuellement de grosses difficultés, il aurait besoin qu'on l'entretienne. La durée de vie de ses satellites est faible, des satellites seraient manquants et les récepteurs sont en nombre limité. La rénovation et l'entretien de Glonass passent par le rajout de satellites, une révision de leur conception pour améliorer leur durée de vie et surtout le développement de récepteurs. Certaines entreprises ont déjà commencé à apporter des solutions à ce problème de récepteurs. 3S Navigation Inc, Man Technologie GmbH, Sextant Avionique développent des récepteurs hybrides GPS/Glonass, seule une utilisation conjointe de Glonass avec le GPS pouvant en effet trouver une place sur le marché.

La Commission Européenne accorde une place primordiale à ce projet de coopération avec la Russie. Un rapprochement de la Russie vers l'Europe en matière de navigation permettrait une compensation de la domination américaine et une plus forte coopération entre industriels russes et européens pour le développement de produits de haute technologie. La Commission,

en collaboration avec l'Aérospatiale et DASA finance donc une étude importante (TELRUS) d'évaluation du Glonass dans l'optique d'un tel rapprochement. Cette étude concerne aussi bien GNSS1 que GNSS2 et vise à étendre EGNOS vers l'est, tout en maintenant Glonass.

Le premier problème qui va se poser pour cette première option sera de parvenir à un accord durable avec les Russes. Il est en effet très difficile de définir qui est responsable du système Glonass et de trouver les bons interlocuteurs. Le processus de coopération est très lent alors qu'une action Européenne rapide est indispensable.

Le deuxième et principal problème est que la Russie fait face actuellement à une grave crise économique qui a d'importants effets négatifs sur son industrie spatiale. Malgré les garanties que les autorités russes donnent sur la pérennité du système, la survie de Glonass est mise en doute.

Notre avis est que cette option est techniquement réalisable et serait souhaitable d'un point de vue politique mais risque d'être prise de cours par des options à dynamique plus rapide.

Option 2 : Système de satellites dédiés

La deuxième option serait de construire un système avec des satellites dédiés à la navigation.

On peut tout d'abord envisager une couverture globale de la surface de la Terre. Les calculs montrent que l'altitude optimale des satellites de navigation est de 20000 km, approximativement celle des satellites GPS et Glonass. Avec de tels satellites, un système de navigation devrait alors comporter environ 24 satellites. Avec la technologie actuelle, on pourrait construire un système plus avancé que le GPS. Les satellites GPS ont en effet des charges utiles qui ont été durcies pour des besoins militaires et qui sont donc inutilement lourdes et chères pour des besoins purement civils. Grâce aux avantages technologiques et à l'économie faite sur le non durcissement, un tel système coûterait moins cher que le système GPS (50 GF). Son coût approcherait vraisemblablement les 20 GF, ce qui reste malgré tout trop important pour les budgets européens actuels. Il n'est donc pas raisonnable d'envisager un système de ce type à couverture globale.

Le coût peut être notablement réduit si on envisage seulement une couverture locale. Ceci est possible en utilisant des satellites géostationnaires (GEO) ou des satellites géosynchrones (IGSO) à 36000 km. Vus depuis la Terre, ces satellites sont soit toujours à la verticale d'un même point (GEO), soit décrivent une trajectoire en forme de 8 (IGSO). Ils ne survolent qu'une région donnée du globe et sont donc adaptés pour offrir une couverture régionale aux

signaux de navigation. Un système de navigation régional basé sur de tels satellites est évolutif: couvrant l'Europe, il pourrait facilement se joindre à un système analogue couvrant l'Amérique et à un autre couvrant l'Asie pour former un système à couverture mondiale.

Le premier projet venait d'Alcatel pour le compte de l'ESA. Il comportait 3 satellites GEO et 3 IGSO. Certaines exigences de l'ESA : liaisons intersatellites et utilisation de la bande de fréquences C n'étaient pas forcément justifiées. Ce projet coûtait donc cher, à peu près autant qu'une constellation de 24 satellites à 20000 km. La précision avait été privilégiée au détriment de l'intégrité et les exigences de l'aviation civile n'étaient même pas satisfaites, il aurait fallu pour cela utiliser deux fois plus de satellites IGSO. Ce projet a donc rapidement été abandonné. Le projet ENSS (European Navigation Satellite System) est actuellement proposé par DASA. Il comprend 3 GEO et de 8 à 12 IGSO et répond bien aux exigences de l'aviation civile. Il aurait de très bonnes performances (5-6 m) mais coûterait cher : entre 8 et 10 GF. L'utilisation de la bande de fréquences C l'empêcherait en outre d'être compatible avec le GPS.

En conclusion, même si un système de navigation utilisant des satellites dédiés constituerait une solution techniquement idéale, son coût serait si élevé qu'il risquerait de ne pas pouvoir être financé dans des délais raisonnables.

Comment diminuer les coûts de GNSS2 ?

Dans un système tel que ENSS ou GPS, trois segments sont particulièrement chers :

- les horloges atomiques embarquées à bord des satellites
- les satellites
- les lancements

1) Les horloges atomiques ont d'une part un prix élevé et d'autre part pèsent lourd et sont donc chères à mettre en orbite. Il paraît dès lors raisonnable d'envisager de les laisser au sol au lieu de les intégrer aux satellites. On peut penser pour cela à utiliser le système DORIS détenu par le CNES (Détermination d'Orbites et de Radiopositionnement Intégrés par Satellite).

Des balises, au nombre de 50, sont réparties uniformément sur tout le globe et connaissent très précisément leur position. Le récepteur DORIS à bord du satellite capte des signaux en provenance de ces balises et effectue des mesures de décalage Doppler des deux fréquences 2036,25 MHz et 401,25 MHz. La deuxième fréquence sert à réduire l'erreur due à la propagation dans l'ionosphère. Ces mesures lui permettent de calculer sa position de façon très précise : 3 cm pour un satellite géostationnaire et quelques mètres pour un satellite en orbite basse.

Le système DORIS peut être utilisé sur tout satellite récepteur en orbite basse (200 à 2000 km) d'inclinaison quelconque. DORIS permettrait de faire de la navigation par satellite à moindre coût. Il suffirait pour cela de mettre quelques horloges atomiques au sol sur certaines balises et de transmettre un signal de temps aux satellites. Disposant d'une information de temps et connaissant sa position, le satellite pourrait alors renvoyer vers l'utilisateur un signal ressemblant à un signal GPS. Le gros intérêt d'un tel système résiderait dans la simplicité de la charge utile de navigation. Il s'agirait d'un simple récepteur DORIS avec un calculateur, un modulateur, un amplificateur et une antenne, le tout ne pesant que 20 kg.

2) Pour diminuer les coûts des satellites il suffit de diminuer leur masse. Une solution consisterait à utiliser des microsattelites dont le coût est généralement inférieur à 10 MF. Ces derniers ont une capacité limitée à quelques kilogrammes et quelques Watts mais la charge utile de DORIS qui ne pèse que 20 kg et ne consomme que quelques Watts conviendrait parfaitement.

3) Enfin, pour diminuer les coûts dus aux lancements on peut penser tout d'abord à utiliser des microsattelites qu'on peut mettre en plus grand nombre à bord des lanceurs. On peut aussi tout simplement supprimer les lancements en utilisant des satellites qui servent déjà pour des besoins de télécoms. Le coût de l'inclusion de charges utiles de navigation à bord de tels satellites serait alors marginal.

Au total, le coût d'un système GNSS2 utilisant DORIS et des microsattelites est estimé à 2 GF. En remplaçant les microsattelites par des constellations télécoms, le coût baisse à 1.5 GF.

Microsattelites ou Constellation Télécom : financement et validité

Financement :

Il est temps de se poser la question du financement d'un GNSS2 basé sur une option microsattelites ou satellites de télécoms mobiles. Qui serait prêt à payer pour un système civil de navigation par satellite qui coûterait dans les 2 GF?

Pour que la navigation aérienne puisse utiliser un système de navigation par satellite au lieu d'équipement classique, elle a besoin que ce système soit certifiable. Les équipements de navigations par satellite sont moins chers et plus souples que les équipements classiques et l'économie du retrait de ces derniers au profit d'équipements qui seraient basés sur GNSS2 est évaluée à environ 90 MECU par an pour l'Europe. Cette économie proviendrait de la suppression des aides de navigation en route (53 MECU) ainsi que de la suppression des

équipements ILS de Cat I (36 MECU). L'économie faite sur la suppression des ILS et MLS de Cat II et III est marginale car très peu d'aéroports sont équipés de tels moyens (environ 6 aéroports en France).

On note que ces 90 MECU correspondent à seulement 10% du montant des taxes totales infligées aux compagnies aériennes pour les contrôleurs et la réservation des couloirs aériens. Ceci permettrait de financer un projet à 2 GF dans des délais raisonnables. Le problème c'est que l'Europe est déjà très bien équipée en systèmes de navigation classiques et risque donc d'être réticente à les démanteler si facilement.

Bien que l'aviation civile soit le seul utilisateur prêt à contribuer financièrement au GNSS2, elle ne représente que 4% du marché total de la navigation par satellite. Le marché terrestre représente lui 92%, mais est beaucoup trop dispersé et se contente du GPS. Cependant, devant l'ampleur de ce marché, un industriel privé aura peut-être un jour la volonté d'apporter un certain financement au GNSS2 pour prendre une certaine avance technologique en pariant sur l'avenir.

Validité :

Un système de navigation réalisé sur les bases d'une constellation de microsattelites ou de satellites de télécommunications aurait des performances de base, sa précision ne serait que de 60 à 100m et ne permettrait pour l'aviation civile que le vol en route et les approches de non précision. Il devrait être complété par des systèmes d'amélioration de performances (comme des systèmes différentiels) pour permettre les approches d'atterrissage en catégories I, II ou III. En outre un tel système devrait être compatible avec EGNOS et donc avec GPS et utiliser la bande L.

En second lieu, on peut se poser la question de la certification du système, élément clé d'un GNSS2 qui permettrait son utilisation comme moyen unique de navigation à bord des avions. Le système considéré serait composé de trois segments : le segment DORIS, la constellation satellitaire et les stations locales d'amélioration. Tous ces segments doivent pouvoir être certifiés indépendamment.

- DORIS NG est contrôlé par le CNES et pourra être géré conjointement avec l'aviation civile.
- La certification des stations locales ne pose pas de problème institutionnel.
- En ce qui concerne la constellation de satellites, une constellation de microsattelites dédiés sous contrôle civil ne poserait pas de problème. Le seul problème viendrait en fait de la constellation de satellites télécoms qui devrait être gérée conjointement entre des industriels privés et un organisme européen. On peut aussi se demander raisonnablement ce que le

système deviendrait si la constellation devenait non rentable. L'OACI cherche actuellement une solution institutionnelle à ce problème.

Option 3 : utilisation d'une constellation Télécom

Une constellation de microsattellites offrirait à peu près les mêmes performances qu'une constellation de télécoms mobiles (du type Sativod), seulement c'est cette dernière approche que nous privilégions. Nous considérons en effet que le marché de la navigation par satellite sera entraîné par celui des télécommunications mobiles actuellement en pleine expansion.

Le produit de navigation par satellite sera tout d'abord lancé par son association avec un produit de télécommunications mobiles. Les utilisateurs terrestres qui représenteront la plus grosse part du marché, sont en effet plus intéressés par un 'package' navigation + télécoms mobiles que par un service de navigation seul.

En outre la constellation de télécoms aura des délais de fabrication bien précis et devra être envoyée dans l'espace avant une date fixée. La décision d'y inclure ou non des charges utiles de navigation devra donc se faire rapidement alors qu'avec un système dédié de microsattellites le projet risquerait de connaître un grand nombre d'évolutions et d'indécisions et de prendre du retard.

Réalisation technique

Les industriels qui détiendront dans le futur des constellations de télécoms mobiles auraient de quoi hésiter avant de se lancer dans la navigation. Le marché de la navigation par satellite est en effet très particulier dans la mesure où les signaux délivrés sont gratuits, le retour sur investissement est on ne peut plus flou. Cependant la plupart de ces industriels sentent que ce marché est sur le point de décoller et qu'il vaut mieux ne pas rester trop à l'écart. C'est pourquoi ils ont tous une équipe de recherche et un projet d'inclusion de charges utiles de navigation à bord de leurs satellites.

La réalisation technique d'un système de navigation utilisant des satellites télécoms impose quelques contraintes. Comme on l'a déjà dit, il faudra en premier lieu que le système proposé soit compatible avec le GPS et EGNOS. Il devra donc utiliser la même bande de fréquences L. En deuxième lieu la constellation devra être adaptée pour faire de la navigation. Ceci dépendra du nombre de satellites, de leur altitude, de l'angle d'inclinaison des orbites.

Le choix de l'altitude des satellites est essentiel :

- La densité de particules ionisées est trop grande entre 1500 km et 5000 km (ceinture de Van Allen basse) et entre 15000 km et 20000 km (ceinture de Van Allen haute), il est imprudent d'y placer des satellites.
- L'atmosphère est trop dense au dessous de 700 km.

Les altitudes recommandées sont donc

- entre 700 km et 1500 km : LEO (Low Earth Orbit)
- entre 5000 km et 15000 km : MEO (Medium Earth Orbit)
- au delà de 20000 km : altitudes de satellites GPS, géostationnaires, géosynchrones.

Satellites LEO

Envisageons tout d'abord le cas des constellations de satellites en orbite LEO.

Les altitudes de ces satellites ne sont tout d'abord pas adaptées à faire de la navigation par satellite. Leur couverture est insuffisante : on n'en voit que 2 en temps normal alors qu'il faudrait en voir 4. Leur utilisation doit donc se faire en parallèle avec celle des géostationnaires d'EGNOS.

1) **Sativod**

Cette constellation sera composée de 64 satellites à 1500 km d'altitude sur des orbites inclinées à 55°. Elle devrait voir le jour vers l'an 2002-2004 et coûtera 3,5 G\$. Elle sera détenue par Alcatel et utilisée pour des besoins de multimédia. Elle est regardée comme la constellation hôte optimale pour GNSS2.

La charge utile de télécoms pèsera 300 kg et consommera 2200 W, la charge utile de navigation utilisant DORIS sera donc facile à embarquer. L'utilisation de la bande L rendra le tout compatible avec GPS et GNSS1. Le projet porte le nom de SCNS (Système Complémentaire de Navigation par Satellites).

2) **Iridium**

Cette constellation comprendra 72 satellites à 780 km dans 6 plans à 65°. Elle sera opérationnelle en 1998. Elle coûtera 3,8 G\$ (4,1 G\$ si on inclue le segment sol). Ce coût élevé de développement s'explique par l'utilisation d'une technologie de pointe : Iridium permettra en effet des échanges de données entre satellites. Le coût de la communication sera en revanche élevé (3 \$ la minute). Iridium sera construit par Motorola et détenu principalement par Motorola (20%), Nippon Iridium Corp (13,2%) et Verbatim (10%).

3) Globalstar

La constellation Globalstar comprendra 56 satellites dans 6 plans à 52° et à 1414 km d'altitude. Elle coûtera moins cher qu'Iridium (1,8 G\$) car elle utilisera une technologie plus simple. Il n'y aura en effet pas de communication entre satellites. Globalstar sera détenue principalement par Loral (36,5%), par Qualcomm (10,1%) et par Vodafone (9,6%). Elle sera peut-être la première constellation à proposer un service complet à partir de 1998. Elle offrira un service de positionnement précis complémentaire au GPS. Le service le moins précis atteindra une précision de 0,5m, le plus précis quelques centimètres.

4) Teledesic

Ce projet très ambitieux de l'américain Bill Gates a pour objectif de concurrencer le réseau terrestre en matière de multimédia. Les satellites seront les noeuds du réseau, ils pourront communiquer entre eux, comme avec Iridium. Les services offerts sont la transmission de données, d'images et de sons.

La constellation comprenait à l'origine 840 satellites opérationnels à 700 km dans 21 plans à 98,2°. Chaque plan comprenait 4 satellites de rechange pour un total de 924 satellites. Ce nombre a récemment été réduit de plus de la moitié. Le coût du projet est évalué à environ 9 G\$ répartis entre la R&D (1,5 G\$), la production (4,8 G\$) et le lancement et la mise en service (2,5 G\$). Le système espère voir un retour sur investissement après la cinquième année d'opération.

La Commission Européenne finance l'étude du projet INES (Innovative Navigation European System) qui vise à démontrer les performances d'un système de navigation par satellite basé sur l'utilisation d'une constellation du type Sativod. Cette étude consiste en une conception détaillée du système et en un certain nombre de tests. Outre les aspects techniques (génération des signaux, utilisation de la bande L), elle abordera un certain nombre d'aspects institutionnels (certification) et économiques (marché, financement).

Satellites MEO

Envisageons maintenant les constellations de satellites en orbite MEO.

Contrairement aux LEOS, l'orbite de ces constellations est suffisamment haute pour leur permettre d'être intégrées dans des systèmes de navigation par satellite indépendants de GPS.

1) WEST

Cette constellation sera composée de géostationnaires et de 9 MEO. Son coût est évalué entre 2 et 3 G\$. Elle sera opérationnelle en 2001 en Europe et en 2003 dans le monde et sera détenue par Matra Marconi Space. Elle offrira des services de multimédia (vidéoconférences, voix,

vidéo, données numériques). Avec WEST l'utilisateur pourra se connecter directement aux satellites sans recours au réseau terrestre (ce qui ne sera pas le cas de Sativod). La possibilité d'inclure des horloges atomiques à bord des satellites n'est pas exclue.

2) **Odyssey**

Cette constellation a 12 satellites répartis sur 3 orbites circulaires inclinées à 50° à une altitude de 10350 km. Le coût d'Odyssey est évalué à 2,5 G\$. Le système devrait être opérationnel vers l'an 2000. Les détenteurs de la constellation seront principalement TRW (10%) et Teleglobe (5%). A l'exception du nombre de satellites et de l'altitude, il n'y a pas de différence fonctionnelle entre Odyssey et Globalstar. La taille de la région couverte par un satellite sera évidemment plus importante pour Odyssey.

3) **ICO**

Il s'agit de l'ancien projet Inmarsat 21. La constellation comprendra 12 satellites sur 2 orbites à 45° et à 10355 km. ICO devrait coûter 2,6 G\$. Le premier lancement de satellites est prévu pour 1998, la mise en service pour 2000.

ICO est fonctionnellement très différente de Odyssey (nombre de cellules, bandes de fréquences). Le détenteur du système sera essentiellement Inmarsat (150 M\$ d'investissements) ainsi que HSCI (94 M\$). ICO avait un projet d'incorporation de charges utiles de navigation qui s'est heurté à l'obstacle de la Comsat Corp américaine (projet ISNS).

Le problème des trois constellations MEO est qu'elles sont chacune insuffisantes pour constituer un système de navigation indépendant. Même en doublant le nombre de satellites, on serait en dessous du nombre de satellites de GPS avec une altitude moins favorable.

CONCLUSION

Le marché de la navigation par satellite est prometteur et peut exploser dans les prochaines décennies. Il n'est pas impossible que son comportement connaisse une évolution analogue à celle des téléphones mobiles auxquels peu de gens croyaient il y a dix ans et qui sont en train de bouleverser le marché des télécommunications aujourd'hui. Le GPS américain s'est aujourd'hui presque entièrement approprié ce marché et tient à le conserver. Ceci pose des problèmes stratégiques à l'Europe qui est consciente de l'importance que jouera la navigation par satellite dans le futur. Son initiative GNSS1 de complément géostationnaire au GPS lui permet de satisfaire les besoins de l'aviation civile et en même temps d'acquérir une compétence en matière de navigation par satellite. Pour aller plus loin elle devra construire son propre système qui sera civil, sous contrôle des états européens et complètement indépendant du gouvernement américain. Plusieurs projets ont vu le jour. La plupart risquent de se heurter à des difficultés politiques et institutionnelles, en particulier lorsqu'ils entrent en concurrence directe avec le GPS. Pour tous ces projets cependant, le problème majeur demeure celui du financement. La plupart des utilisateurs n'ont pas besoin que le système qu'ils utilisent soit indépendant du DoD américain et se contentent du GPS. Seule l'aviation civile a besoin d'un système qui soit certifié par les états européens, ce qui n'est pas le cas de GPS. Avec un tel système elle pourrait remplacer ses équipements de navigation classique par des récepteurs GNSS très simples à utiliser et bien moins chers à maintenir.

Le marché de l'aviation civile ne représente cependant que 4% du marché total et le démantèlement des anciennes installations risque de prendre du temps, surtout en Europe. Le financement du GNSS2 étant assez obscur, le coût d'un tel projet doit être minimal pour qu'il puisse se réaliser. Le projet qui coûterait le moins cher et qui aurait le plus de chances d'aboutir rapidement serait d'utiliser des constellations de satellites de télécoms mobiles et d'y inclure des charges utiles de navigation. Le coût d'un tel GNSS2 pourrait être financé dans des délais raisonnables par des taxes aux compagnies aériennes et aux aéroports, des aides provenant de la Communauté Européenne et éventuellement un apport de l'industriel possédant la constellation. L'avantage pour l'industriel serait de disposer d'un service de navigation intégré au service de télécom mobile qu'il contribuerait à contrôler.

Notre thèse c'est donc que le GNSS2 se fera. Il ne s'agira pas d'une constellation dédiée du type GPS mais d'un système plus petit, évolutif et qui sera le fruit d'une association avec une constellation de télécoms mobiles.

ANNEXE

Liste des personnes rencontrées :

Bruno BELON	CNES, Toulouse
Bruno BLACHIER	Satel Conseil, Montrouge
Jacques BLAMONT	CNES, Paris
Jacques BRETON	CNES, Toulouse
Michel CALVET	DGAC/DNA, Paris
Olivier CAREL	DGAC/DNA, Paris
Christian CARLE	Thomson-CSF/T4S, Buc
Jean-Pierre CARRASCO	Etat Major de l'Armée de l'Air, Paris
Serge CATOIRE	Aérospatiale, Paris
Philippe COUILLARD	Aérospatiale, Les Mureaux
George DREYSSE	Etat Major des Armées, Paris
Charles DRIEUX	CNES, Paris
Alain DUPAS	CNES, Paris
Alain ESTERLE	DGA/DAS, Paris
Marc ESTEVE	DGA/DME, Paris
Alain GIRARD	Aérospatiale, Cannes
Michel GUIONNET	Dassault Electronique, Paris
Joël HAMELIN	MPTE/DGSI, Paris
Benoît HANCART	DGA, Paris
Annick HAUDEBOURG	MPTE/DRAST, Paris
Claire HOQUARD	Matra, Paris
Jean-Louis LAVROFF	Commission Européenne, DG XIII, Bruxelles
Anne LAUVERGEON	Alcatel Télécom, Paris
Tanguy LEGUEN	Etat Major des Armées, Paris
Bertrand de MONTLUC	CNES, Paris
Bernard MATHIEU	CNES, Paris
Jean-Pierre PIEPLU	Thomson-CSF, Toulouse
Jean-Pierre PROVENZANO	Alcatel Espace, Toulouse
Michel TRAISET	Thomson-CSF, Paris
Yves TREMPAT	CNES, Toulouse
Dominique STAMMLER	DGAC/DNA, Paris
Alexandre STECIW	ESA, Paris
Magalie VAISSIERE	Matra-Marconi Space, Toulouse
Andrew WATT	Eurocontrol, Brétigny s/ Orge