

"Evolution des techniques spatiales dans le domaine de la navigation"

par M. LE GOUIC

Ingénieur au Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

Résumé

Les études actuellement en cours et les projets spatiaux en développement annoncent pour les années 90 une série de systèmes de localisation par satellites de types nouveaux. C'est une formidable capacité qui sera donnée aussi bien à ceux qui ont pour tâche de décrire la terre, qu'à ceux qui s'y déplacent.

Un panorama de ces moyens spatiaux actuels et futurs est dressé avec une attention particulière pour les problèmes de navigation.

INTRODUCTION

Le domaine couvert par le terme localisation est vaste. Il comprend deux aspects qu'il y a lieu de distinguer parce que les moyens mis en œuvre, les techniques proposées et les besoins annoncés sont sensiblement différents :

- la navigation où le mobile détermine lui-même sa position ;
- le positionnement où un site central détermine la position de mobiles.

Pour chacun de ces aspects le rôle joué par les satellites est multiple et je ne pourrai, sous peine de n'en faire qu'un inventaire peu satisfaisant, présenter l'ensemble des moyens, des services et des applications offerts aux utilisateurs.

Considérons par exemple le problème général de la navigation (je la supposerai le plus volontiers maritime, mais les considérations propres à l'océan que je serai amené à développer sont en général transposables de façon assez immédiate aux domaines terrestre et aérien). La navigation peut être définie comme l'art de faire parvenir un mobile à une destination donnée dans des conditions données : elle comprend donc la capacité :

- de localiser le mobile relativement à un référentiel terrestre ;
- de choisir en fonction de l'environnement la route optimale pour un critère donné (par exemple la sécurité, l'économie, le confort...).

Les satellites peuvent alors être utilisés pour :

- localiser l'objet ;
- définir les référentiels (géodésie) ;
- étudier l'environnement (topographie, courants, météo...) ;
- transmettre des données (informations techniques, carte électronique...).

Je traiterai ici essentiellement le premier aspect, localisation de l'objet mobile, vous renvoyant à l'exposé de M. Boucher pour un développement détaillé des évolutions en matière de géodésie et je ferai une impasse presque complète sur les problèmes liés à la connaissance de l'environnement.

GENERALITES SUR LA LOCALISATION PAR SATELLITES

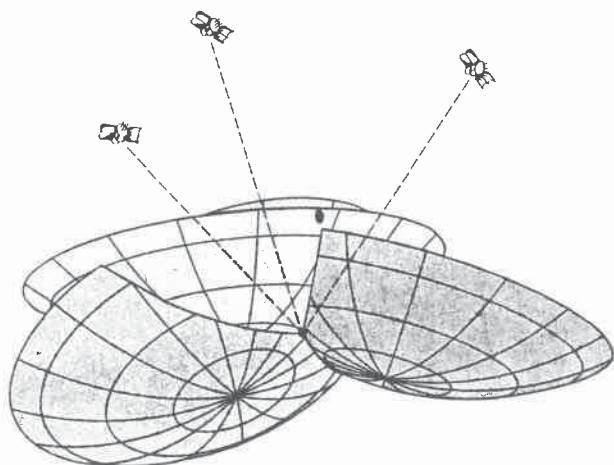
1 - En l'absence de satellites, on peut localiser un mobile :

- en utilisation des moyens autonomes (estime et recalage périodique sur des observations astronomiques ou à l'aide de gradients géophysiques) : les précisions obtenues sont modestes et tributaires des possibilités de recalage (météorologie clémente, connaissance cartographique détaillée...) ;
- à l'aide de moyens radioélectriques où le mobile est positionné relativement à des balises terrestres, elles-mêmes rattachées à une géodésie. Avec ces moyens, portée et précision sont d'une manière générale des qualités contradictoires. Tant que la liaison directe est possible, il n'y a, en effet, guère de problèmes d'atténuation ou de propagation : du moins ils sont assez simples à maîtriser. Au-delà, il faut étudier la physique de la propagation à l'interface entre des milieux électriquement différents en tenant compte de la rotondité de la terre. L'utilisation optimale des moyens suppose le recours à des spécialistes, avec des résultats souvent insuffisants pour certains utilisateurs particulièrement exigeants (hydrographes, géophysiciens, militaires...).

En utilisant des satellites, on se replace dans les conditions de la visibilité directe et les avantages qui en découlent sont supérieurs aux inconvénients liés à la distance entre émetteurs et récepteurs, et à la mobilité de l'émetteur.

2 - Le principe de la navigation par satellites peut être symbolisé d'une manière simple et consiste essentiellement en deux approches distinctes :

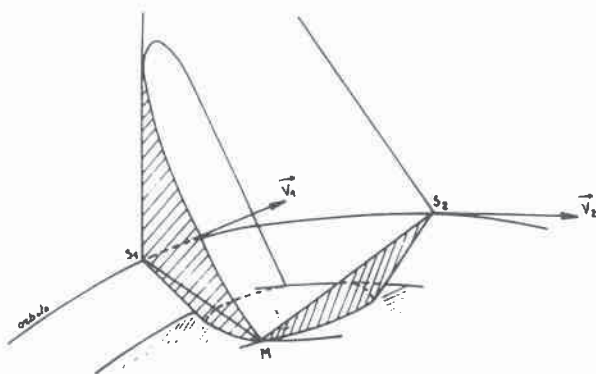
- l'une basée sur la mesure des distances (fig. 1) entre la station et plusieurs positions successives d'un même satellite, ou d'une manière quasi équivalente des distances mesurées sur plusieurs satellites. Le mobile est alors placé à l'intersection de sphères centrées sur les positions du ou des satellites.



— Figure 1 : Principe de la navigation par satellites : mesures de distances.

L'avantage d'utiliser plusieurs satellites est de permettre une localisation instantanée, tandis qu'avec un seul satellite, il faut éviter une géométrie proche de la singularité par un défilement suffisamment long du satellite sur son orbite.

— la seconde approche est basée sur le principe classique de la navigation hyperbolique : on mesure la différence de distance (ou une quantité qui lui est directement reliée) entre l'observateur et deux positions successives d'un satellite. On obtient ainsi successivement plusieurs hyperboloïdes (dégénérés éventuellement en cônes si les positions du satellite sont proches l'une de l'autre - fig. 2 -) à l'intersection desquels est placé l'observateur.



— Figure 2 : Principe de la navigation par satellites : mesures hyperboliques.

3 - Quel que soit le type de mesure, la position du mobile est déterminée relativement au repère dans lequel est décrit le mouvement du satellite. Il faut donc bien connaître l'orbite du satellite, la précision de cette détermination se reflétant immédiatement sur celle de l'observateur terrestre. C'est pourquoi un système de navigation spatiale n'est pas composé seulement de satellites mais doit être com-

plété par un ensemble de stations de référence dont les observations servent au calcul de l'orbite. Cette orbite est alors diffusée par des éphémérides qui peuvent être :

- les éphémérides précises obtenues a posteriori à partir des observations du réseau de stations de référence. La précision actuelle est métrique ;
- les éphémérides prédites, ou approchées, ou opérationnelles, qui représentent une orbite extrapolée. Les éléments de ces éphémérides sont rafraîchis périodiquement dans les mémoires du satellite et transmis par ce satellite à l'utilisateur sous la forme d'une modulation de la fréquence émise.

4 - La liaison radioélectrique entre le satellite et l'observateur se fait à travers l'atmosphère et deux perturbations de propagation sont à prendre en compte :

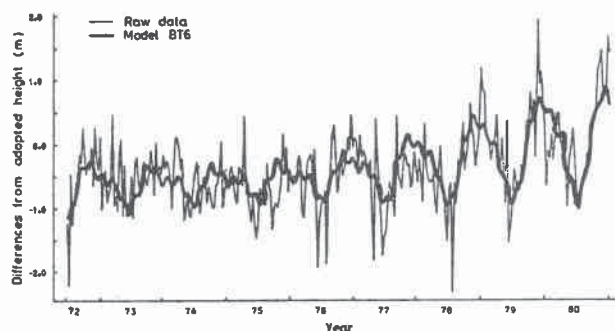
— la première concerne les couches basses de l'atmosphère où l'effet observé est indépendant de la fréquence (au moins jusqu'à quelques dizaines de GHz). Pour corriger l'effet de la réfraction troposphérique on utilise un modèle calé sur les mesures de température, humidité et pression. Lorsque la mesure locale de ces paramètres n'est pas possible, il faut éviter d'utiliser les satellites les plus bas ;

— la deuxième concerne les couches hautes de l'atmosphère où la présence d'électrons libres engendre une perturbation de propagation équivalente à un retard. Cet effet est, au premier ordre, inversement proportionnel à la fréquence (mesure de distance) ou à son carré (cas des mesures de vitesse radiale effectuée par effet Doppler).

En utilisant deux signaux émis en phase sur deux fréquences (générées par un même oscillateur) on peut donc aisément s'affranchir de cette perturbation ionosphérique. Si on ne dispose pas de deux fréquences, il faut utiliser un modèle qui sera d'autant plus fiable que l'ionosphère est plus calme.

Les corrections ionosphériques ainsi décrites ne concernent que le 1^{er} ordre et un suivi sur une longue période montre que les effets d'ordre supérieur ne sont pas négligeables (fig. 3).

Cette description sommaire des principes de la localisation par satellites s'applique de façon générale, à tous les systèmes que je vais maintenant présenter.



— Figure 3 : Perturbation ionosphérique résiduelle.

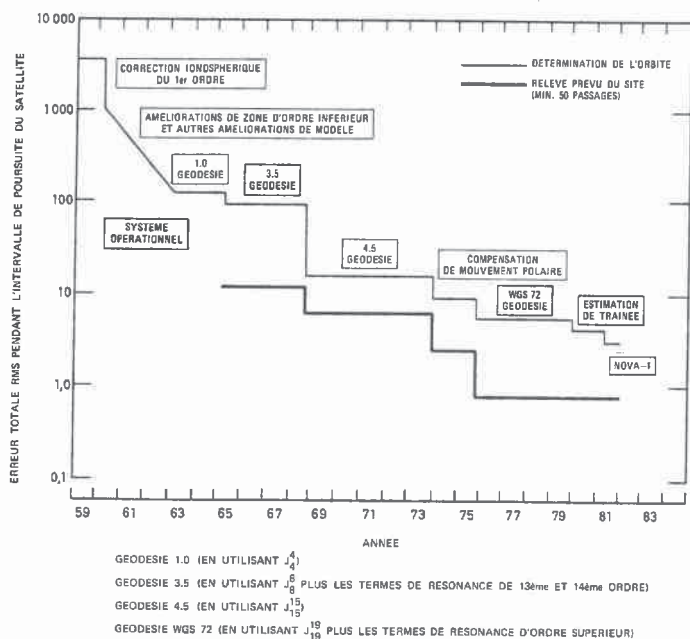
SATELLITES DESTINES A LA NAVIGATION

1 - La réalisation initiale majeure est le Navy Navigation Satellite System ou Transit, initialement destiné à offrir un soutien aux sous-marins Polaris et dont la réalisation et le contrôle ont été confiés au ministère de la Défense Américain (DOD). L'accès civil a été donné en 1967, sans que tous les éléments concernant la définition du système aient été déclassifiés.

La mesure est effectuée sur l'effet Doppler observé sur un des 6 satellites défilants constituant le segment spatial. Le mobile est positionné à l'intersection d'hyperboloïdes s'appuyant sur les positions successives du satellite pendant sa période de visibilité (5 à 20 mn).

Le système est bien connu (70 000 utilisateurs dont 2 500 en bi-fréquence) et les causes d'erreurs sont bien identifiées :

— La première concerne la précision de l'orbite qui est connue en navigation par les éphémérides prédites. A mesure que le système se développait, la prédiction d'orbite s'est améliorée ainsi que l'illustre la figure 4 avec différentes étapes importantes :



— Figure 4 : Amélioration dans la détermination des orbites Transit.

1959-64 : mise en évidence d'incohérences entre systèmes de référence locaux et mise en place progressive de méthodes de positionnement à l'échelle intercontinentale.

Cette possibilité de rattacher des systèmes locaux à un référentiel unique, a été un apport très important pour unifier la représentation de la cartographie marine.

1964-67 : Amélioration des modèles gravitationnels par observation des orbites de divers satellites.

1967-70 : Publication des premiers modèles du

potentiel terrestre avec calcul simultané des orbites et des coordonnées des stations d'orbitographie.

1970-79 : Les méthodes spatiales détectent les mouvements du pôle avec une précision équivalente à celle de l'astronomie.

1979 : Les mêmes méthodes reflètent les irrégularités de rotation de la terre.

1981 : Les nouveaux satellites NOVA sont à compensation de traînée et permettent de mieux s'affranchir des effets non gravitationnels.

Ces progrès dans la trajectographie se reflètent immédiatement chez les utilisateurs.

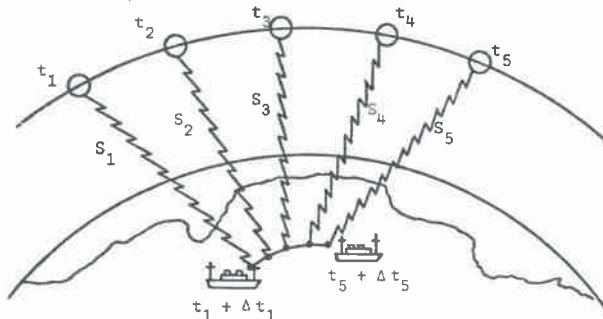
— La deuxième cause d'erreur concerne les perturbations ionosphériques et troposphériques déjà mentionnées.

— La troisième cause est la non instantanéité des mesures. Si l'objet est immobile, on peut, pour améliorer la précision de la localisation :

- soit cumuler plusieurs observations à des époques différentes ;

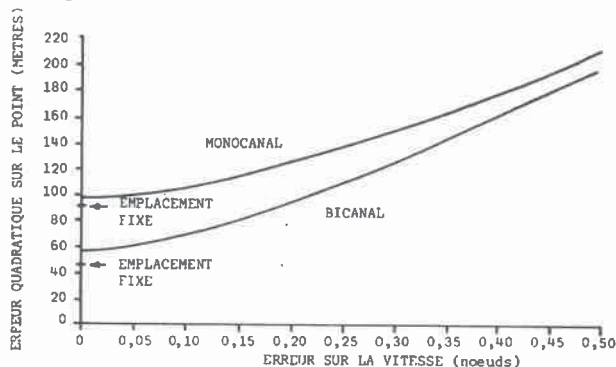
- soit effectuer un traitement différentiel par rapport à une station de référence. On admet alors que les erreurs d'orbites et de propagation en deux stations voisines sont équivalentes et corriger les observations de la station inconnue des écarts constatés sur celle connue.

Si l'objet est mobile il faut ramener une observation de 20 mn à un instant de référence et pour ce faire, on utilise les valeurs fournies par l'estime du mobile (fig. 5).



— Figure 5 : Géométrie d'un passage Transit : navire en mouvement.

L'erreur qui résulte sur le positionnement d'une erreur dans les valeurs de l'estime est illustrée par la figure 6.



— Figure 6 : Erreur d'estime et précision du point Transit : cas de la vitesse.

En navigation, on estime que la précision du point Transit isolé varie de 100 à 500 m selon la qualité de l'estime et du récepteur. L'utilisation de techniques de filtrage pendant les passages ou entre les passages permet de réduire cette erreur jusqu'à une centaine de mètres.

Ce bref rappel des caractéristiques générales de Transit permet de faire ressortir les principales critiques formulées par ses utilisateurs :

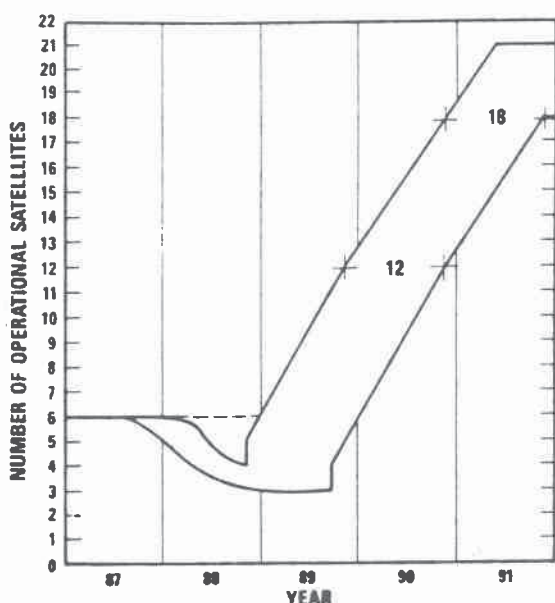
- la trop longue durée de chaque détermination et on souhaite une localisation instantanée ;
- la fréquence trop rare du positionnement (il faut parfois attendre plusieurs heures à l'équateur) et on souhaite un positionnement disponible à tout moment ;
- la précision moyenne de la localisation au moins en navigation ;
- l'impossibilité d'échange de messages entre le mobile localisé et la base.

2 - Pour répondre à ces différentes critiques, de nouveaux systèmes sont en développement aujourd'hui. Le premier et le plus avancé de ces projets est le NAVSTAR/GPS dont M. de Chezelles fera une présentation très détaillée demain : je me contenterai donc ici de quelques considérations relatives essentiellement au problème de la navigation.

• Le programme GPS a été lancé en 1973 par le DOD pour fournir aux armées Américaines un service de radiolocalisation permettant la détermination précise et continue de la position, de la vitesse et du temps à un utilisateur convenablement équipé.

Une constellation probatoire d'au moins 6 satellites a été mise en place pour qualifier le système et les performances que j'indiquerai par la suite ont été vérifiées sur cette constellation réduite.

La mise en place de la constellation définitive (21 satellites gravitant à 20 000 km d'altitude, sur des orbites de période 12 heures) a été retardée par les problèmes de lanceurs aux Etats-Unis et la figure



— Figure 7 : Calendrier prévisionnel de mise en œuvre du GPS.

7 illustre le calendrier probable (1988) de réalisation du programme : en 1992, chaque utilisateur devrait disposer en tout lieu et à tout instant d'au moins 4 satellites en visibilité directe.

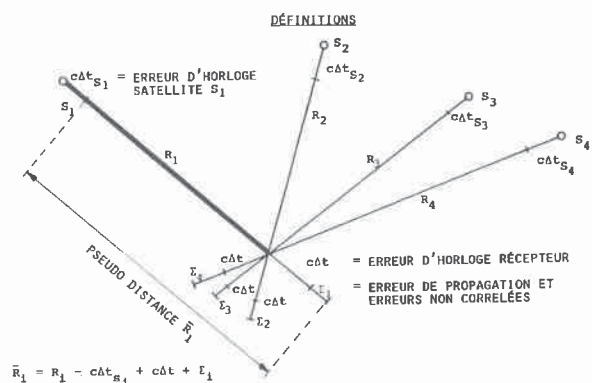
• Chaque satellite émet 2 fréquences $L_1 = 1\,575\text{ MHz}$ et $L_2 = 1\,227\text{ MHz}$ générées par un même oscillateur à 10,23 MHz. Chacune est modulée par 1 ou 2 codes, le code précis (P : Précise code) et le code approché C/A (Coarse/Acquisition) composés l'un et l'autre d'une suite binaire pseudo-aléatoire. Le code P est généré à la fréquence 10,23 MHz avec une période de répétition de 267 jours ; pour le code C/A, ces valeurs caractéristiques sont respectivement de 1,023 MHz et 1 ms.

Outre les codes P et C/A, la porteuse est modulée du message de navigation contenant entre autres une table d'éphémérides.

• Différentes mesures sont possibles avec GPS

— *Les pseudo-distances* : Ces mesures nécessitent la connaissance d'un des deux codes C/A ou P. Elles consistent à effectuer une corrélation entre le signal reçu du satellite et les codes générés par le récepteur. La pseudo-distance est alors la différence du temps de réception de la transition du code (mesurée suivant l'horloge du récepteur) et du temps d'émission de la même transition (mesurée suivant l'horloge du satellite). Cette mesure est donc biaisée par les imprécisions d'horloge (satellite et récepteur) et les effets atmosphériques.

Avec 4 pseudo-distances et les positions des satellites (dédites des éphémérides), on calcule la position du récepteur et le décalage des horloges. Ce type de mesure est non ambigu. C'est le mode dit 3D + T (fig. 8).



— Figure 8 : Principe de la mesure GPS par pseudo-distances.

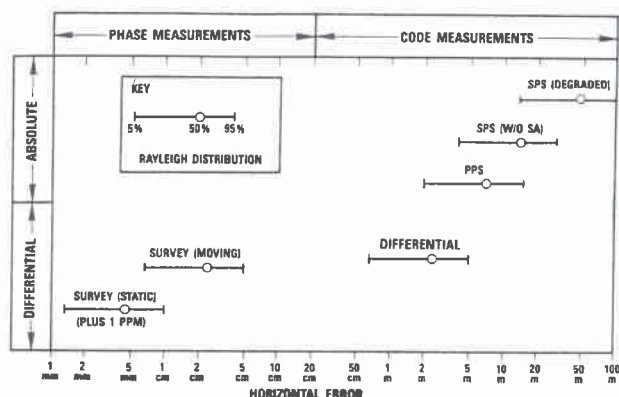
Avec 3 satellites et la connaissance de l'altitude du récepteur, on peut déduire la position planimétrique du récepteur (mode 2D + T).

Avec 2 satellites seulement, connaissant l'altitude du récepteur et disposant d'un temps de référence stable, on peut déterminer la position planimétrique (mode 2D).

La qualité des recoupements est caractérisée par un facteur de dilution de précision : GDOP pour le mode 3D + T. Lorsque la constellation définitive sera en place, ce GDOP sera en général meilleur que le seuil critique de 6 au-delà duquel la dégradation de la précision est importante.

— Une mesure plus fine est donnée par la valeur de la phase de battement entre la fréquence reçue du satellite (reconstruite après soustraction de la modulation du code) et la phase générée par le récepteur. Cette mesure est affectée d'une ambiguïté d'un nombre entier de cycles qui, traduite en distance est de 20 cm sur L_1 . Le bruit sur les phases est de $5 \cdot 10^{-3}$ cycles soit 1 mm.

La mesure sur la phase seule nécessite un traitement différentiel entre plusieurs récepteurs et ne fournit pas une position absolue. Les différentes techniques utilisées (mesures sur plusieurs satellites, sur plusieurs récepteurs, à plusieurs époques) pour s'affranchir des biais d'horloge, d'orbite et des ambiguïtés sur les phases initiales, sont employées pour la géodésie. Mais le suivi des phases permet également de filtrer les mesures de pseudo-distances avec une précision relative remarquable. A titre d'exemple, le roulis d'un navire est nettement observé sur la figure 9.



— Figure 9 : Mise en évidence du roulis par un récepteur GPS SERCEL TR5S.

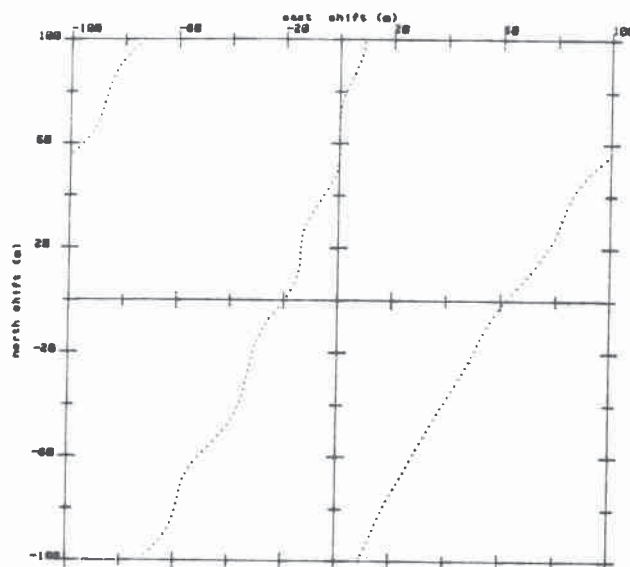
— Dernière mesure possible, celle du Doppler sur les porteuses. C'est alors la même technique que celle mise en œuvre pour TRANSIT.

• Actuellement, tous les utilisateurs ont accès aux deux cordes C/A et P. Cependant, avec les satellites du prochain bloc (bloc II), le DOD aura la possibilité de contrôler l'usage fait du système et ce par deux moyens :

— le S.A (selective availability) qui est une dégradation volontaire du code C/A par bruitage de l'horloge et surcodage des éphémérides ;

— l'A.S (l'antispoofing) qui est un chiffrement du code P (qui devient Y) et n'est alors accessible qu'aux possesseurs d'une clé de décodage fournie par le DOD.

Les performances que l'on peut obtenir sont indiquées sur la figure 10. Le tableau est divisé en 4 parties suivant le type de mesure (phase ou code) et le type de résultats (absolus ou relatifs), 6 niveaux de base seront proposés lorsque GPS sera opérationnel : pour chacun d'eux la précision est représentée par une distribution relative à l'échelle horizontale. Sauf dans le cas du SPS (Standard Positioning Service) avec mise en œuvre du S.A, tous les résultats présentés ont été vérifiés expérimentalement sur la constellation probatoire : (les chiffres relatifs à la précision verticale sont environ 1,5 fois plus grands) :



— Figure 10 : Précision des points GPS.

— mode SPS avec S.A : précision horizontale de 100 m à 95 % ;

— mode SPS sans S.A (c'est le code C/A actuel) : précision horizontale de 30 m à 95 % ;

— mode PPS (Precise Positioning Service) : précision horizontale de 16 m à 95 % ;

— les deux modes différentiels sur les phases sont relatifs à la géodésie, la précision horizontale variant de 1 mm à 5 cm suivant l'éloignement du récepteur de référence et la vitesse du mobile. Les résultats sont alors disponibles en temps différé.

— le mode différentiel sur les codes permet une précision absolue de 5 m à 95 %. Il peut fonctionner en temps réel si la station de référence retransmet par liaison HF, à haute cadence, les corrections à appliquer sur les pseudo-distances. Même avec la mise en œuvre du S.A, ce mode différentiel sera performant jusqu'à des distances de 500 km de la station de référence. Au-delà, pour obtenir une localisation précise en temps réel, il faudra avoir accès au mode PPS.

3 - Ce bref descriptif des possibilités du système GPS, de la politique américaine et des moyens mis en œuvre montre la formidable capacité qu'il représente pour la navigation et la géodésie. Malgré ces atouts, il présente aux yeux de plusieurs utilisateurs potentiels des défauts qui font qu'il n'est pas encore adopté comme outil unique des moyens de navigation future.

Plus précisément, il subsiste divers problèmes :

— *l'intégrité du service* : GPS est avant tout un système militaire et bien qu'abondamment documenté et d'accès offert aux civils, géré par un seul état. Du fait que les activités aéronautiques et maritimes sont internationales, le choix d'un moyen de navigation présuppose une large concertation pour s'assurer que le contrôle et que la mise en œuvre soient compatibles avec les souverainetés nationales.

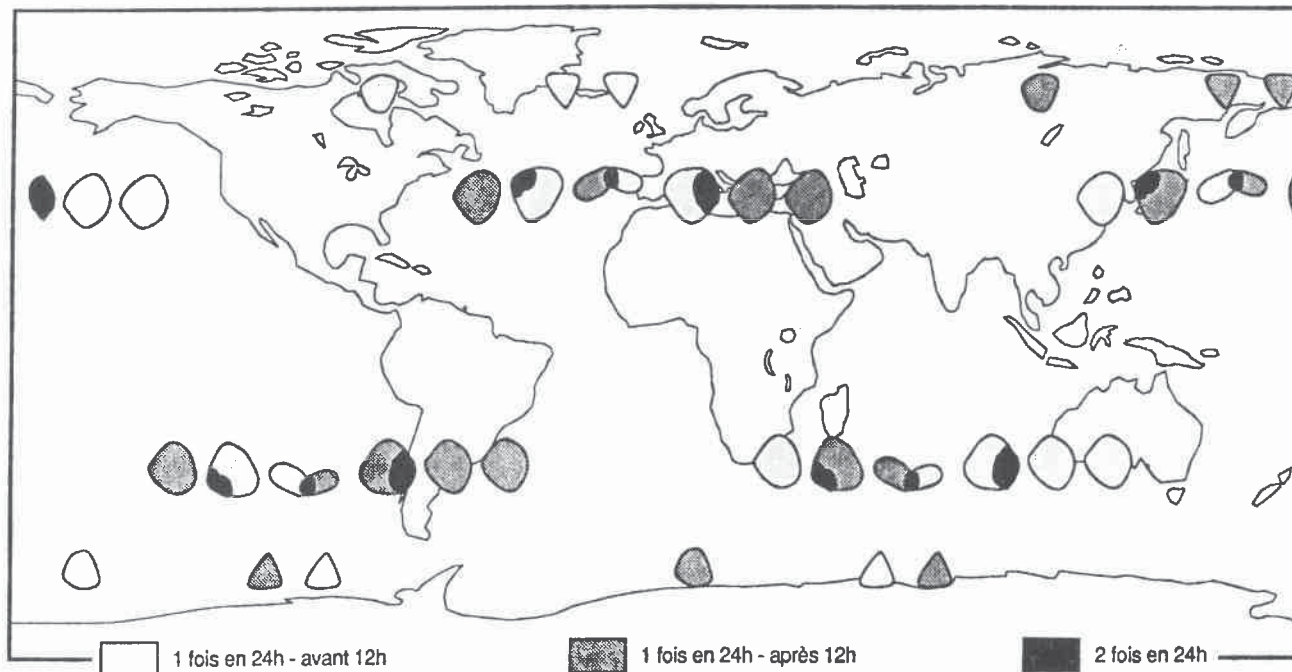
— *la continuité du service* : Avec la constellation définitive, des "trous" dans la localisation peuvent apparaître lorsque moins de 4 satellites sont visibles ou lorsque la dilution géométrique de précision

est trop importante pour garantir une précision satisfaisante dans les 3 dimensions. Des trous, d'une durée de 30 à 35 mn, peuvent apparaître une ou plusieurs fois par jour (fig. 11) et un mauvais fonctionnement d'un ou plusieurs satellites aggraverait considérablement la situation. Ce défaut est en particulier fort dommageable dans une perspective d'utilisation de GPS pour le contrôle aérien.

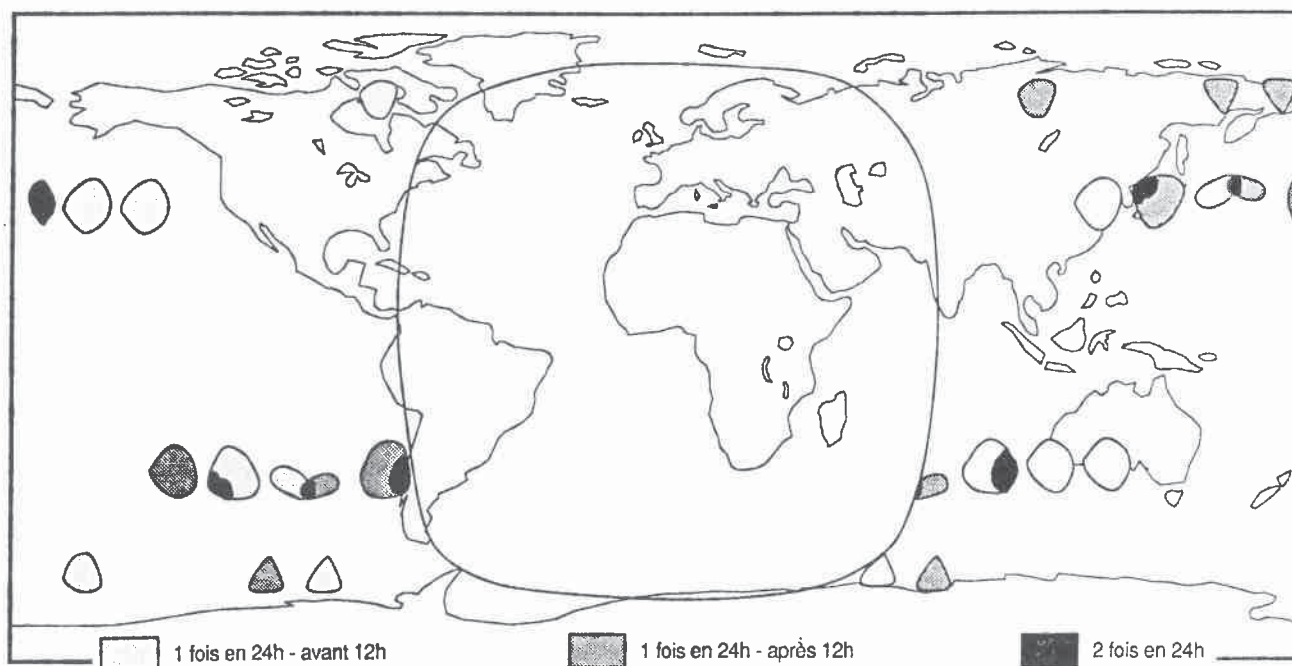
On peut pallier ces inconvénients, au moins partiellement, soit :

- en couplant GPS avec une autre système tel que LORAN ou une centrale à inertie, ou encore un pseudolite (pseudo satellite GPS qui émet depuis la terre en VHF un signal compatible avec ceux de GPS) ;

- en profitant de l'avantage de l'existence de GPS en le complétant localement pour diminuer les problèmes de continuité et d'intégrité précédemment évoqués. Le CNES étudie ainsi la possibilité d'installer à bord d'un satellite géostationnaire déjà programmé, un répéteur d'informations transmises depuis une station de contrôle au sol en bande C ou KU (peu sensibles aux perturbations atmosphériques). Le message relayé concernerait l'état observé de la constellation et comprendrait un signal de navigation compatible avec le format de mesure GPS qui compléterait ainsi la constellation. Un seul satellite géostationnaire situé par 0° de longitude suffirait à éliminer les trous précédemment signalés en zone Atlantique (fig. 12).



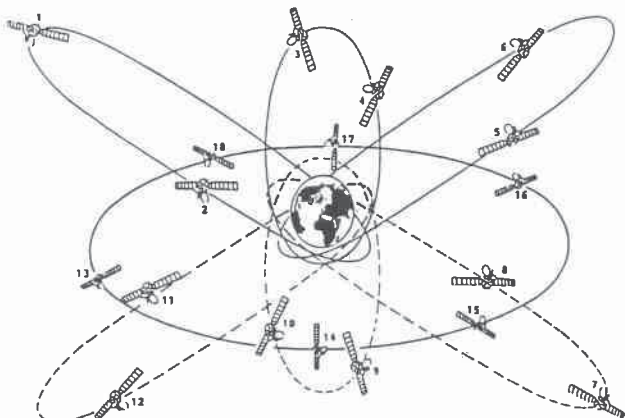
— Figure 11 : Défauts dans la couverture GPS.



— Figure 12 : Apports d'un pseudo satellite GPS géostationnaire.

4 - Si la solution proposée par le CNES répond à certaines des critiques formulées à l'encontre de GPS (continuité, intégrité, contrôle), d'autres aspects que l'on voudrait prendre en considération (tels que la fonction messagerie) ou mieux maîtriser (comme le coût des récepteurs : un système civil n'exige pas la sophistication du système GPS militaire où les contraintes dynamiques et de résistance à la contre-mesure sont sévères) font que des études sont menées en Europe en particulier, pour rechercher une solution peu (?) onéreuse, internationale, se substituant à GPS. Par exemple, la RFA a développé le concept GRANAS qui ressemble passablement au système GPS ou l'ASE NAVSAT. Je ne vais pas ici détailler l'évolution de ces systèmes spatiaux depuis les premières études de faisabilité, mais je vais rapidement présenter le dernier concept de l'ASE regroupant NAVSAT et GRANAS en un seul projet.

La constellation définitive comprend 6 satellites géostationnaires et 12 satellites défilant sur une orbite fortement elliptique. L'intérêt d'une telle configuration est la possibilité d'un déploiement progressif ou limité à une partie du monde : par exemple, avec 2 satellites géostationnaires et 3 elliptiques, on couvre l'Atlantique Nord et avec 2 géostationnaires de plus, le Pacifique (fig. 13).



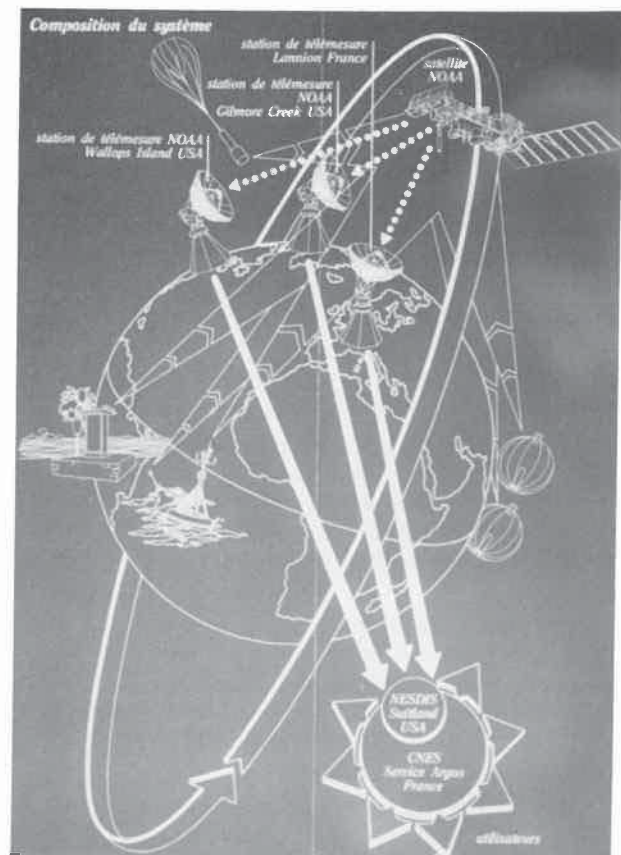
— Figure 13 : Constellation NAVSAT.

Chaque satellite émet séquentiellement, suivant un cadencement prédéterminé, un code pseudo-aléatoire sur des fréquences analogues à celles de GPS. La mesure peut être soit une pseudo-distance et la précision est comparable à celle du code P de GPS, soit un Doppler sur la fréquence transmise. Les créneaux de temps non utilisés par les satellites pour la fonction LOCALISATION sont mis à profit pour assurer le service messagerie.

Cette partie de mon exposé consacrée aux systèmes spatiaux de navigation ne serait pas complète si je n'indiquais pas les moyens mis en œuvre par les Soviétiques TSIKADA et GLONASS, frères jumeaux de TRANSIT et GPS.

SATELLITES DESTINES AU POSITIONNEMENT

Cette deuxième catégorie de satellites concerne le positionnement d'objets divers et pour lesquels



— Figure 14 : Principe du système ARGOS.

il n'est pas besoin que le mobile ait connaissance du résultat de la localisation : ces programmes spatiaux assurent à côté de la fonction localisation, la transmission de messages relativement courts.

1 - Premier système opérationnel pour la localisation accompagnée de la collecte de données, Argos résulte d'une coopération franco-américaine qui fonctionne depuis 1978.

Il utilise deux satellites météorologiques TIROS de la NOAA, qui décrivent des orbites typiques de satellites d'observation de la terre, c'est-à-dire quasi polaires, héliosynchrones et circulaires. Sur ces deux satellites, le segment spatial ARGOS est embarqué en passager (fig. 14).

Une balise ARGOS émet à la fréquence 401,6 MHz pendant une seconde un signal modulé par un message qui identifie la balise et contient (éventuellement) les données collectées. L'émission est reprise, selon une cadence propre à chaque balise, toutes les 40 à 60 secondes (ramenés à 100 ou 200 s si la localisation du mobile n'est pas nécessaire). Chaque balise est en vue d'un satellite TIROS de 6 à 28 fois par jour.

L'instrument embarqué à bord de TIROS est un récepteur qui capte les émissions des balises en visibilité suivant un accès aléatoire. En effet, les messages des différentes balises sont répartis dans le temps grâce à la non synchronisation des émetteurs et à l'utilisation de périodes de répétition aléatoires, et répartis en fréquence puisque le Doppler relatif résulte d'une répartition géographique aléa-

toire des plates-formes vis-à-vis du satellite. L'instrument ARGOS peut ainsi traiter simultanément 1 000 plates-formes (200 si la localisation est demandée).

Les données enregistrées sont transmises aux stations de collecte, qui relaient vers le centre NOAA de Washington où les messages propres à ARGOS sont séparés et relayés au centre de traitement du CNES à Toulouse.

Là, la localisation des plates-formes est calculée à partir des mesures du décalage Doppler sur la fréquence des messages reçus : les messages sont décodés et transmis à l'utilisateur dans un délai de 1 h 45' à 3 h 30'.

Une balise ARGOS est un instrument modeste par son poids, sa consommation en électricité et son coût. De ce fait, les applications sont nombreuses et le service ARGOS indiquait en 1986 qu'il y avait 2 400 plates-formes enregistrées et 900 en opération.

Les balises sont bien adaptées à la collecte d'informations météorologiques ou océanographiques (60 % des applications) et au suivi sur de longues périodes de plates-formes dérivantes (migration d'animaux, estimation de la circulation lagrangienne, contrôle de navires...).

La précision de localisation est meilleure que le kilomètre (meilleure que 500 m dans 95 % des cas si la stabilité de l'oscillateur est suffisante). Un service nouveau permet d'obtenir au point fixe une position en relatif à 50 m près, ce qui est estimable eu égard à la modicité de l'appareillage.

2 - Un dérivé remarquable d'ARGOS est le système SARTS COSPAS, fruit d'une concertation entre Français, Américains, Canadiens et Soviétiques.

Il est destiné à la localisation des appels de détresse. Les satellites utilisés sont les TIROS de la NOAA complétés par les COSPAS Soviétiques. Initialement, le système fonctionnait sur les fréquences 121,5 MHz et 243 MHz qui sont réservées à l'envoi de messages de détresse civils et militaires, mais l'emploi de la fréquence 406 MHz est appelé à se généraliser.

En cas de détresse, une balise émet 0,5 s toutes les 50 secondes et ce, pendant 24 heures. Sur 121,5 MHz, le signal est retransmis par le satellite directement vers une station de collecte. A 406 MHz, il est possible d'enregistrer ce signal à bord du satellite jusqu'à ce qu'il soit en visibilité d'une station de réception (la probabilité de détection au 1^{er} passage d'un satellite est alors de 98 % et celle de localisation de 90 %).

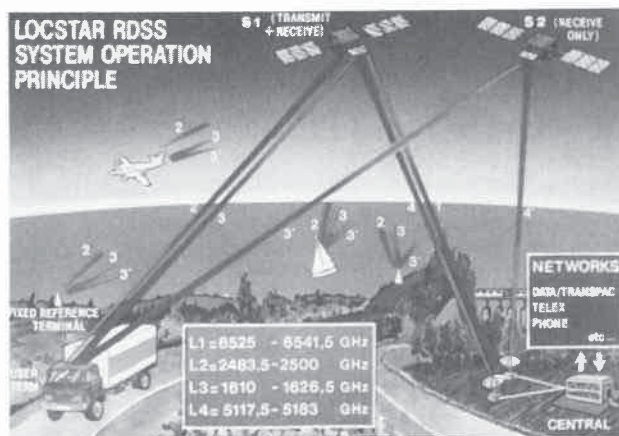
La précision de localisation est modeste (5 km à 406 MHz et 17 km à 121,5 MHz) mais ce qui compte avant tout dans un tel système, c'est la sûreté de fonctionnement d'un ensemble mondial de satellites, de stations de réception et de milliers de balises de diverses nationalités.

3 - Après cette parenthèse, je vais revenir sur les critiques qui sont faites d'ARGOS. Le défaut principal est de ne proposer qu'une localisation discon-

tinue et relativement modeste en précision : en outre, le service messagerie est à sens unique du mobile vers une base. Deux systèmes GEOSTAR aux Etats-Unis et LOCSTAR en France sont à l'état de projet avancé et proposent un service performant répondant aux critiques des utilisateurs d'ARGOS, et permettant d'élargir pour de nombreuses applications nouvelles le club des utilisateurs de moyens spatiaux.

- Les systèmes LOCSTAR et GEOSTAR comprennent 3 fonctions : radiolocalisation, radionavigation et messagerie.

La position est obtenue par la mesure des distances du mobile à deux satellites géostationnaires (fig. 15). Si l'altitude du mobile est connue à 5 mètres près, la précision du positionnement horizontal est d'environ 10 m aux latitudes moyennes (un peu moins bonne en latitude au voisinage de l'équateur).



— Figure 15 : Principe des systèmes LOCSTAR et GEOSTAR.

La donnée d'altitude peut être fournie par un altimètre (cas des avions) et/ou résulter d'un MNT pour les mobiles terrestres et maritimes.

Toutes les distances sont déterminées dans un mode différentiel par rapport à des stations de référence situées dans la même zone que le mobile : on élimine ainsi les erreurs liées à la propagation et à la localisation du satellite.

Avec un 3^e satellite géostationnaire, il serait également possible de déterminer l'altitude des objets, mais la précision serait hectométrique.

- Le système est gourmand en fréquences (4 gammes 6,5 - 2,5 - 5,1 et 1,6 GHz) et si GEOSTAR s'est vu attribuer l'autorisation de les utiliser, pour LOCSTAR les pourparlers sont en cours.

- Le processus complet de mesure dure 0,6 s. Le central diffuse une base de temps qui est relayée par un des satellites vers les mobiles. Après synchronisation sur cette base de temps, les mobiles émettent à leur tour et leur réponse est relayée vers le centre de traitement par les deux satellites.

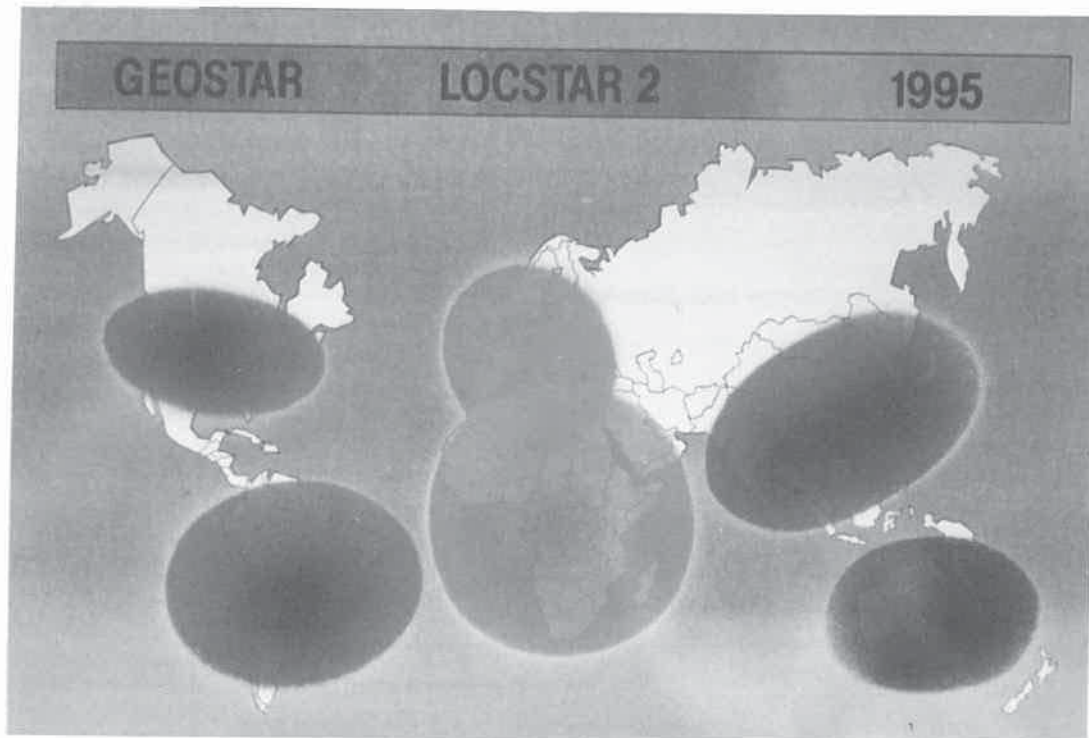
Les transmissions sont faites en utilisant des codes pseudo-aléatoires et les constantes de retard sont propres à chaque mobile. La position est calculée par le central d'après le temps de réponse des mobiles au message de synchronisation. La position et un message sont transmis par le central vers le mobile et/ou sa base : le mobile accuse réception et émet à son tour un message d'une centaine de caractères.

- LOCSTAR 1 permettra en 1991 d'adresser 500 000 mobiles par heure en Europe et Moyen-

Orient. GEOSTAR (dont le premier satellite a été mis en orbite par ARIANE le 11 mars 1988) couvrira dans le même temps l'Amérique du Nord.

Dans une deuxième étape (1995), LOCSTAR 2 et GEOSTAR permettront d'adresser 40 millions d'abonnés dans les zones indiquées en figure 16.

Les principes de LOCSTAR et de GEOSTAR sont suffisamment simples tant pour le segment spatial que pour les utilisateurs, pour que les perspectives qu'ils ouvrent soient considérables.



— Figure 16 : Couverture des projets LOCSTAR et GEOSTAR.

CONCLUSION

Dans un tableau final, j'ai rassemblé les moyens de localisation spatiaux actuels et futurs que j'ai présentés au cours de cet exposé et dont j'ai discuté les évolutions et l'adéquation aux besoins. J'ai, en outre, indiqué quelques projets utiles pour résoudre le problème général de la navigation.

Ainsi, le navigateur peut-il trouver une aide à travers les satellites altimétriques par exemple, dont la décision de lancement est motivée par des besoins géophysiques ou océanographiques. La mesure de l'altitude du satellite au-dessus d'un océan permet, connaissant la position du satellite, de définir une surface instantanée qui est la somme du géoïde et des composantes océanographiques (marée, houle, courants) ; une bonne connaissance du géoïde permet une meilleure précision des éphémérides prédites et est souvent nécessaire au navigateur pour initialiser ses récepteurs : celle des composantes océanographiques peut être utilisée pour le routage des navires.

Les satellites d'observations eux, ont pour objectif d'améliorer la connaissance de l'environnement

en acquérant des données cartographiques ou des paramètres physiques sur une grande échelle.

Une attention particulière aurait pu être appelée sur le projet de détermination précise d'orbite DORIS : non seulement, il permettra dès 1989 de connaître la trajectoire des satellites sur lesquels il sera embarqué, avec une précision meilleure que le mètre, en faisant référence à un réseau mondial de balises terrestres, mais on pourra compléter temporairement ce réseau d'orbitographie par des balises dont la position sera à son tour calculée en absolu avec une précision décimétrique à l'échelle du globe.

Je n'ai bien sûr plus le temps de développer la présentation de ces différents projets, mais je pense qu'il était nécessaire de les évoquer dans la mesure où les différents satellites de localisation sont des outils dont l'utilisation optimale passe, aussi, par une bonne connaissance de l'environnement géophysique.

SATELLITES DE NAVIGATION	opérationnels : TRANSIT/TSIKADA en développement : GPS - GLONASS en projet : NAVSAT - GRANAS
SATELLITES DE POSITIONNEMENT	opérationnels : ARGOS - SARSAT en développement : GEOSTAR - LOCSTAR
EXEMPLES DE PROJETS SPATIAUX CONCERNANT LA NAVIGATION :	
Altimètres : SEASAT - GEOSAT - TOPEX/POSEIDON - ERS1...	
Observation : METEOSAT - TIROS - LANDSAT - SPOT - ERS1...	
Détermination d'orbites : DORIS - PRARE...	

Quelques références bibliographiques

— **B. Schrumph**

"Localisation par satellites - Situation actuelle et perspectives".

Rapport de synthèse n° 9 du Colloque FI3G - 1987.

— **A. Fourgassie**

"Emploi du GPS en hydrographie".

Actes du 3^e Colloque National sur la Localisation en Mer - 1988.

— **G. Frachon - D. Hernandez**

"LOCSTAR : un système de radiorepérage par satellites".

Actes du 3^e Colloque National sur la Localisation en Mer - 1988.

— **P. Paquet**

"Les systèmes Transit et GPS".

Série géophysique n° 146 de l'observatoire royal de Belgique - 1984.

— **T.A. Stansell**

"GPS perspectives".

International Navigation Congress - Sydney - 1988.

— **G. Ploeger et all.**

"The european proposal of a civil satellite - based system for integrated navigation and communication".

International Navigation Congress - Sydney - 1988.

— **G. Nard - G. Bonin**

"Différentes méthodes d'applications de GPS différentiel et résultats d'essais".

Document SERCEL présenté à la journée SEE section 23 du 11.2.87.

Certaines figures ont été empruntées à ces articles ainsi qu'à des dépliants réalisés par WILD HEERBRUGG ; SERCEL, le CNES.



**Le récepteur
GPS / NAVSTAR**

**1 SEUL EQUIPEMENT
5 APPLICATIONS**

- Navigation directe
- Navigation différentielle
- Positionnement géodésique
- Tracking
- Mesure de temps





STERNE S.A.

22, rue de Lourmel - 75015 PARIS - Tél. : (1) 45.75.62.72
Télex : 200 168 F STERNE - Fax : (1) 45.79.07.24

Distributeur exclusif MOTOROLA

Ascendance Graphique