

Etude des principes de base des systèmes de navigation et de localisation radioélectriques

par J. ZAKHEIM (*)

De nombreux systèmes radioélectriques de navigation et de localisation ont été développés d'une manière intensive surtout depuis la dernière guerre.

Après une très longue période d'essais et de mise au point, certains dispositifs ont réussi à s'imposer.

On examine les principes théoriques de base régissant le fonctionnement de guidage et de navigation radioélectrique ainsi que leurs applications aux systèmes actuellement en cours d'exploitation dans le domaine de la navigation maritime et aérienne des moyennes et grandes distances.

Les principes théoriques

L'idée d'utiliser les signaux radioélectriques à des fins de localisation et de navigation est pratiquement aussi ancienne que l'existence même de ces signaux.

La création d'un réseau de station de radiodiffusion à grande portée a permis aux navires et aux avions de disposer, quasi en permanence, de « balises » repérables de très loin et de naviguer en « s'accrochant » sur elles.

Le développement des moyens de communication radio était accompagné par une évolution parallèle de systèmes de guidage. Mais c'est surtout le conflit mondial 1934-45 qui a donné naissance à un grand nombre de systèmes. Conçus d'abord pour les besoins purement militaires, ils ont été, après la guerre, mis à la disposition des usagers civils.

A l'heure actuelle, le moindre navire, le plus petit avion, peuvent grâce à

ces systèmes connaître presque instantanément leur position avec une précision généralement surabondante.

Dans l'étude qui va suivre, nous vous proposons d'examiner les principes fondamentaux qui régissent le fonctionnement de tous les systèmes de navigation.

— A la base de tous les systèmes de navigation et de guidage, nous trouvons deux principaux phénomènes physiques régissant la transmission des signaux radioélectriques.

— Les ondes radio (ondes électromagnétiques) se propagent en ligne droite avec une vitesse très grande mais non infinie. C'est dire qu'un signal émis par un générateur à la station émettrice au temps t_1 sera reçu à la station réceptrice au temps t_2 postérieur à celui d'émission.

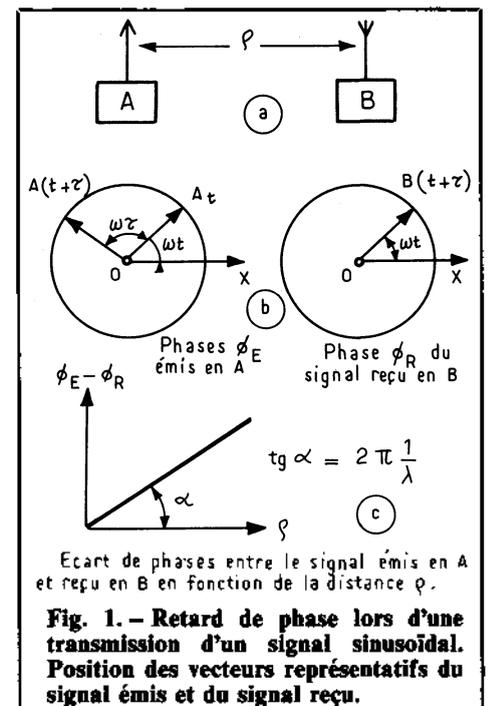
— La fréquence F_R du signal reçu par la station réceptrice est généralement différente de celle F_E du signal émis. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Doppler-Fizeau.

— Considérons deux points A et B situés à une distance P l'un de l'autre. En A se trouve un émetteur pro-

duisant un signal sinusoïdal. Un récepteur placé en B reçoit ce signal [voir figure 1 (a)].

A l'instant t le signal émis sera :

$$e(t) = E \cdot \cos \omega t$$



Ecarts de phases entre le signal émis en A et reçu en B en fonction de la distance ϕ .

Fig. 1. — Retard de phase lors d'une transmission d'un signal sinusoïdal. Position des vecteurs représentatifs du signal émis et du signal reçu.

(*) Ingénieur ESE.

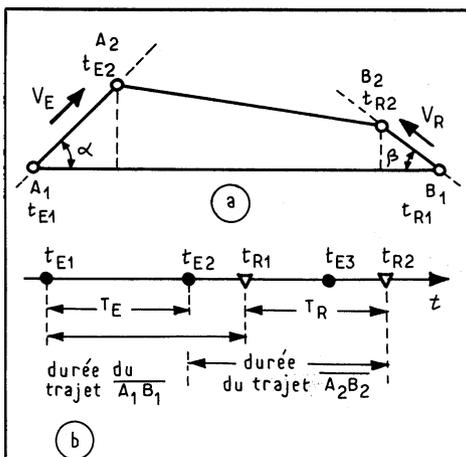


Fig. 2. - Explication de l'effet Doppler-Fizeau :

$V_E - V_R$, vecteur vitesse de l'émetteur et du récepteur ;
 $A_1 A_2$ et $B_1 B_2$, leurs positions successives
 chronogramme des signaux.



Fig. 3. - Localisation par stations fixes de réception et de calcul de coordonnées.

dont la phase par rapport à une origine correspondante à $t = 0$ sera :

$$\Phi_{E(t)} = \omega t = 2 \pi F_E \cdot t$$

Dans la représentation par vecteur tournant (Fresnel), cette phase sera représentée par l'angle XOA de la figure 1(b). Du fait de la vitesse non infinie de propagation le signal, caractérisé par cette phase, parviendra à la station réceptrice au bout d'un temps τ tel que $\tau = \frac{\rho}{C}$ si l'on

désigne par ρ la distance séparant A de B et par C la vitesse de propagation.

La phase $\Phi_{R(t+\tau)}$ du signal reçu en B au temps $(t + \tau)$ sera donc bien ωt . Mais à cet instant la phase du signal produit en A sera déjà $\Phi_{E(t+\tau)} = \omega(t + \tau)$, le vecteur représentatif ayant entre temps tourné d'un angle supplémentaire $\omega \tau$. Donc, au même instant entre les phases des signaux

émis en A et reçus en B, existe une relation :

$$1) (\Phi_E - \Phi_R) = \omega \tau = 2 \pi F_E \cdot \tau$$

ou en introduisant la longueur d'onde $\lambda_E = C T_E = \frac{C}{F_E}$;

$$2) (\Phi_E - \Phi_R) = 2 \pi \frac{\rho}{\lambda_E}$$

Comme corollaire à ce qui a été dit plus haut, nous pouvons ajouter que la phase d'un signal se propageant dans un milieu supposé homogène varie linéairement en fonction de la distance parcourue, le coefficient de proportionnalité étant $2 \pi \frac{1}{\lambda_E}$, donc d'autant plus rapidement que la longueur d'onde est courte [voir figure 1(c)].

L'effet Doppler-Fizeau, connu depuis 1845 environ, peut être expliqué d'une manière simplifiée comme suit.

Soit E et R un émetteur et un récepteur animés par des vitesses V_E et V_R respectivement selon les directions indiquées par les vecteurs sur la figure 2.

Pour la commodité de l'exposé, supposons que l'émetteur produit un signal impulsionnel de fréquence F_E (période de répétition $T_E = \frac{1}{F_E}$)

A l'instant t_{E1} , l'émetteur étant en A_1 , une impulsion est produite. Le signal se propage à la vitesse C et il sera capté par le récepteur à l'instant t_{R1} au point B_1 .

Nous avons la relation évidente :

$$A_1 B_1 = C (t_{R1} - t_{E1})$$

A l'instant $(t_1 + T_E)$, l'émetteur se trouvant alors en A_2 produira l'impulsion suivante qui atteindra le récepteur au point B_2 au temps t_{R2} . Le chronogramme des signaux émis par A et reçus par B est indiqué sur la figure 2(b).

Nous avons 3 nouvelles relations :

- trajets effectués par E et R :

$$- A_1 A_2 = T_E \times V_E$$

$$- B_1 B_2 (t_{R2} - t_{R1}) V_R ;$$

- nouveau trajet couvert par le signal :

$$A_2 B_2 [t_{R2} - (t_{E1} + T_E)] \cdot C$$

Si, comme c'est généralement le cas, la distance séparant l'émetteur du récepteur est grande par rapport aux trajets qu'ils parcourent pendant la durée T_E séparant deux impulsions successives émises par E, le quadrilatère $A_1 A_2 B_2 B_1$ est extrêmement étiré et on peut écrire sans commettre une erreur sensible que :

$$3) A_1 B_1 = A_2 B_2 + A_1 A_2 \cos \alpha + B_1 B_2 \cos \beta$$

$$= A_2 B_2 + T_E V_E \cos \alpha + (t_{R2} - t_{R1}) C \cos \beta ;$$

$V_E \cos \alpha$ et $V_R \cos \beta$ sont les projections des vecteurs vitesses de E et de R sur la directive émetteur-récepteur et représentent les vitesses radiales.

Posons

$$V_E \cos \alpha = V_{PE} ; \text{ et } V_R \cos \beta = V_{PR}$$

Compte tenu des expressions précédentes et après arrangement, la relation (3) peut se mettre sous la forme :

$$4) (t_{R2} - t_{R1}) \cdot (C + V_{PR}) = T_E (C - V_{PE})$$

Un observateur placé sur le mobile récepteur aura donc constaté l'arrivée de deux impulsions successives aux temps t_{R1} et t_{R2} . Pour lui, la période de répétition du signal est donc $T_R = (t_{R2} - t_{R1})$ et on tire de (4).

$$5) T_R = T_E \frac{(C - V_{PE})}{(C + V_{PR})}$$

$$\text{ou } F_R = F_E \frac{(C + V_{PR})}{(C - V_{PE})}$$

Si les vitesses radiales V_{PE} et V_{PR} ne sont pas nulles simultanément, la fréquence du signal reçu n'est pas égale à celle émise.

Comme généralement V_{PE} et V_{PR} sont faibles par rapport à C l'expression précédente peut être traitée comme cela est indiqué à l'annexe I et l'on obtient finalement en appelant $V_p = V_{PE} + V_{PR}$ la vitesse radiale relative de l'émetteur et du récepteur.

$$6) F_R = F_E \left[1 + \frac{V_p}{C} \right] = F_E + \frac{F_E}{C} V_p = F_E + \frac{V_p}{\lambda_E} = F_E + F_D$$

et appelant $F_D = \frac{V_p}{\lambda_E}$ le décalage

Doppler-Fizeau.

Finalement, la fréquence du signal reçu diffère de celle émise d'une quantité égale à la vitesse radiale émetteur-récepteur exprimée en unités de longueurs d'onde d'émission.

La figure 2(a) correspond au cas où les deux mobiles (émetteur et récepteur) se rapprochent. Les composantes de la vitesse radiale V_p doivent être considérées comme grandeurs positives ; la fréquence du signal reçu en B est donc plus grande que celle réellement émise en A. Si au contraire les mobiles s'éloignent, V_p sera comptée négativement et la fréquence reçue en B sera plus faible.

Généralement, les vitesses des mobiles A et B sont très inférieures à la vitesse de propagation des ondes radio. De telle sorte que pendant les

durées ($t_{R1} - t_{E1}$) du trajet des ondes le long de A_1B_1 et [$t_{R2} - (t_1 + T_E)$] le long de A_2B_2 , on peut considérer les 2 mobiles comme pratiquement « immobiles ».

La différence des phases entre le signal émis en A_1 et reçu en B_1 est d'après 2)

$$(\Phi_E - \Phi_R) A_1B_1 = 2\pi \frac{A_1B_1}{\lambda_E};$$

de même concernant le trajet A_2B_2

$$(\Phi_E - \Phi_R) A_2B_2 = 2\pi \frac{A_2B_2}{\lambda_E};$$

Entre les deux situations, la différence des phases est donc modifiée d'une quantité $\Delta \Phi$ telle que :

$$7) \Delta \Phi = (\Phi_E - \Phi_R) A_1B_1 - (\Phi_E - \Phi_R) A_2B_2 = \frac{2\pi}{\lambda_E} [A_1B_1 - A_2B_2]$$

Soit compte tenu des relations précédentes :

$$\begin{aligned} A_1B_1 - A_2B_2 &= T_E V_{PE} + (t_{R2} t_{R1}) V_{PR} = \\ T_E \left[V_{PE} + \frac{(C - V_{PE})}{(C + V_{PR})} V_{PR} \right] &= \\ = \frac{T_E C \cdot V_P}{(C + V_{PR})} = \frac{V_P}{F_E} \frac{1}{[1 + \frac{V_{PR}}{C}]} \end{aligned}$$

et comme $V_{PR} \ll C$, on a pour la variation Δp de la distance émetteur-récepteur

$$8) \Delta p = A_1B_1 - A_2B_2 \frac{V_P}{F_E}$$

La variation $\Delta \Phi$ de la différence des phases entre les deux situations s'écrit donc finalement :

$$9) \Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda_E} \Delta p = \frac{2\pi}{\lambda_E} \cdot \frac{V_P}{F_E}$$

et comme $\frac{V_P}{\lambda_E} = F_D$ selon 6)

finalement

$$10) \Delta \Phi = 2\pi \frac{\Delta p}{\lambda_E} = 2\pi \frac{F_D}{F_E}$$

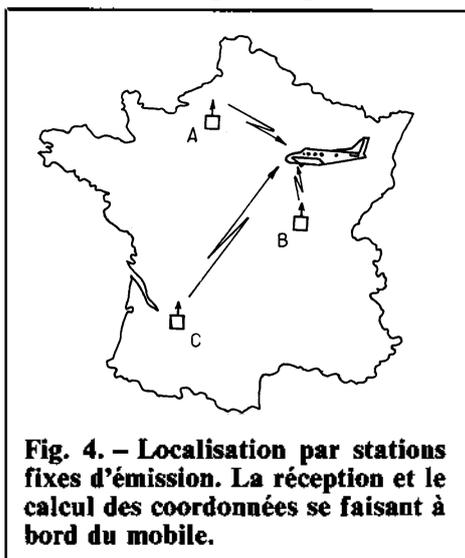


Fig. 4. - Localisation par stations fixes d'émission. La réception et le calcul des coordonnées se faisant à bord du mobile.

Φ : variation de la différence des phases exprimée en radians.

λ_E : modification de la distance émetteur-récepteur.

F_E : effet Doppler.

Les deux lois fondamentales qui régissent la propagation des ondes radio et dont nous avons parlé plus haut, doivent être complétées par le corollaire suivant :

Tout déplacement relatif émetteur-récepteur est indissolublement liée à une variation simultanée de la différence des phases entre les signaux émis et ainsi qu'à l'apparition d'un effet Doppler-Fizeau et réciproquement.

Les trois principes examinés, mis en œuvre séparément ou en combinaison, ont conduit à la création d'un grand nombre de systèmes de localisation et de navigation en usage dans le monde.

Application des principes théoriques

Nous allons voir maintenant comment les principes théoriques examinés au premier chapitre sont appliqués pour réaliser des systèmes de localisation.

Selon l'emplacement des émetteurs et des récepteurs, l'on peut distinguer deux grandes classes de systèmes.

L'émetteur est situé sur le mobile qui cherche à connaître sa propre position. Le signal haute fréquence est reçu par un ensemble de réception fixe au sol (voir figure 3). Il y subit un traitement adéquat dans un centre de calcul. Les résultats de calcul (coordonnées du mobile) sont ensuite communiqués au mobile par une liaison H.F. séparée.

L'émission est faite par un groupe d'émetteurs fixes dont les emplacements sont connus. Les différents signaux sont reçus et traités à bord du mobile qui en déduit lui-même ses coordonnées par rapport à l'ensemble d'émission.

Si l'on tient compte de différents éléments (dimensions des antennes, longueurs d'ondes, puissances mises en jeux), le système à stations d'émissions fixes est le seul capable d'assurer une couverture sur des grandes distances. Etant par ailleurs essentiellement « non saturable », il se prête bien aux besoins de la « Navigation », où plusieurs usagers doivent être desservis simultanément.

Méthodes de mesure

Le jeu consiste à ramener le problème « géométrique » de localisa-

tion à celui de la mesure des « grandeurs électriques » liées aux grandeurs géométriques cherchées.

Mesure des durées

Soit, voir figure 5a, un émetteur E placé en A, point géographiquement connu, et un mobile M équipé d'un récepteur. Les deux appareils comportent des horloges (H_A et H_M) très précises (p. ex. horloges atomiques) synchronisées entre elles, de sorte que les 2 ensembles possèdent une référence commune du temps. A des instants prédéterminés et connus, p. ex. aux temps t_1, t_2, t_3 etc., ces horloges produisent des impulsions simultanément (voir figure 5b). L'impulsion produite par l'horloge de la station A commande l'émission d'une impulsion H.F. par l'émetteur E de la station. L'impulsion produite au même moment par l'horloge du récepteur déclenche le démarrage d'un chronomètre à bord du mobile. L'impulsion H.F. émise par A sera captée par M au bout d'un temps τ_A tel que :

$$\tau_A = \frac{AM}{c} = \frac{P_A}{c} \text{ avec } c \text{ vitesse de propagation.}$$

Amplifiée par le récepteur, cette impulsion commande l'arrêt du chronomètre qui indique alors exactement la valeur de τ_A , d'où connaissance de la p_A .

Le mobile se situe par conséquence sur un arc de cercle [voir figure 5(c)] de rayon connu p_A et de centre connu A.

Une mesure analogue effectuée à l'ordre d'une deuxième station d'émission B localise le mobile sur un 2^e cercle de rayon p_B et de centre B.

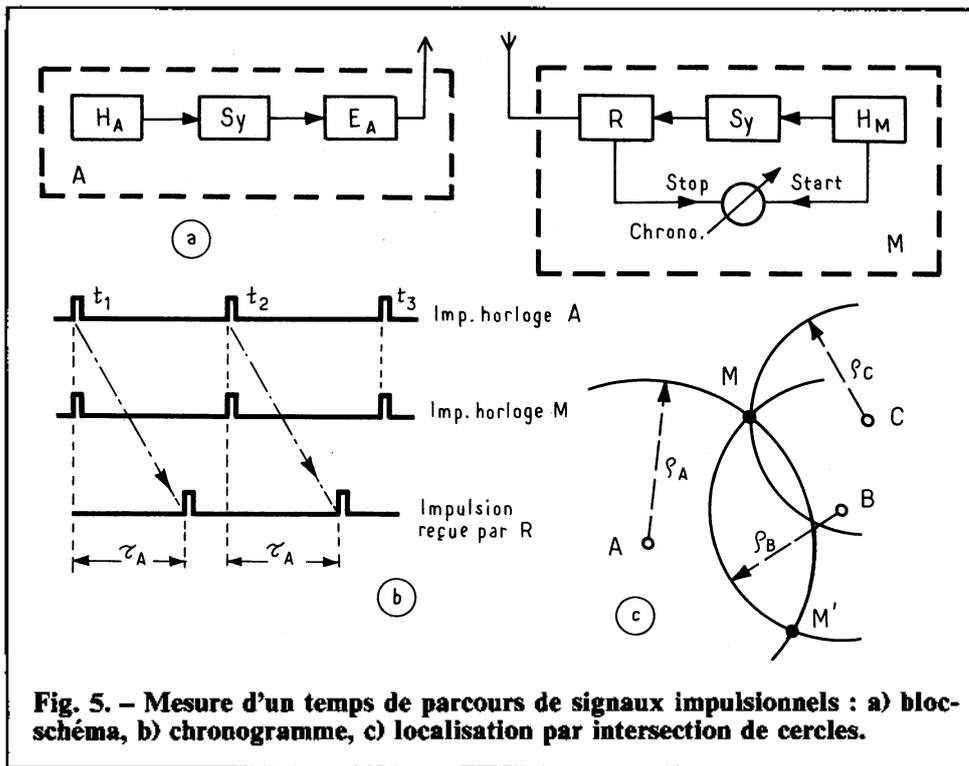
L'intersection de ces 2 cercles détermine deux points possibles d'emplacement du mobile, en M ou en M'. Dans le cas général, il sera nécessaire de recourir à une troisième mesure faisant intervenir une 3^e station C.

Ce système nécessite donc :

- a) L'implantation d'un groupe de 3 stations émettrices équipées d'horloges très stables synchronisées entre elles.
- b) Un équipement sur le mobile comprenant un récepteur, un chronomètre et une horloge également très stable, synchronisée sur les horloges H_A, H_B et H_C et susceptible, pendant toute la durée de déplacement du mobile, de conserver cette synchronisation sans dérive appréciable.

Mesure de différences de durées

Considérons deux stations émettrices A et B équipées et fonction-



nant comme cela a été décrit plus haut et émettant en synchronisme des impulsions aux émetteurs t_1 , t_2 , etc. (voir figure 6a et 6b).

Le mobile M est équipé d'un récepteur à deux canaux, l'un accordé sur l'émetteur A, l'autre sur B. Les signaux reçus commande le « départ » et « l'arrêt » d'un chronomètre.

L'impulsion émise au temps t_1 par la station A sera captée par le récepteur avec un retard τ_A tel que $\tau_A = \frac{AM}{c} = \frac{p_A}{c}$ tandis que l'impulsion

(émise au même instant t_1) par la station B sera captée avec un retard $\tau_B = \frac{BM}{c} = \frac{p_B}{c}$

Le chronomètre du récepteur, étant activé par l'une des impulsions et stoppé par l'autre, enregistre par conséquence une durée τ_{AB} telle que :

$$\tau_{AB} = \tau_A - \tau_B = \frac{p_A - p_B}{c}$$

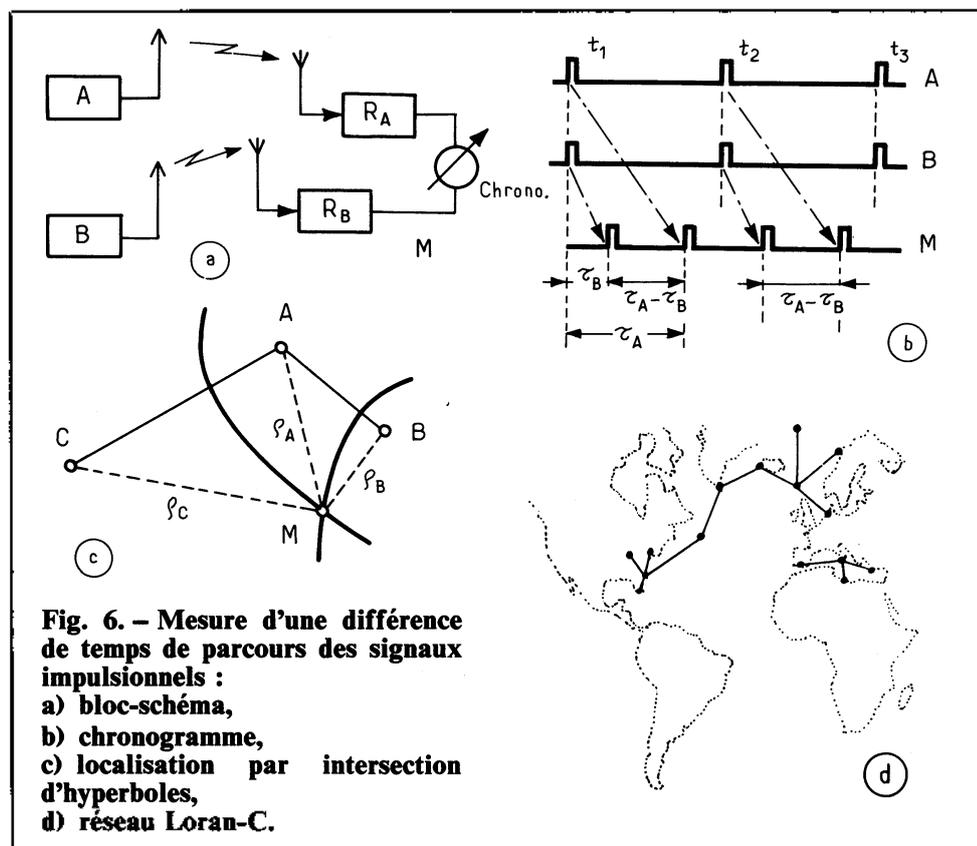
Le mobile M est donc situé sur une branche d'hyperbole (voir figure 6c) correspondant à une différence $p_A - p_B = c \tau_{AB}$ et dont les stations A et B constituent les foyers.

Il est évident qu'il est nécessaire de procéder à une autre mesure mettant en jeu un deuxième couple de stations, par exemple A et C, ce qui donne une autre branche d'hyperbole de foyers A et C. L'intersection de ces deux courbes définit la position du mobile M.

L'équipement embarqué sur le mobile est plus simple, donc moins

coûteux, que celui correspondant au système de mesure de temps de parcours. Par ailleurs, plusieurs mobiles peuvent être desservis simultanément par l'ensemble A-B-C, ce qui est essentiel pour les lésions de la « navigation ».

Le système de navigation à moyenne distance (1 500-2 000 km) Loran-C fonctionne selon le principe décrit. La figure 6d indique l'emplacement des principales stations Loran-C



destinées à couvrir l'Atlantique Nord et la Méditerranée.

Mesure de retards de phase
Considérons un émetteur placé au point A géographiquement connu. L'émetteur, commandé par une horloge très stable à travers un synthétiseur, produit un signal sinusoïdal permanent (voir figure 7).

Le mobile comporte un récepteur piloté également, à travers un synthétiseur, par une horloge H_M .

Les deux horloges sont synchronisées entre elles en fréquence et en phase ; on dispose par conséquence à bord du mobile d'un signal sinusoïdal en phase avec celui émis par l'émetteur de la station A. Ce signal est appliqué sur l'une des entrées d'un phasemètre ϕ . L'autre entrée de cet appareil est pilotée par le signal issu de récepteur R captant le signal H.F. émis par l'émetteur. Ce signal arrive en M après avoir parcouru la distance $AM = p_A$, et subit par conséquent un retard de phase Φ tel que :

$$\Phi = 2\pi \frac{p_A}{\lambda}$$
 (λ longueur d'onde d'émissions). Le phasemètre ϕ mesure donc directement ce déphasage et le mobile se situe sur un cercle de rayon p_A et dont le centre se situe en A.

Comme dans le cas de la figure 5, il sera nécessaire pour localiser M de faire appel à d'autres mesures, avec d'autres stations, également synchronisées avec la station A.

La mesure d'une différence de phase est généralement nettement plus précise que celle d'un temps, mais une difficulté surgit. En effet, la plupart de temps $p\lambda$, la distance séparant l'émetteur du récepteur, est nettement plus grande que λ , la longueur d'onde utilisée.

On doit donc considérer :

$$P_A = k\lambda + \Delta p_A$$

de telle sorte que le retard de phase φ mesuré doit s'écrire :

$$12) \Phi = 2\pi \frac{P_A}{\lambda} = 2k\pi + 2\pi \frac{\Delta p_A}{\lambda} = 2k\pi + \Delta\gamma$$

Or, un phasemètre ne peut mesurer une différence de position angulaire de deux vecteurs que dans l'intervalle $0 \rightarrow (0 \rightarrow 360^\circ)$; la mesure effectuée donne donc accès seulement à Δp_A et de dispositions particulières (levée d'ambiguïté) doivent être prises pour retrouver la valeur exacte de p_A .

Mesure de différence de retards de phase

Considérons deux émetteurs placés aux points connus A et B. Ils sont pilotés par des horloges de très grande stabilité, rigoureusement synchronisées entre elles et émettent deux ondes sinusoïdales de même fréquence, parfaitement en phase (voir figure 8a).

Le mobile M est équipé d'un récepteur à 2 canaux. Grâce à des dispositifs, dont la description sort du cadre du présent article, chaque canal de réception est sensible uniquement à l'onde provenant d'un seul émetteur. Les sorties de ces deux voies de réception aboutissent aux entrées d'un phasemètre.

L'onde reçue en M en provenance de A subit un retard de phase Φ_A tel que :

$$\Phi_A = 2\pi \frac{AM}{\lambda} = 2\pi \frac{P_A}{\lambda}$$

de même

$$\Phi_B = 2\pi \frac{PB}{\lambda}$$

par conséquent, le phasemètre enregistre une mesure

$$\Phi = \Phi_A - \Phi_B = 2\pi \frac{(P_A - P_B)}{\lambda}$$

et le mobile se situe sur une branche d'hyperbole dont A et B forment les foyers, voir figure 8(b).

Bien entendu une autre mesure avec un deuxième couple de stations (A et C p. ex.) est nécessaire pour assurer la localisation du mobile M.

La remarque faite plus haut concernant les ambiguïtés résultantes des grandeurs relatives de p et de λ restent valables ici également. La va-

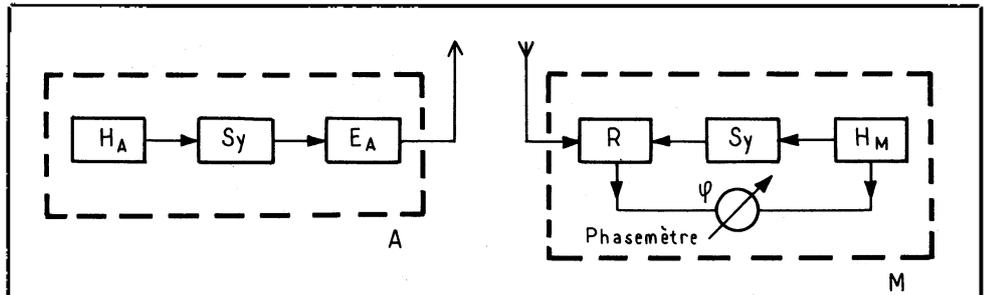


Fig. 7. - Mesure d'un retard de phases bloc-schéma.

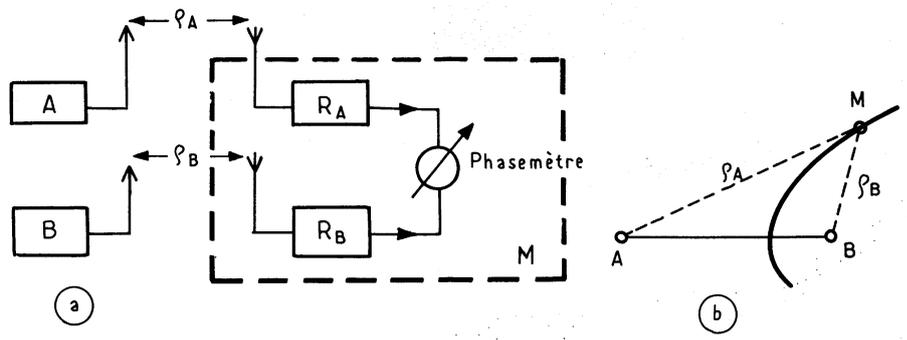


Fig. 8. - Mesure d'une différence de retards de phases : a) bloc-schéma, b) localisation par hyperbole, c) réseau OMEGA.

ANNEXE

Reprenons l'expression de la fréquence reçue

$$F_R = F_E \frac{(C + V_{pR})}{(C - V_{pE})} = F_E \frac{[1 + \frac{V_{pR}}{C}]}{[1 - \frac{V_{pE}}{C}]}$$

et développons en série compte tenu que les valeurs $\frac{V_D}{C}$ sont généralement faibles

$$F_R = F_E [1 + \frac{V_{pR}}{C}] [1 + \frac{V_{pE}}{C} + (\frac{V_{pE}}{C})^2 + (\frac{V_{pE}}{C})^3 \dots]$$

soit encore

$$F_R = F_E [1 + \frac{(V_{pE} + V_{pR})}{C} + \frac{V_{pE} \cdot V_{pR}}{C^2} + [1 + \frac{V_{pR}}{C}] [(\frac{V_{pE}}{C})^2 + (\frac{V_{pE}}{C})^3 + \dots]]$$

sauf dans le cas des modèles mobiles animés de grandes vitesses tel que les fusées l'ensemble de termes de la deuxième ligne peut être négligé et l'on obtient, en posant

$$V_{pE} + V_{pR} = V_D$$

$$F_R = F_E [1 + \frac{V_D}{C}]$$

leur de $(P_A - P_B)$ étant généralement très grande par rapport à celle de λ .

Le système de navigation OMEGA à couverture mondiale et dont les stations d'émission sont distribuées se-

lon la figure 8c ainsi que des nombreuses chaînes DECCA assurant la navigation côtière, fonctionnent selon le principe décrit.