

## TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

## SYSTEME SYLOSAT DE LOCALISATION PRECISE PAR SATELLITES TRANSIT

M. Jacques SOULIER (C.S.E.E.)

M. Pierre BERENGUIER (S.A.T.)

---

PRINCIPE DU SYSTEME

**RESUME :** L'analyse du glissement Doppler d'une fréquence émise par un satellite, pendant un intervalle de temps connu, permet de déduire la variation de distance radiale entre le point d'observation et les deux positions successives du satellite, donc de définir un hyperboloïde sur lequel se trouve ce point d'observation. En utilisant le message que le satellite diffuse périodiquement pour préciser sa propre trajectoire, et en combinant, dans un calculateur, les intersections des différents hyperboloïdes correspondant à plusieurs intervalles de temps successifs, on obtient la position du point d'observation.

Afin d'obtenir, entre deux passages de satellites Transit, une indication continue de la position du mobile, il faut fournir au calculateur les moyens d'entretenir une estime.

**SUMMARY**THE SYSTEM THEORETICAL BASIS

Analyzing the Doppler shift of a frequency emitted by the satellite during a given time interval allows deriving the slant range variation between the observation point and the two satellite positions in succession, thus defining the hyperboloid on which this observation point is located. Using the message the satellite is periodically emitting in order to specify its own trajectory and associating, inside a computer, the intersections of the various hyperboloids corresponding to successive time intervals, one can figure out the position of the observation point.

In order to get a continuous estimate of the mobile position between two successive satellite passages, one has to provide the computer with dead reckoning means.

---

Se localiser avec de plus en plus de précision est vraiment un problème de notre temps. Que ce soit sur mer, sur terre ou dans les airs, dans un grand nombre d'applications, l'homme a besoin de connaître à tous moments et en tous lieux le point précis où il se trouve.

Depuis quelques années, de nombreux moyens de radionavigation ont été développés et ont fait leur apparition sur le marché : systèmes OMEGA, LORAN, DECCA, TORAN, système de navigation par satellites, etc.

Parmi tous ces moyens, seul, le système de navigation par satellites TRANSIT présente à la fois tous les avantages suivants :

- couverture mondiale par tous temps, de jour comme de nuit
- précision meilleure que 0,1 mille nautique
- automaticité complète.

Depuis 1964, la COMPAGNIE DE SIGNAUX ET D'ENTREPRISES ELECTRIQUES (C.S.E.E.) et la SOCIETE ANONYME DE TELECOMMUNICATIONS (S.A.T.), qui constituent avec la S.A.G.E.M. le groupe G 3 S, ont travaillé sur les problèmes posés par la poursuite DOPPLER des satellites.

Compte tenu de leur expérience réciproque, ces 2 Sociétés ont étudié, développé et réalisé en commun le système SYLOSAT de localisation par satellites TRANSIT décrit ci-après.

#### 1. - RAPPELS SUCCINCTS SUR LA NAVIGATION PAR SATELLITES TRANSIT -

Le système de navigation par satellites de l'U.S. NAVY, souvent appelé système TRANSIT ou NAVSAT, est opérationnel depuis 1964 et ouvert aux usagers civils depuis 1967.

L'emploi des satellites pour résoudre le problème de la radio-localisation des navires a permis de supprimer ou réduire considérablement les principaux inconvénients des systèmes à base terrestre, à savoir :

- portée insuffisante
- nécessité d'un grand nombre de stations fixes
- réduction des performances la nuit, due à la propagation.

Le système TRANSIT apporte aux navigateurs les avantages suivants :

- couverture mondiale
- grande précision par tous temps aussi bien de jour que de nuit
- récepteurs de bord de faible volume, d'installation aisée et d'exploitation automatique.

Il constitue essentiellement un système de recalage qui permet au navigateur d'obtenir un point précis à partir des données



---

recueillies par le récepteur de bord pendant un passage d'un satellite TRANSIT au-dessus de l'horizon du navigateur.

La fréquence de passage des satellites pour un navigateur donné dépend de sa latitude. Cette fréquence de passage est minimum à l'équateur, latitude pour laquelle l'intervalle moyen entre deux passages n'est pas supérieur à deux heures, ce qui suffit à l'exploitation maritime.

#### 1,1 - LE SYSTEME TRANSIT -

##### 1,11 - Principe -

En 1958, deux savants du Laboratoire de Physique Appliquée de l'Université JOHN HOPKINS découvrent qu'il est possible de déterminer avec précision la position du satellite SPOUTNIK par des stations terrestres fixes mesurant la dérive DOPPLER qui affecte les signaux radio émis par le satellite.

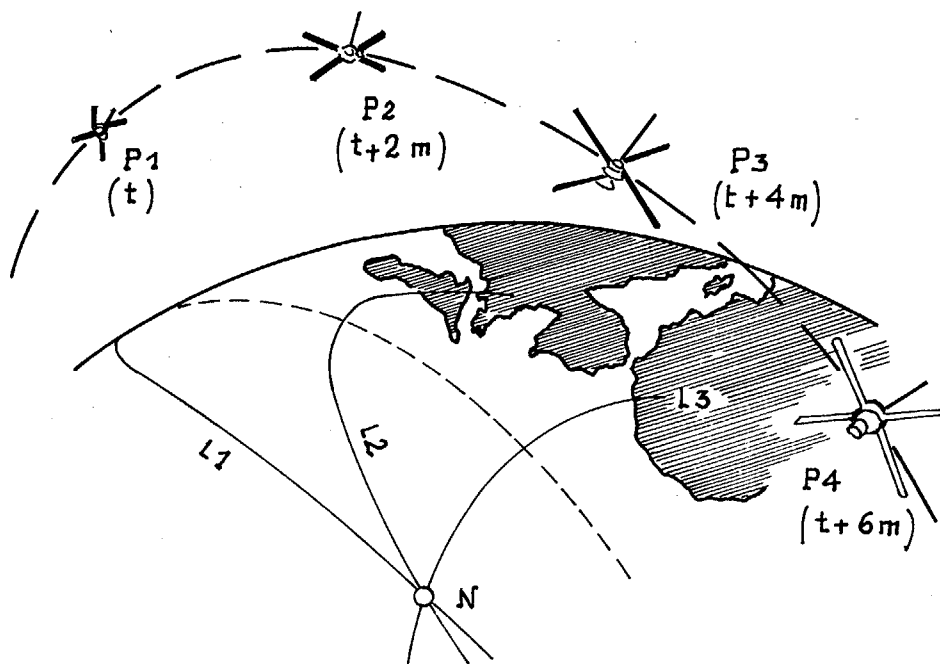
L'effet DOPPLER est un phénomène très général, découvert en 1842, qui affecte toute fréquence captée par un récepteur en mouvement par rapport à la source d'ondes radioélectriques.

Une fois prouvée l'efficacité d'une technique de localisation de satellite par mesure de l'effet DOPPLER, il est naturel d'utiliser la même technique pour déterminer la position d'une station terrestre connaissant la position du satellite tournant autour de la terre.

Dans le système TRANSIT, les positions successives du satellite sur son orbite sont calculées par un réseau de stations terrestres fixes, injectées dans la mémoire de celui-ci par une station spéciale et diffusées en permanence par le satellite lui-même sous forme d'un message de données numériques. La même émission radio sert à la fois à la mesure de l'effet DOPPLER et à la transmission des données de position du satellite.

De plus, cette émission radio comporte des repères de temps nécessaires au type particulier de mesure de l'effet DOPPLER effectuée par le récepteur du navigateur. Soient  $t_1, t_2, \dots, t_n, \dots$  les repères de temps donnés, il est possible de donner une interprétation géométrique de cette mesure DOPPLER.

Le système TRANSIT peut être considéré comme un système hyperbolique de radionavigation, au même titre que les systèmes LORAN, DECCA, ..., mais le rôle des stations émettrices fixes de ces derniers est joué, dans le système TRANSIT, par les positions successives  $P_1, P_2, \dots$ , d'un satellite aux instants  $t_1, t_2, \dots$



En sachant mesurer la différence  $\Delta_{12}$  des distances de la position inconnue du navire N aux deux points P1 et P2, il est possible de construire l'hyperboloïde de révolution de foyers P1 et P2, lieu des points M tels que :

$$MP1 - MP2 = \Delta_{12}$$

L'intersection de cet hyperboloïde avec la surface terrestre définit une première ligne de position L1. L'arc d'orbite suivant déterminé par les positions P2 et P3 du satellite fournit de même une deuxième mesure DOPPLER  $\Delta_{23}$  d'où un deuxième hyperboloïde, lieu des points M tels que :

$$MP2 - MP3 = \Delta_{23}$$

L'intersection de cet hyperboloïde avec la surface terrestre définit une deuxième ligne de position L2, qui coupe L1 au point N cherché.

Les repères de temps  $t_1, t_2, \dots$  sont émis toutes les 2 minutes. La vitesse du satellite étant d'environ 7,3 km/s, les distances P1 P2, P2 P3 ... sont de l'ordre de 850 km, ce qui constitue des bases de mesure de longueur raisonnable pour un système hyperbolique utilisant des fréquences de longueur d'onde voisine du mètre.




---

1,12 - Description du système -

Le système TRANSIT est composé de :

1,121 - Un nombre illimité d'utilisateurs -

1,122 - Un réseau de stations fixes au sol comprenant :

- . 4 stations de poursuite, situées respectivement à Hawaï, en Californie, dans le Minnesota, et dans le Maine. Ces stations font des mesures d'effet DOPPLER sur les signaux des satellites et transmettent leurs résultats à un centre de calcul
- . le centre de calcul, situé à Point Mugu en Californie. Ce centre traite les résultats, détermine l'orbite de chaque satellite et extrapole chaque orbite une journée à l'avance. Il élabore alors un message de données numériques décrivant l'orbite prévue et le transmet à une station d'injection.
- . les stations d'injection, au nombre de 2, situées à Point Mugu et au Minnesota. Elles retransmettent ce message au satellite correspondant pendant l'un de ses passages. Chaque satellite reçoit un nouveau message toutes les 12 heures environ mais dispose d'une capacité de mémoire qui lui permet de fonctionner pendant 16 heures sans être rechargé
- . l'Observatoire Naval qui fournit au réseau le temps universel TU sur lequel il est synchronisé. Le temps universel TU est à l'échelle de temps utilisée pour les calculs d'orbitographie
- . le centre de contrôle du groupe Astronautique de l'U.S. Navy, qui dirige l'exploitation de ce réseau au sol à partir de la Californie.

1,123 - Actuellement (1973) six satellites -

Leurs orbites forment une sorte de cage autour de la terre, chaque orbite est polaire et circulaire, l'altitude étant de 1 070 à 1 100 km. Les plans d'orbite sont espacés en longitude de manière à répartir dans le temps les passages en visibilité pour un observateur terrestre.

La période de révolution de chaque satellite est de 107 à 108 minutes, soit 13,5 révolutions par jour. A la latitude de PARIS, 49° environ, chaque satellite passe en visibilité 7 fois par jour : par exemple, 4 passages consécutifs dans le sens sud-nord, 3 passages dans le sens nord-sud, 12 heures après en moyenne. La rotation de la terre sur elle-même fait que le mouvement apparent du satellite a toujours une composante vers l'ouest, ce qui fait que dans une série de passages, le premier est à l'est de l'observateur, le dernier à l'ouest.

Les satellites TRANSIT sont stabilisés sur la verticale par gradient de gravité. Leur antenne dirigée vers la terre a un diagramme de rayonnement tel que la puissance reçue varie peu dans la zone de visibilité. La puissance émise en permanence est d'environ 1 watt sur deux fréquences cohérentes, c'est-à-dire issues du même oscillateur à grande stabilité (quelques  $10^{-10}$  par jour).

Les fréquences émises ont pour valeurs nominales :

399 968 et 149 988 kHz.

Ces fréquences sont volontairement décalées de 80 Hz par MHz, des valeurs rondes 400 et 150 MHz. Elles sont, toutes deux, modulées en phases par les messages de données.

Les satellites émettent deux fréquences et non une seule pour la raison suivante : la traversée de l'ionosphère par le signal entraîne une variation de la fréquence reçue qui se superpose à l'effet DOPPLER et en est indiscernable. Pour s'affranchir de cet effet parasite qui pourrait entraîner une erreur de localisation allant jusqu'à 1 km, il faut utiliser le fait que l'ionosphère étant un milieu dispersif, cet effet parasite varie avec la fréquence du signal, ce qui permet de l'éliminer presque totalement en formant une combinaison pondérée des deux fréquences reçues. C'est pourquoi les fréquences émises sont dans le rapport 8/3.

#### 1,13 - Description du message -

Chaque message élémentaire dure 120 secondes, temps du satellite, et comprend 6 103 bits répartis en 156 mots de 39 bits et un 157ème mot de 19 bits. Le mot n° 3 est le top audible, les mots 1 et 2 servent à la synchronisation. Un mot sur 6 seulement est utile à la navigation. Les mots 56, 62, ... 128 définissent une ellipse képlérienne moyenne et sont appelés mots képlériens ou fixes car ils ne changent qu'au moment des injections ; les mots 8, 14, ... 50, dits "éphéméraux" ou variables, donnent les corrections à apporter à cette ellipse moyenne pour les positions occupées aux instants :

$tK - 6, tK - 4, tK - 2, tK, tK + 2, \dots tK + 8,$   
si  $tK$  est l'instant du début de message (en minutes).

Par comparaison de deux messages successifs, il est possible de remarquer que les mots fixes sont identiques, et que les mots "éphéméraux" ont avancé d'une ligne, un mot ancien disparaissant, un mot nouveau apparaissant.

Les 39 bits d'un mot utile sont employés de la façon suivante :

- les trois derniers sont des bits de contrôle



- les 36 premiers sont significatifs et se décomposent en  $9 \times 4$  bits correspondant à 9 chiffres décimaux codés en binaire par l'intermédiaire du code "excédent 3".

#### 1,14 - Procédé de mesure DOPPLER -

##### 1,141 - Rôle des repères de temps -

Les repères de temps  $t_1, t_2, t_3, \dots$  contenus dans les messages sont utilisés lors de la mesure DOPPLER faite au sol. Ces repères sont, par définition, les instants qui séparent les mots n° 2 des mots n° 3, c'est-à-dire les débuts des tops audibles.

Ces repères ont un triple rôle :

- ils sont maintenus en coïncidence avec les minutes paires de l'échelle de temps TU de l'Observatoire Naval des Etats-Unis (U.S.N.O.) avec une précision absolue de 0,1 milliseconde environ. Cette précision est amplement suffisante pour les besoins de la navigation car une erreur de 0,1 milliseconde sur le temps correspond à une erreur de 73 cm sur la position d'un satellite se déplaçant à 7,3 km/s. Grâce à ces repères de temps, le système TRANSIT peut être utilisé comme un distributeur mondial de temps et servir à la synchronisation de stations éloignées ;
- les corrections d'ellipse contenues dans les mots éphéméraires sont valables pour les instants  $t_1, t_2, \dots$ . Il est possible d'en déduire par interpolation les corrections à appliquer pour d'autres instants, mais le système est plus simple si les mesures et calculs ne font intervenir que les repères de temps  $t_1, t_2, t_3 \dots$
- la réception des repères de temps déclenche les mesures DOPPLER. Celles-ci sont faites par intégration selon une méthode appelée méthode de l'intégrale DOPPLER ou mesure DOPPLER intégrée.

##### 1,142 - Méthode de l'intégrale DOPPLER -

Dans ce qui suit, l'exposé est fait pour la fréquence reçue, voisine de 400 MHz, alors que le satellite émet deux fréquences, l'une voisine de 400 MHz, l'autre voisine de 150 MHz, à partir desquelles peut être effectuée la correction de la réfraction ionosphérique. L'emploi de 2 fréquences et la correction ionosphérique ne changent pas le principe de la méthode.

Au récepteur de bord est associé un étalon de fréquence à quartz, de stabilité comparable à celle de l'oscillateur des satellites. A partir de cet étalon, est obtenue une fréquence de référence  $f_0$  égale à 400 MHz, valeur ronde aux dérives près.

La fréquence du signal reçu  $f_r$  varie au cours du passage selon la loi :

$$f_r(t) = f_s \left[ 1 - \frac{D'(t)}{c} \right]$$

équation dans laquelle :

$f_s$  est la fréquence émise par le satellite et considérée comme constante (399 968 kHz) pendant la durée du passage

$D'(t)$  est la vitesse radiale, c'est-à-dire la dérivée de la distance  $D(t)$  entre le satellite et le récepteur

$c$  est la vitesse de la lumière.

La méthode consiste à :

- former le battement  $f_s - f_r(t) = f_D(t)$ , souvent appelé fréquence DOPPLER. La fréquence de ce battement est située dans la plage  $32 \pm 8$  kHz, pour la voie 400 MHz, quel que soit le passage ;
- compter le nombre de cycles  $f_D(t)$  qui apparaissent entre 2 repères de temps reçus du satellite. Le résultat ou compte DOPPLER n'est autre que l'intégrale de  $f_D(t)$  prise entre les deux repères de temps ou tops.

Les tops émis par le satellite aux temps  $t_1$  et  $t_2$  sont reçus au sol aux temps  $t_1 + \Delta t_1$  et  $t_2 + \Delta t_2$ ,  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  étant les temps de propagation du signal depuis le satellite jusqu'au récepteur, la propagation s'effectuant à la vitesse de la lumière:

$$\Delta t_1 = \frac{D(t_1)}{c} \quad \text{et} \quad \Delta t_2 = \frac{D(t_2)}{c}$$

$D(t)$  étant la valeur de distance satellite-récepteur au temps  $t$ .

Le compte DOPPLER, effectué entre les deux instants  $t_1 + \Delta t_1$  et  $t_2 + \Delta t_2$  peut s'écrire :

$$N_{12} = \int_{t_1 + \Delta t_1}^{t_2 + \Delta t_2} f_o - f_r(t) dt$$

Cette expression peut se décomposer en deux termes :

$$N_{12} = \int_{t_1 + \Delta t_1}^{t_2 + \Delta t_2} f_o dt - \int_{t_1 + \Delta t_1}^{t_2 + \Delta t_2} f_r(t) dt$$





Le deuxième terme de cette expression représente le nombre de cycles reçus par le récepteur entre la réception du 1er top et celle du 2me. Ce nombre est égal au nombre de cycles émis par le satellite à la fréquence  $f_s$  entre l'émission ( $t_1$ ) du 1er top et l'émission ( $t_2$ ) du 2me.

L'expression peut s'écrire :

$$N_{12} = \int_{t_1}^{t_2 + \Delta t_2} f_o dt - \int_{t_1}^{t_2} f_s dt$$

Les fréquences  $f_o$  et  $f_s$  étant supposées constantes durant le passage :

$$N_{12} = f_o \left[ (t_2 - t_1) + (\Delta t_2 - \Delta t_1) \right] - f_s (t_2 - t_1)$$

soit 
$$N_{12} = (f_o - f_s) (t_2 - t_1) + f_o (\Delta t_2 - \Delta t_1)$$

soit 
$$N_{12} = (f_o - f_s) (t_2 - t_1) + \frac{f_o}{c} \left[ D(t_2) - D(t_1) \right]$$

Pour les valeurs nominales de  $f_o$  et  $f_s$  et en appelant  $\lambda_o$  la longueur d'onde correspondant à  $f_o$  dans le vide (0,75 m pour 400 MHz) :

$$f_o - f_s = 400\,000\,000 - 399\,968\,000 = 32\,000 \text{ Hz}$$

$$t_2 - t_1 = 120 \text{ secondes}$$

$$N_{12} = 3\,840\,000 + \frac{D(t_2) - D(t_1)}{\lambda_o}$$

La variation de distance radiale  $D(t_2) - D(t_1)$  appelée  $\Delta_{12}$  est proportionnelle au compte DOPPLER fourni par le récepteur au sol et égale à :

$$\Delta_{12} = \lambda_o (N_{12} - 3\,840\,000)$$

Les oscillateurs à quartz des satellites et des récepteurs au sol sont suffisamment stables pour que l'erreur due à leurs variations de fréquence pendant un passage soit négligeable

---

mais, à long terme, ils s'écartent de leurs valeurs nominales (quelques  $10^{-10}$  par jour). C'est pourquoi le terme :

$$(f_o - f_s) (t_{n+1} - t_n)$$

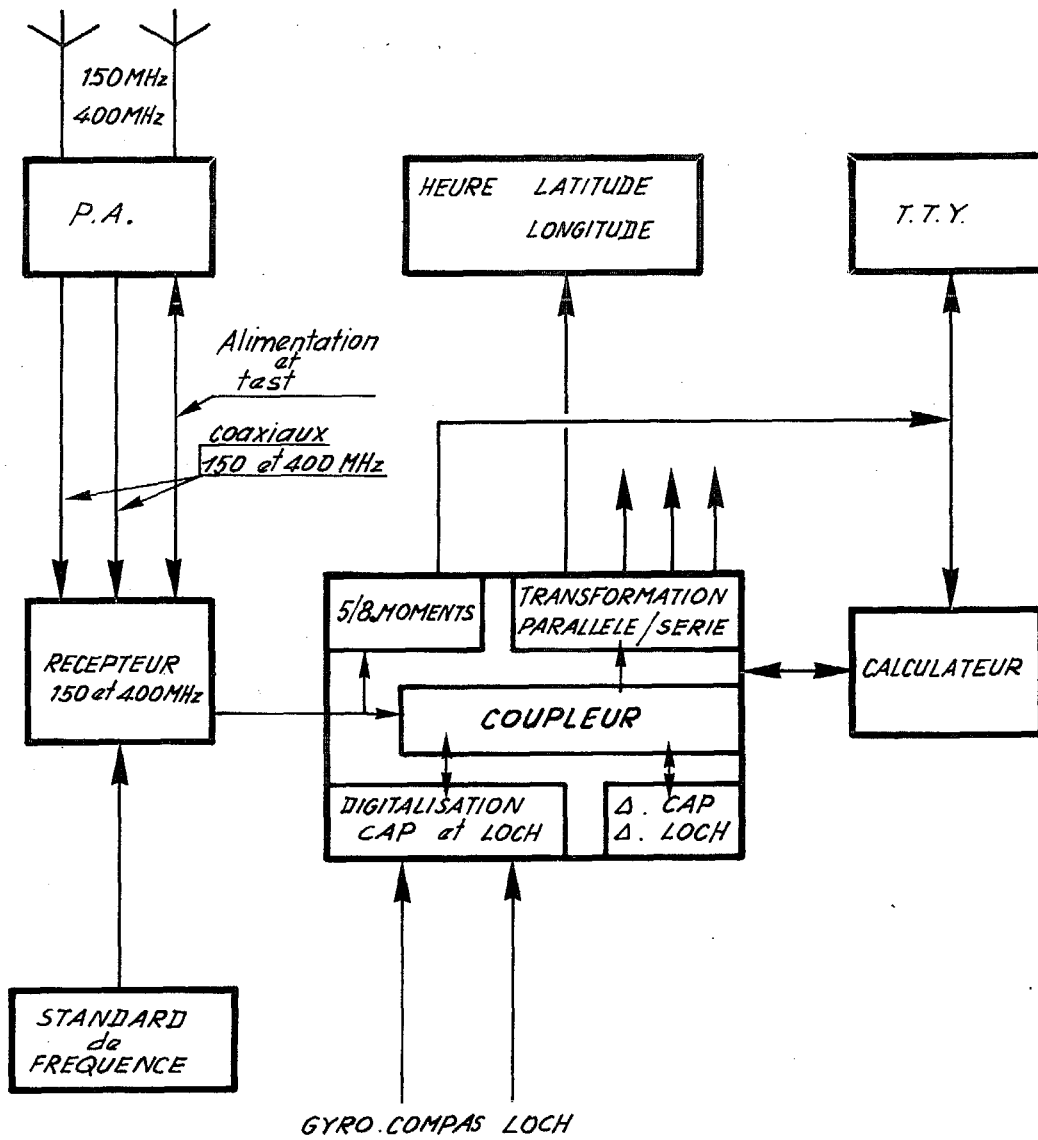
est considéré comme une inconnue supplémentaire, qui doit être calculée à chaque passage. Ceci portant à 3 le nombre des inconnues :

- latitude du récepteur
- longitude du récepteur
- écart  $f_o - f_s$

il est donc nécessaire de disposer au minimum de trois équations, donc d'effectuer trois mesures DOPPLER.



## 2. - CONSTITUTION DU SYSTEME SYLOSAT -



Système de localisation par satellite SYLOSAT



---

Le système SYLOSAT comprend trois parties essentielles :  
réception, calcul et visualisation.

### 2,1 - L'ENSEMBLE DE RECEPTION -

Il comprend :

- Une antenne de réception 150 et 400 MHz
- Un coffret de présélection qui filtre et préamplifie les signaux satellites
- Un étalon de fréquence qui élabore la fréquence de référence au sol
- un récepteur NAVISAT qui réalise le traitement des signaux satellites et la mesure de l'effet DOPPLER par la méthode dite de l'intégrale DOPPLER (à noter que la correction de la réfraction ionosphérique est effectuée dans le récepteur NAVISAT).

### 2,2 - L'ENSEMBLE DE CALCUL -

Le calculateur reçoit par l'intermédiaire de circuits interfaces:

- Les données en provenance du récepteur (mesures DOPPLER, message satellite, synchronisations, ...)
- Les données cap et vitesse du navire délivrées par les appareils de bord (loch, gyrocompas, ...)
- Les données dérives dues au courant, affichées manuellement.

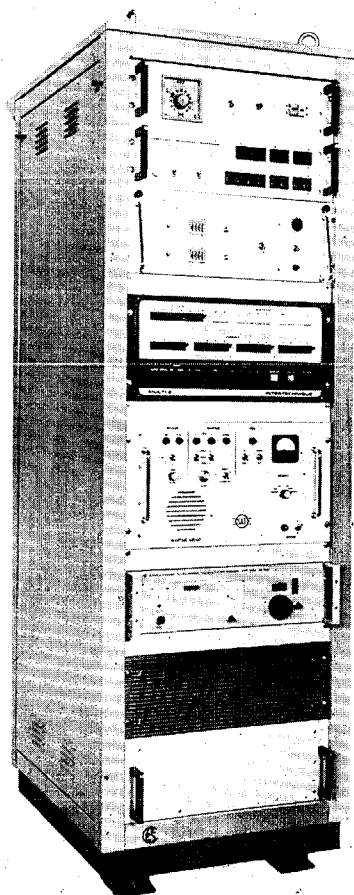
Le programme de calcul SYLOSAT a été conçu de façon modulaire et réalise :

- L'acquisition des données décrites précédemment
- Le dialogue avec l'opérateur
- Le calcul du point avec différents tests de validité
- L'alarme en cas de mauvais fonctionnement
- L'édition et la visualisation des résultats.

### 2,3 - LA VISUALISATION -

Les informations heure, longitude et latitude sont emmagasinées par l'intermédiaire d'un téléimprimeur, sur papier et sur ruban perforé.

Ces informations sont également visualisées sur tubes "Nixie".



Baie SYLOSAT

### 3. - EXPLOITATION DU SYSTEME SYLOSAT -

L'exploitation du système SYLOSAT dépend de la configuration du système retenue.

Parmi les configurations possibles, peuvent être citées :

- la version temps différé
- la version semi-automatique
- la version automatique
- les systèmes intégrés.

---

### 3,1 - LA VERSION TEMPS DIFFERE -

Les informations, reçues par le récepteur NAVISAT sont enregistrées sur un téléimprimeur relié directement à celui-ci. Ces informations, stockées sur ruban perforé, sont traitées en temps différé sur ordinateur.

### 3,2 - LA VERSION SEMI-AUTOMATIQUE -

Afin d'assurer l'entretien de l'estime, les informations cap et vitesse du navire sont entrées manuellement dans le ordinateur, par l'intermédiaire, soit du téléimprimeur, soit de roues co-deuses.

### 3,3 - LA VERSION AUTOMATIQUE -

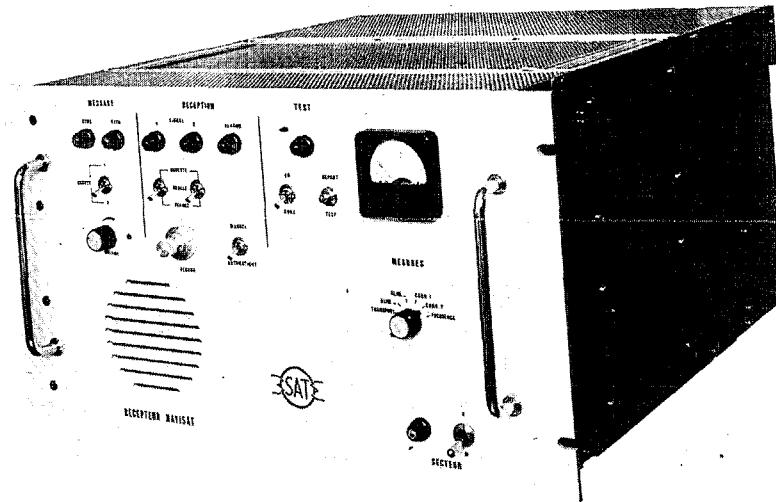
Les entrées dans le ordinateur, des informations cap et vitesse du navire, délivrées par les appareils de bord (gyrocompas, loch, ...) sont faites en temps réel par l'intermédiaire de circuits interfaces.

Dans cette version, le SYLOSAT fonctionne en service ininterrompu sans opérateur. Le retour à l'exploitation manuelle reste possible. Dans les deux cas, cinq voyants sur la face avant du récepteur permettent de suivre son fonctionnement : deux voyants verts signalent l'acquisition des porteuses 150 et 400 MHz. Quelques secondes après l'allumage de l'un d'eux, un voyant jaune indique l'acquisition du rythme de message, puis il faut attendre l'instant de la minute paire suivante pour que soit acquise la synchronisation du message, ce qui allume un 4<sup>me</sup> voyant et déclenche la première mesure DOPPLER et l'envoi au ordinateur du message décodé.

Entre les passages en mode automatique, le début des courbes DOPPLER est exploré en permanence ; en mode manuel, l'accord est déterminé par la position de la commande d'accord ; au lever du satellite, l'opérateur entend sur haut-parleur une note de battement et fait varier l'accord dans la direction du battement zéro, le passage de "recherche" à " poursuite" et l'acquisition du message sont ensuite automatiques.



## Récepteur NAVISAT



Le récepteur NAVISAT est muni des dispositifs suivants qui lui assurent une très grande qualité d'exploitation, c'est à dire la qualité maximale de mesures individuelles valides et le minimum de chiffres erronés dans les messages décodés :

- Entraide réversible de la partie 150 et de la partie 400 MHz : le fait que les fréquences reçues sont toujours dans le rapport 3/8 à l'effet ionosphérique près, permet de minimiser le temps de réacquisition d'une fréquence momentanément perdue
- Mémoire des dernières fréquences reçues et de leurs vitesses de variation pendant quelques secondes pour minimiser le temps de réacquisition après perte des 2 fréquences simultanément (cas du paquet de mer sur une antenne de sous-marin)
- Mémoire du rythme du message : dans le cas ci-dessus, la synchronisation n'est pas perdue, le message décodé est simplement aberrant pendant l'immersion de l'antenne
- si l'un des récepteurs 150 ou 400 MHz s'arrête sur un brouilleur suffisamment puissant, un voyant d'alarme s'allume et,

---

s'il y a un opérateur, il peut arracher ce récepteur au brouilleur et le forcer à suivre de nouveau le satellite. De toutes façons, au bout de 10 secondes, le NAVISAT décroche de lui-même le récepteur brouillé.

En ce qui concerne les performances essentielles d'un tel récepteur, la sensibilité est suffisante pour acquérir les satellites dès l'horizon géométrique et même un peu en dessous, grâce à la réfraction ( $3 \cdot 10^{-18}$  watts pour les mesures Doppler,  $3 \cdot 10^{-17}$  pour un décodage correct à 99,9 % du message). La sélectivité fait appel en particulier à des filtres présélecteurs à 5 cavités et l'ensemble des filtrages passifs et actifs équivaut à des filtres centrés automatiquement sur les signaux à extraire du bruit et dont la surtension atteindrait  $10^7$ . Le NAVISAT nous donne couramment, en plein quartier industriel de PARIS, des résultats à peine inférieurs en précision à ceux obtenus en pleine mer.

Une particularité du NAVISAT : les comptes Doppler sont délivrés corrigés de l'effet ionosphérique.

La maintenance est facilitée par un simulateur de satellite incorporé au récepteur. Il est à peine besoin de dire que, comme la majorité des équipements électroniques modernes, le NAVISAT est de construction modulaire, qu'il est "tout silicium" et utilise largement les circuits intégrés logiques et analogiques. Le nombre de types de semi-conducteurs y a été aussi réduit que possible.





#### 4. - LE CALCUL DU POINT -

Le SYLOSAT est proposé en version standard avec deux types de calculateurs :

- le MULTI 8 d'Intertechnique
- le MITRA 15 de la C.I.I.

Néanmoins, il est bon de rappeler que le SYLOSAT est prévu pour être facilement couplé à d'autres types de calculateurs ; la C.S.E.E. et son équipe système et programmation ont ainsi réalisé des systèmes de localisation par satellites avec des calculateurs tels que le C.I.I. IO 010, le Varian Data 620/I, l'I.B.M. 1800 etc... et peuvent envisager l'adaptation de tout autre type de calculateur.

Le programme SYLOSAT se compose de deux parties :

- Le programme temps réel de localisation
- Les programmes annexes tels que :

Le programme de prédiction des passages satellite, le programme du calcul de la hauteur du géoïde par rapport à l'ellipsoïde de référence, le programme d'entretien de gestion à partir du cap et du loch, le programme de test du récepteur et du calculateur.

Suivant la taille de l'ordinateur de l'utilisateur, les programmes annexes peuvent être tous résidents, ce qui simplifie leur mise en oeuvre.

##### 4.I - LOCALISATION PAR SATELLITE -

Les étapes du traitement pour la localisation en temps réel sont les suivantes :

- L'initialisation du programme par l'opérateur
- L'acquisition du message (durée = nombre de mesures x 2 minutes)
- Le traitement du message (tri, décodage et contrôle du message)
- Le calcul du point (avec un nombre de mesures Doppler suffisant)
- l'édition du résultat.

Le calcul du point est effectué avec la précision maximum que permet l'ordinateur. Sa durée varie de quelques secondes à 1 minute suivant la rapidité de calcul de l'ordinateur choisi.



Il s'agit de résoudre au minimum 3 équations à 3 inconnues qui sont :

- L'écart en longitude (estime - vrai)
- L'écart en latitude (estime - vrai)
- La différence de fréquence entre l'oscillateur du récepteur et la fréquence d'émission du satellite.

En général, on a plus de 3 équations (maximum 9 correspondant à 9 mesures Doppler), ce qui permet de résoudre au mieux le système par méthode des moindres carrés et aussi d'éliminer par un test sur les résidus, les mesures Doppler suspectes.

Le nombre d'itérations est limité à 10. Si les résultats ne sont pas convergents, le calcul est abandonné (Les fourchettes de convergence sont de 0",1 pour la position et 0,1 Hz pour l'écart en fréquence).

Les cas où on n'effectue pas de calcul du point sont les suivants :

- Nombre de mesures inférieur à 3
- Message satellite bruité : impossibilité de reconstituer les paramètres orbitaux
- En cas de changement de satellite, si pour les 2 satellites il n'y a pas 3 mesures
- Non convergence du calcul du point.

A chaque point calculé, on attribue un coefficient de validation fonction de l'élévation maximum du satellite, fonction du nombre de mesures prises pour le calcul, fonction de l'écart entre l'estime et le point calculé, fonction de l'écart en fréquence trouvé.

#### 4.2 - STRUCTURE DU PROGRAMME DE LOCALISATION -

Nous avons 3 catégories d'utilisateurs qui n'ont pas les mêmes besoins :

- Les militaires recherchent un système indépendant donnant la meilleure précision possible
- Les scientifiques, les pétroliers, les P.T.T. (poseurs de câbles sous-marins) recherchent une bonne précision mais aussi la possibilité d'intégrer au système SYLOSAT leurs propres applications (mesures, calculs scientifiques, ...)
- La Marine Marchande recherche une précision moins grande mais demande souvent une intégration avec leur système de navigation (automatique, météorologique, conduite des machines, ...)




---

C'est donc pour avoir une meilleure souplesse d'adaptation et faciliter les diverses intégrations que nous avons adopté la structure modulaire.

Le programme est partagé en modules ayant chacun une tâche bien définie. Les échanges entre les modules sont définis comme interface, et normalisés. L'enchaînement des modules est géré par un programme moniteur.

Nous distinguons :

- Les modules standards
- les modules semi-standards
- les modules spécifiques aux applications des utilisateurs.

- MODULES -

Les modules standards sont :

- Dialogue opérateur (introduction des paramètres, initialisation)
- Entretien de l'horloge
- Acquisition des mesures et des messages
- Tri et décodage des messages
- Contrôle de validité des messages
- Calcul du point
- Impression des résultats (édition du Journal).

Les modules semi-standards sont :

- L'acquisition des mesures cap et loch (+ lecture de dérive affichée en vitesse et cap)
- Entretien de l'estime
- Affichage des résultats sur tubes de visualisation ou écran cathodique
- Correction troposphérique
- Validation du calcul du point.

Les modules spécifiques à l'utilisateur : par exemple

- Acquisition de mesures scientifiques (bathythermie, sonar)
- Contrôle des machines.

4.3 - PRECISION -

Actuellement, la précision obtenue à l'aide de la localisation par satellite correspond à :

- T = 50 m pour un passage à terre (station fixe)
- T = 100 à 200 m pour un passage en mer (station mobile avec un loch de 0,1 N de précision et un compas de 0°,5)

---

(Pour les passages de satellite correspondant à un site maximum compris entre  $10^\circ$  et  $75^\circ$ ).

Sur plusieurs passages, la précision de localisation d'un point fixe peut être de quelques mètres (intéressant pour la géodésie et la localisation des plateformes en mer).