

I. LES DIFFÉRENTS

Véritable symbole de l'Art de la navigation le sextant risque d'être relégué au rang des antiquités, même si on en trouve encore à bord de tous les navires, même si quelques navigateurs l'utilisent toujours par amour de l'Art.

Il existe aujourd'hui de nombreux systèmes électroniques d'aide à la navigation basés sur la mesure précise du temps qui ont été régulièrement surpassés par un nouveau venu, sans qu'on ait pour autant supprimé l'ancien, à cause tout simplement du grand nombre de navigateurs qui l'utilisaient et continuent à l'utiliser. Chaque nouveau système apparaît sur le moment comme unique et insurpassable.

Tel J.A. Pierce qui, dit-on, appela son système l'OMEGA, persuadé qu'il était, que celui-ci serait le terme ultime dans la recherche d'un système de navigation idéal.

Aussi la presse actuelle ne tarit-elle pas d'éloges pour le dernier né : le système NAVSTAR-GPS.

Il faut dire qu'il est étonnant ce « petit ». Une localisation à moins de 15 mètres près (et en 3 dimensions) à n'importe quel endroit du globe, instantanément ou presque et disponible à tout moment. Cette fois-ci, assurément, on ne fera jamais mieux !

Dans cet article que nous présenterons en trois parties, nous allons décrire dans le premier chapitre tous les systèmes importants, plus ou moins anciens, encore en exploitation.

Nous nous attarderons davantage sur les systèmes à satellites, le TRANSIT d'abord et plus particulièrement ensuite sur le NAVSTAR-GPS.

DECCA

Le principe du DECCA fut établi en 1938 et c'est en 1944, pour le débarquement en Normandie, que la première installation devint opérationnelle.

Il fut le premier système hyperbolique à ondes entretenues mis en exploitation dans le monde, fig. 1.

Une chaîne DECCA est constituée par 4 stations d'émission :

- 1 maître
- 3 esclaves disposés en étoile autour du maître (et synchronisé par lui) à des distances de 50 à 200 km.

par satellite

SYSTÈMES

Fonctionnement

Ces 4 émetteurs ont une fréquence différente (70 à 126 kHz) mais multiple de 14 kHz.

Si l'on compare la phase d'un des esclave avec celle du maître, les lieux géométriques des points où l'on trouve le même déphasage sont des hyperboles ayant le maître et l'esclave pour foyer.

L'ensemble des 3 esclaves et du maître correspond à 3 jeux d'hyperboles qui se croisent et dont les intersections permettent de déterminer la position du récepteur.

Le récepteur reçoit l'émission du maître et des 3 esclaves simultanément. Les fréquences reçues sont multipliées de manière à former des paires identiques qui permettent les mesures de phase.

Précision

La précision du système DECCA dépend de nombreux facteurs qui sont : la position, le jour ou la nuit, la saison.

En moyenne, sur mer à 150 miles marins du maître, la précision à 1 écart type est meilleure que 100 m en plein jour, elle tombe à 700 m l'hiver pendant la nuit (Fombonne) [7]. La limite de portée semble être de l'ordre de 300 miles marins.

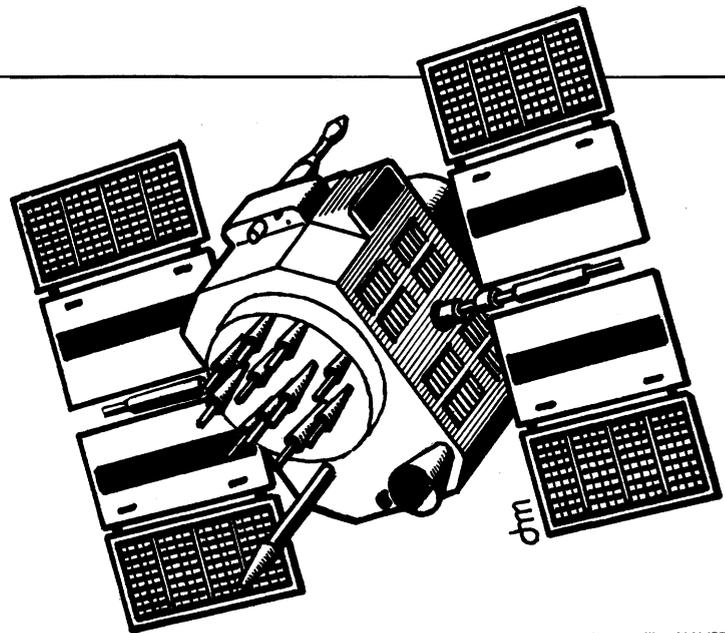
Avenir du système

Certains auteurs américains ignorent l'existence du système DECCA

bien qu'il couvre l'ensemble des régions côtières de l'Europe occidentale du Cap Nord et Sud de l'Espagne.

Le système DECCA en 1979 comptait 24 000 utilisateurs.

Il est en bonne santé mais il ne se développera probablement plus beaucoup.



Le satellite NAVSTAR

LORAN C

C'est un système hyperbolique émettant des trains d'impulsions. Il est le descendant du GEE utilisé en Angleterre par la RAF pendant la dernière guerre et du LORAN A exploité aux USA à partir de 1943.

Les stations du système LORAN C émettent toutes des impulsions à 100 kHz avec une fréquence de répétition des trains d'impulsions variant d'une station à l'autre entre 10 et 33,33 Hz.

La structure d'une chaîne LORAN C ressemble un peu à une chaîne DECCA :

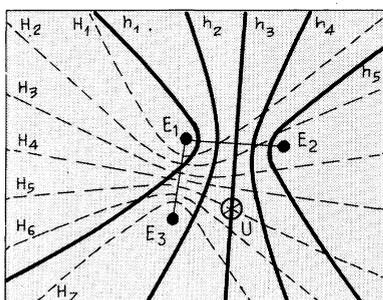


Fig. 1: Les systèmes hyperboliques: Les systèmes de localisation hyperboliques sont basés sur la mesure des temps de propagation de groupe de deux signaux issus de deux émetteurs synchronisés.

Chaque hyperbole est le lieu géométrique des points où la différence de temps d'arrivée est constante.

Dans l'exemple ci-dessus, si la mesure entre E1 et E3 donne une différence dont le lieu est l'hyperbole H5 et si la mesure entre E1 et E2 donne une différence dont le lieu est l'hyperbole h3, la position du récepteur se situe nécessairement à l'intersection de ces deux hyperboles. (point U).

1 émetteur central appelé station pilote est entouré de 3 ou 4 stations asservies.

La distance entre stations peut dépasser 2 000 km.

Principe

Le système LORAN C est basé sur la mesure de différence de temps de propagation entre le signal émis par le pilote et celui d'une station asservie. Ce qui définit des hyperboles.

Précision

Fombonne fait état [7] d'une erreur de ± 100 m à 1 000 km de la station pilote en Méditerranée.

La même source signale des essais d'évaluation pour la navigation aérienne qui auraient donné 0,27 miles marins pour erreur absolue et 0,19 miles marins pour erreur aléatoire.

Avenir du système

Le LORAN C est uniquement implanté dans l'hémisphère Nord. Il couvre l'Atlantique Nord, la côte est des USA, la Méditerranée, la Mer de Béring, les îles Hawaï et le Pacifique occidental.

Le système connaîtra probablement de nouveaux développements, une nouvelle chaîne est d'ailleurs en cours d'installation en France.

S'il est prévu qu'il sera remplacé par le GPS NAVSTAR dans ses applications militaires, l'arrêt des émetteurs n'est pas envisagé. Le LORAN C concerne plus de 60 000 utilisateurs civils.

OMEGA

Successeur du DELRAC, système anglais étudié en 1954 et qui ne vit jamais le jour, le système OMEGA fut réalisé à partir des années 60. Il s'agit d'un système hyperbolique à très longue portée fonctionnant en basse fréquence (10,2 à 13,6 kHz).

Principe

Le principe d'utilisation est basé sur une mesure de phase entre les émissions provenant de 3 stations.

Les stations peuvent être éloignées de 10 000 km, ce qui conduit à une couverture quasi mondiale avec seulement 8 stations.

Ces stations sont des installations importantes. A 10 kHz la longueur d'onde est de 30 km, ce qui signifie qu'une antenne 1/4 d'onde devrait mesurer 7,5 km !

L'antenne d'Aldra en Norvège est déployée entre les sommets de 3 montagnes distantes de 4,5 et 5 km.

Précision

La précision du système OMEGA dépend de nombreux facteurs dont la qualité du récepteur n'est pas le moindre.

Fombonne [7] cite un rayon de cercle d'erreur probable de 2 à 3 km.

OMEGA Différentiel

Certains radiophares maritimes MF sont équipés d'un récepteur OMEGA dont ils mesurent l'erreur de positionnement.

Cette information permet l'élaboration d'un signal de correction qui est ensuite émis à l'intention des utilisateurs qui naviguent dans les parages. Avec ce système, à 100 km de distance du radiophare l'erreur est ramenée à 600 m.

Avenir du système

En dépit de sa précision assez ordinaire, le système OMEGA semble apprécié des utilisateurs pour sa couverture mondiale et la grande variété

de récepteurs disponibles.

Un des avantages inégalé de l'OMEGA est la possibilité qu'il offre aux sous-marins de faire le point en immersion à 10 mètres. Cette seule caractéristique devrait assurer une très longue survie au système.

VOR et DME

Système VOR

Imaginons un radiophare qui émet un faisceau hertzien à 110 MHz très étroit tournant autour d'un axe vertical à la vitesse précise et régulière de 30 tours/seconde (à la manière du faisceau d'un phare optique).

Au moment où ce faisceau passe au Nord, le radiophare génère une brève émission omnidirectionnelle : la référence.

Il est facile pour un utilisateur de mesurer le temps qui s'écoule entre la brève émission omnidirectionnelle et le passage du faisceau. Ce temps est proportionnel à l'angle dont s'est déplacé le faisceau entre son passage au nord et son passage dans la direction où se trouve l'utilisateur.

Si l'utilisateur désire se rendre à l'endroit où se trouve ce radiophare, l'indication d'angle fournie par l'appareil n'est rien d'autre que le cap à suivre.

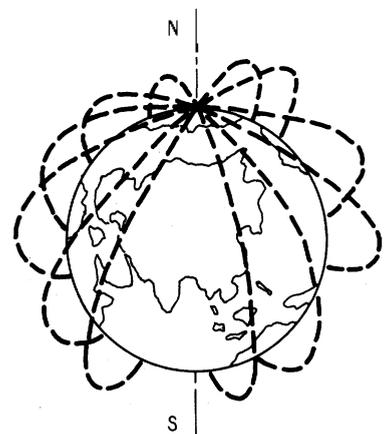
En pratique, le radiophare tournant n'émet pas un faisceau mais une cardioïde qui donne, en tournant, une amplitude de forme sinusoïdale.

De même, le signal de référence,

Fig. 2: La constellation TRANSIT.

Tous les satellites sont en orbite polaire et sont répartis de manière à couvrir au mieux la surface du globe. Théoriquement ces orbites sont fixes dans l'espace inertiel et les projections au sol des trajectoires sont complexes du fait que la terre tourne à l'intérieur de cette « cage à oiseaux ». En réalité, une précession de \pm quelques degrés par an, due aux imperfections orbitales, modifie lentement cette répartition.

La constellation actuelle est formée de 6 satellites.



modulé sur une sous-porteuse, est aussi une sinusoïde de la même fréquence (30 Hz). La mesure n'est pas une mesure de temps mais une mesure de phase. Le principe reste cependant le même.

Précision

L'erreur à 2 sigma serait généralement de l'ordre de $2,7^\circ$.

Système DME

Le système DME est un dispositif de mesure de distance par interrogation d'une balise fixe par un équipement embarqué à bord d'un avion. La fréquence d'interrogation est de l'ordre de 1 000 MHz. La balise répond sur une fréquence légèrement différente (± 63 MHz). On mesure le temps qui s'écoule entre l'interrogation et la réponse, le quel est proportionnel à la distance.

Précision

La précision du système est de 400 m ou 0,25 % de la distance.

Utilisation et avenir

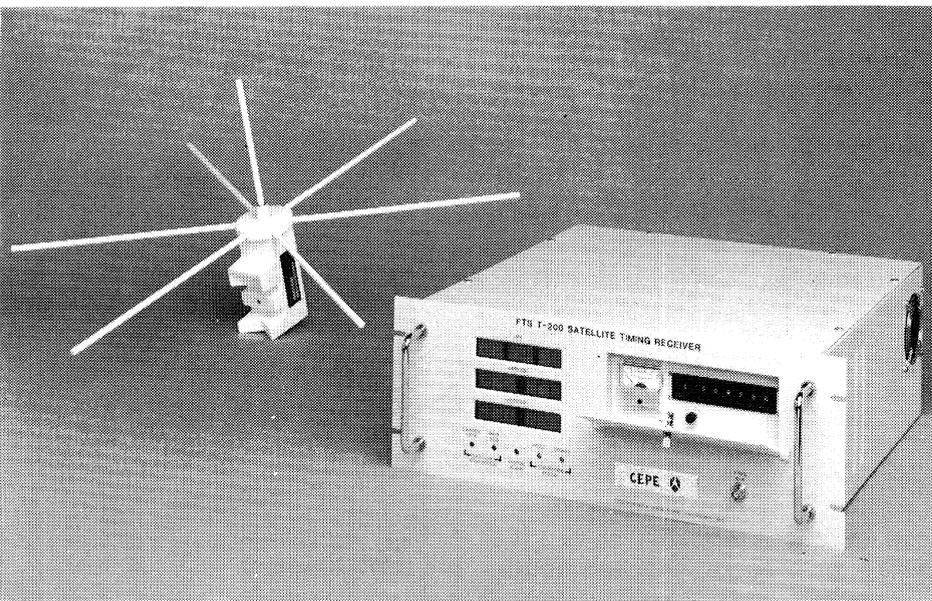
Les systèmes VOR et DME sont souvent associés.

Leur portée est limitée à l'horizon.

Les équipements de bord ont beaucoup évolué — ils étaient encore à tubes il y a peu de temps — et l'avenir de ces deux systèmes semble assuré.

Le récepteur CEPE T200.

Un préamplificateur est incorporé à l'antenne.



Système NNSS/TRANSIT

Généralités

C'est le premier système de navigation/positionnement par satellite conçu pour cet usage et à couverture mondiale. Mis en service par l'US Navy en janvier 1964 pour des besoins purement militaires, le système NNSS a été mis à la disposition des usagers civils en 1967.

Le Navy Navigation Satellite System est plus connu sous le nom de TRANSIT qui devrait être normalement réservé aux satellites qui le composent.

Par ailleurs, depuis 1981 les satellites qui sont régulièrement lancés pour l'entretien du système ne sont plus du type TRANSIT mais du type NOVA.

Ces satellites ont des orbites circulaires polaires. Ils volent à une altitude d'environ 1 000 km et parcourent leur orbite en un peu plus de 100 minutes, fig. 2.

Ces satellites émettent en permanence deux types de messages, simultanément sur deux porteuses à 150 et 400 MHz. Ce sont :

1. Des données orbitales qui permettent de connaître la position du satellite à chaque instant.
2. Des informations horaires sous forme d'un signal numérique nommé Fiducial Time Mark (FTM) émis toutes les 2 minutes et généré à partir d'un oscillateur à quartz ultra stable.

Contrôles

Les données orbitales sont régulièrement remises à jour et chargées dans la mémoire des satellites par la station de poursuite de Point Mugu en Californie.

Le FTM est également corrigé afin de le mettre en coincidence avec l'échelle de temps UTC (temps universel coordonné).

Ces remises à jour ont lieu environ toutes les 12 heures. Les données orbitographiques sont fournies par trois stations de poursuites situées dans le Maine, le Minnesota et à Hawaï.

Principe

En un lieu donné de la surface de la terre, les satellites sont visibles pendant des périodes de temps de l'ordre de 15 minutes qui se renouvellent à des intervalles de temps variables de 30 à 120 minutes. La période de visibilité du satellite se divise en deux périodes à peu près égales : celle où le satellite se rapproche du récepteur et celle où il s'en éloigne.

Les satellites se déplaçant à une vitesse assez élevée (7,5 km/s) la fréquence qu'ils émettent ($f_s = 399,968$ MHz) est affectée d'un effet Doppler qui peut atteindre 10 kHz.

Le satellite émet une fréquence plus élevée que la fréquence nominale f_s quand il s'approche et une fréquence plus faible quand il s'éloigne.

La fréquence émise passe par la valeur nominale lorsque la composante radiale de la vitesse du satellite s'annule.

L'allure de la variation de fréquence est donnée par la courbe de la fig. 3. Le trait plein correspond à un passage à forte élévation au-dessus de l'horizon ; le trait interrompu à un passage bas.

Cet effet Doppler est mis en évidence en faisant un battement entre la fréquence reçue f et la fréquence d'un oscillateur local f_l à 400 MHz.

La fréquence du battement est : $f_l - f = 32$ kHz sur laquelle un effet Doppler de quelques kHz est extrêmement sensible. L'effet Doppler est généralement mesuré en effectuant un comptage des battements sur une période de temps donnée.

Les signaux FTM sont des repères

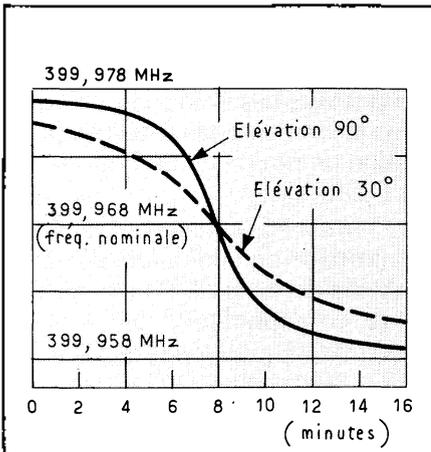


Fig. 3: Signature Doppler.

commodes, aussi se sert-on généralement de deux signaux FTM consécutifs pour constituer la base de temps du comptage Doppler (2 minutes).

Pendant un passage de satellite on peut habituellement effectuer de 5 à 8 comptages Doppler.

Solution de navigation simplifiée

On peut déduire de la forme de la courbe de la fig. 3 la distance du récepteur au plan de l'orbite du satellite. La partie centrale de la courbe étant d'autant plus abrupte qu'on se trouve rapproché du plan de l'orbite.

Une solution de navigation simplifiée consiste à comparer la courbe Doppler de la fig. 3 à une série de courbes enregistrées dans la mémoire de l'appareil ou de manière plus simple encore à mesurer la valeur du maximum de la dérivée première de la signature Doppler. Cette valeur est directement fonction de la distance entre le récepteur et le plan de l'orbite.

Il est aisé, à partir des données orbitales émises en permanence par le satellite d'en déterminer la position au moment précis où l'effet Doppler s'annule (fréq. nominale). Le récepteur est situé sur la perpendiculaire à la tangente à l'orbite en ce point.

Solution de navigation rigoureuse

$t_1, T_2 \dots t_n$ sont les instants de début et de fin de comptage Doppler.

$R_1, R_2 \dots R_n$ sont les distances satellite-récepteur aux instants $t_1, t_2 \dots t_n$.

Σ_{12} est le comptage Doppler entre les instants t_1 et t_2 .

Σ_{23} est le comptage Doppler entre les instants t_2 et t_3 .

etc.

$t_1 + \frac{R_1}{c}$ est donc l'instant d'arrivée au récepteur du signal émis par le satellite à l'instant t_1 (c étant la vitesse de la lumière).

$$\Sigma_{12} = \int_{t_1 + \frac{R_1}{c}}^{t_2 + \frac{R_2}{c}} (f_l - f) dt$$

ou f_l est la fréq. de l'oscillateur local, f est la fréq. reçue affectée de l'effet Doppler.

Comme $f_l = \text{constante}$

$$\Sigma_{12} = f_l \left[\left(t_2 + \frac{R_2}{c} \right) - \left(t_1 + \frac{R_1}{c} \right) \right] - \int_{t_1 + \frac{R_1}{c}}^{t_2 + \frac{R_2}{c}} f dt$$

ce qui s'écrit: (Equation 1)

$$\Sigma_{12} = f_l \left[(t_2 - t_1) + \left(\frac{R_2}{c} - \frac{R_1}{c} \right) \right] - \int_{t_1 + \frac{R_1}{c}}^{t_2 + \frac{R_2}{c}} f dt$$

Si f_s est la fréquence propre du satellite, il est évident que le nombre de périodes émises par le satellite entre les instants t_1 et t_2 est le même que celui qui arrive au récepteur entre les instants.

$$t_1 + \frac{R_1}{c} \text{ et } t_2 + \frac{R_2}{c}$$

$$d'où \int_{t_1 + \frac{R_1}{c}}^{t_2 + \frac{R_2}{c}} f dt = \int_{t_1}^{t_2} f_s dt = f_s (t_2 - t_1)$$

donc l'équ. (1) devient:

$$\Sigma_{12} = f_l (t_2 - t_1) + f_l \left(\frac{R_2}{c} - \frac{R_1}{c} \right) - f_s (t_2 - t_1)$$

$$\Sigma_{12} = (f_l - f_s) (t_2 - t_1) + f_l \left(\frac{R_2}{c} - \frac{R_1}{c} \right)$$

Or, dans cette expression:

f_l et f_s sont connus et constants

t_2 et t_1 sont connus (signal FTM du satellite)

Σ_{12} est connu (comptage Doppler)

On en tire:

$$R_2 - R_1 = \frac{c \Sigma_{12}}{f_l} - \frac{c}{f_l} [(f_l - f_s) (t_2 - t_1)]$$

Cette équation, de la forme $R_2 - R_1 = K$ est celle d'un hyperboloïde de révolution dont les foyers sont les positions du satellite aux instants t_1 et t_2 et qui constitue le lieu géométrique des positions possibles du récepteur.

Un autre comptage Doppler, débutant en t_2 et se terminant en t_3 donnera un autre hyperboloïde d'équation:

$$R_3 - R_2 = \frac{c \Sigma_{23}}{f_l} - \frac{c}{f_l} [(f_l - f_s)(t_3 - t_2)]$$

Hyperboloïde dont l'intersection avec le précédent et avec l'ellipsoïde figurant la surface de la terre donnera deux situations possibles du récepteur, fig. 4.

Initialisations

Les récepteurs TRANSIT doivent être initialisés par introduction des coordonnées approximatives.

La longitude et la latitude du lieu doivent être connus à 500 km près.

Par contre l'altitude, qui n'est pas calculée par le système, doit être entrée le plus précisément possible.

Transfert d'heure

Connaissant la position du récepteur et celle du satellite, il est aisé de calculer la distance qui les sépare et corriger du retard de propagation le signal d'information horaire FTM. On se souviendra qu'une erreur de 300 m sur la distance introduit une erreur de 1 μ s sur l'heure.

Certains récepteurs sont optimisés pour le transfert d'heure et au cas où ils sont utilisés à poste fixe dans un endroit dont on connaît les coordonnées géographiques, il n'est même plus nécessaire d'exécuter le calcul de la position.

C'est le cas du récepteur CEPE T 200 dans sa version la plus simple. La position est introduite sur des commutateurs internes. Le récepteur CEPE T 200 donne l'heure UTC à 50

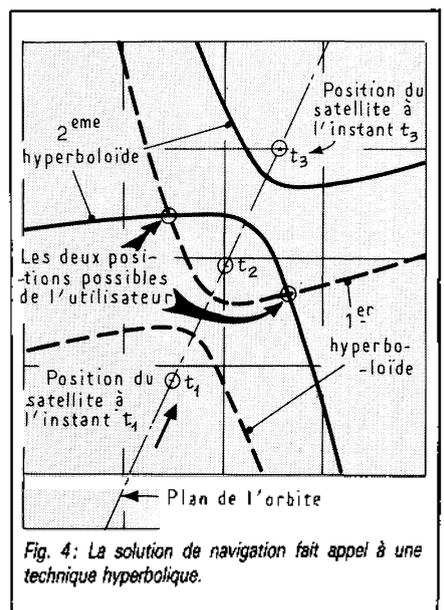


Fig. 4: La solution de navigation fait appel à une technique hyperbolique.

μ s près au premier passage de satellite. La précision atteint $\pm 20 \mu$ s ou mieux après que le T 200 ait fait une moyenne sur plusieurs passages de satellites.

Entre les passages de satellites, l'heure est conservée grâce à l'oscillateur à quartz incorporé. Au besoin, celui-ci peut être à très haute stabilité.

Navigation

Les récepteurs TRANSIT utilisés en navigation maritime sont souvent pourvus d'un dispositif d'estime automatique qui en fait de véritables navigateurs électroniques.

Les plus sophistiqués mesurent la vitesse du bateau, le cap magnétique, calculent la déclinaison magnétique. Ils tiennent compte des courants marins et pour les voiliers de l'angle de dérive déduit de l'allure de la gîte et de la vitesse du vent.

Toutes ces données sont introduites dans le calculateur qui établit la route estimée.

Chaque fois qu'un satellite passe, la position fournie par l'estime est automatiquement corrigée.

Précision du positionnement

La précision du positionnement par le système TRANSIT est de l'ordre de ± 200 m.

Cependant, il s'agit là de la précision obtenue dans des conditions idéales :

- immobilité du récepteur,
- situation à une altitude connue,
- élévation des satellites comprise entre 20° et 70° .

L'altitude et le déplacement du récepteur dégradent sérieusement la précision.

On admet généralement qu'en première approximation, l'erreur due à l'altitude est du même ordre de grandeur que l'erreur sur l'altitude.

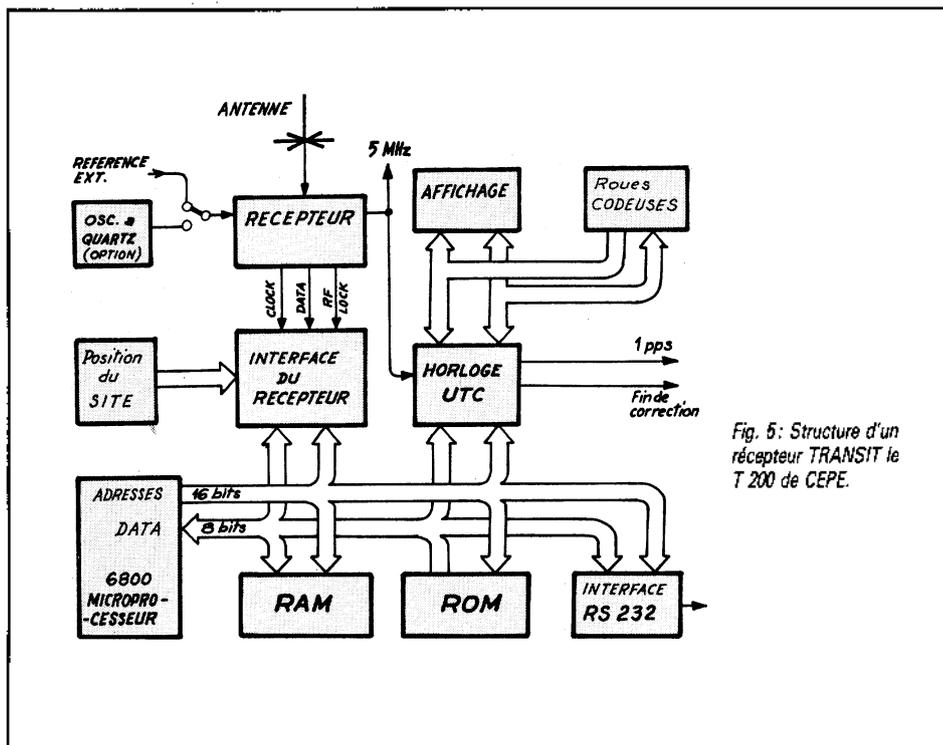


Fig. 5: Structure d'un récepteur TRANSIT le T 200 de CEPE.

L'erreur imputable au déplacement est de l'ordre de 200 m/nœud (c'est-à-dire environ 100 m/km/h).

Souvent la précision qu'on peut attendre d'un récepteur TRANSIT est comprise entre ± 500 m et $\pm 1\ 000$ m, ce qui est largement suffisant pour la plupart des navigations maritimes.

Avantages et inconvénients

Les inconvénients de TRANSIT sont les suivants :

- il est intermittent ;
- il est lent. Ce défaut découle d'abord du précédent mais lorsqu'un satellite apparaît à l'horizon il faut encore 15 minutes pour obtenir un point ;
- il est insuffisamment précis pour les utilisateurs militaires.

Les avantages de TRANSIT sont :

- couverture mondiale ;

— obtention de la latitude, de la longitude et de l'heure par affichage direct, sans nécessité d'emploi de cartes spéciales ;

— on trouve sur le marché toute une gamme de récepteurs allant de l'équipement simple pour la navigation de plaisance aux équipements sophistiqués de qualité professionnelle.

Avenir du système

Actuellement, plus de 30 000 récepteurs sont en service, dont les 4/5 sur des navires civils.

Le système sera progressivement remplacé par le GPS pour ses applications militaires.

Son arrêt d'exploitation, compte tenu du retard du GPS n'aura pas lieu avant 1995.

D. MUNIER
Ingénieur à la CEPE