

Qu'est-ce que:

L'effet Döppler ?

B IEN des phénomènes physiques, découverts au XIX^e siècle, ont reçu des applications pratiques dans les cinquantes dernières années.

Ainsi, l'effet Hall, l'effet de champ, dit de Lilienfeld et l'effet Döppler (1) connaissent l'exploitation industrielle grâce au prodigieux essor technologique qu'ont accompli les hommes de science en cinq décennies.

Nous avons décrit, dans cette rubrique, le premier, nous reviendrons sur le second. Présentement, nous désirons nous attacher au troisième, l'effet Döppler (ondes acoustiques) - Fizeau (ondes lumineuses, donc électromagnétiques) (2).

L'effet Döppler-Fizeau, pour rendre hommage à ses deux « inventeurs », se traduit ainsi : « Variation apparente de la fréquence f d'un système d'ondes entretenues

(1) Döppler (1803-1853), physicien autrichien né à Salzbourg, mort à Venise.

(2) Fizeau (1819-1896), physicien français né à Paris, mort à La Ferté-sous-Jouarre. Membre de l'académie des Sciences en 1860. Il démontra, en 1842, que la lumière était soumise au même phénomène Döppler que les ondes acoustiques.

sous l'action, soit du mouvement de la source (point générateur des vibrations, en déplacement par rapport à un observateur immobile), soit du mouvement de l'observateur relativement au milieu de propagation (translation de l'observateur à partir d'une source fixe). »

Cet effet déboucha, rapidement, sur des applications en astrophysique. L'astronome anglais, Huggins (1824-1910), en déduisit la vitesse radiale de Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel (annonciatrice, selon les anciens Egyptiens, de la renaissance quotidienne

du Dieu Soleil Rê). Le savant allemand Vogel (1841-1907) utilisa aussi cet effet pour mesurer la vitesse de rotation du soleil (1871).

Toutefois, les mesures qui se dégagèrent de la sorte restaient du domaine scientifique. La technique ne pouvait pas, encore, s'en servir. Ce n'est plus le cas en cette fin de siècle, aussi nous y intéresserons nous, d'abord en l'expliquant à l'aide d'une mathématique des plus simples, puis en passant en revue des réalisations industrielles... « banalisées » par leur emploi extensif.

1. DESCRIPTIONS DE L'EFFET DÖPPLER

L'effet Döppler se traduit différemment selon que l'observateur O se rapproche ou s'éloigne d'une source S immobile, ou, au contraire, si l'observateur reste fixe et si la source se déplace par rapport à lui, dans sa direction, ou dans le sens opposé (fig. 1).

1.1. OBSERVATEUR IMMOBILE

1.1.1. La source se déplace vers lui (fig. 1-a, 1^o/)

La fréquence apparente f' (pour l'observateur), due à la composition de la vitesse du signal périodique pur et de la vitesse propre du générateur S, s'accroît. La tonalité entendue « monte » en « hauteur », c'est-à-dire, devient plus aiguë au fur et à mesure que la source se rapproche de l'observateur (fig. 2). Il est bien entendu que ce changement de fréquence n'a rien de réel vis-à-vis de l'onde qui se propage. Celle-ci conserve sa fréquence d'origine f au cours de sa translation. Seul l'observateur est concerné par la variation de f en f' .

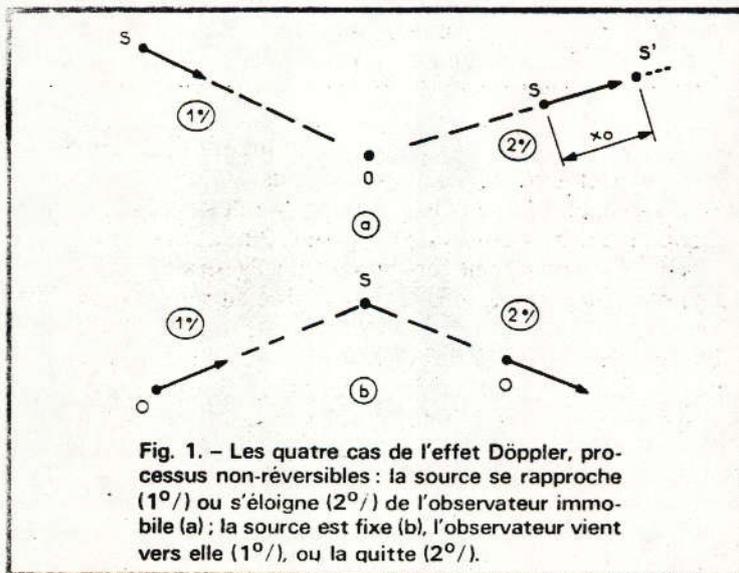


Fig. 1. - Les quatre cas de l'effet Döppler, processus non-réversibles : la source se rapproche (1^o/) ou s'éloigne (2^o/) de l'observateur immobile (a) ; la source est fixe (b), l'observateur vient vers elle (1^o/), ou la quitte (2^o/).

1.2. La source s'éloigne (fig. 1-a, 2°/)

Puisque la vibration est périodique, si l'observateur reçoit une première émission, émanant de S, au temps t, il s'attend à enregistrer la deuxième onde au temps (t + T), avec T période du signal sonore considéré. Or, pour lui, c'est plus tard que lui parvient la tonalité attendue, donc à un temps t + T', avec T' = T + τ. Le retard est imputable à la vitesse de déplacement de S par rapport à O (d'où le nom de vitesse relative... sous-entendu, vis-à-vis de l'observateur). Le décalage temporel est le temps de propagation correspondant au déplacement de la source de S en S' (une distance x₀, par exemple). Pour l'observateur, l'onde parcourt x₀ à la vitesse v, mais accomplit ce trajet, pendant une période, quant à elle (deux émissions successives en phase), alors qu'en réalité, l'onde a couvert cette distance x₀ à la vitesse v.

Pour l'observateur :

$$x_0 = v_r \cdot T$$

Pour la source :

$$x_0 = v \cdot \tau = v (T' - T)$$

Il est facile de tirer la valeur de τ de ces expressions :

$$\tau = \frac{x_0}{v} = \frac{v_r \cdot T}{v} = T \cdot \frac{v_r}{v}$$

La période apparente s'en déduit :

$$T' = T + \tau = T + T \left(\frac{v_r}{v} \right) = T \left(1 + \frac{v_r}{v} \right)$$

d'où, par inversion, la fréquence apparente, ou relative :

$$f' = f \left(\frac{v}{v + v_r} \right)$$

Le son devient plus grave au fur et à mesure que la source s'éloigne de l'observateur O, ainsi que le souligne la figure 3.

1.2. OBSERVATEUR MOBILE

Si l'observateur se rapproche de la source, comme dans le cas du § 1.1.1., la fréquence f' augmente (fig. 4).

Le calcul de T' en fonction de T et de v_r est simple. En l'inversant, on obtient la fréquence apparente :

$$f' = f \left(\frac{v + v_r}{v} \right)$$

Il est inutile de le reproduire ici.

1.2.2. L'observateur s'éloigne (fig. 1-b, 2°/)

Dans ce cas, le son lui paraît

plus grave (fig. 5) et :

$$f' = f \left(\frac{v - v_r}{v} \right)$$

1.3. NON-RÉCIPROCITÉ DES PHÉNOMÈNES

Les processus décrits ne sont pas réversibles. Les distances parcourues ne sont pas les mêmes et la détermination de la vitesse relative porte sur l'onde par rapport à l'observateur (§ 1.1.) puis sur l'observateur relativement à la source (§ 1.2.).

2. INCONVÉNIENT DE L'EFFET DÖPLER EN RADIO-ÉLECTRICITÉ

Désignons par f_t la fréquence émise par un dispositif terrestre (ou respectivement aérotransporté) et par f_r la fréquence reçue par un équipement aéroporté (ou respectivement installé au sol). La vitesse relative de l'émetteur et du récepteur est v_r. Lorsque v_r << c, la formule 4 (§ 1.2.) a pour équivalent :

$$\frac{f_r}{f_t} = 1 - \frac{v_r}{c}$$

avec c, célérité des ondes électromagnétiques.

La puissance reçue, déterminée en fonction de la loi de conservation de l'énergie, décroît dans une proportion fixée par la relation :

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{\left[1 - \left(\frac{v_r}{c} \right)^2 \right]}{1 + \frac{v_r}{c}}$$

Ce qui traduit une atténuation de 1 [dB] de puissance pour v = 0,075 c.

Le taux de transfert de l'information est aussi affecté et affaibli. Des techniques de traitement du signal doivent alors être utilisées pour rétablir la valeur initiale du rapport signal sur bruit (avant dénaturation Döppler).

Dans les cas extrêmes de vitesse, c'est-à-dire lorsque la vitesse relative se rapproche de la célérité des radiations électromagnétiques, des effets relativistes (Lorentz, Einstein) entrent en ligne de compte. Le déplacement Döppler de fréquence s'altère et l'on est contraint d'écrire :

$$\frac{f_r}{f_t} = \left(\frac{1 - \frac{v_r}{c}}{1 + \frac{v_r}{c}} \right)^{1/2}$$

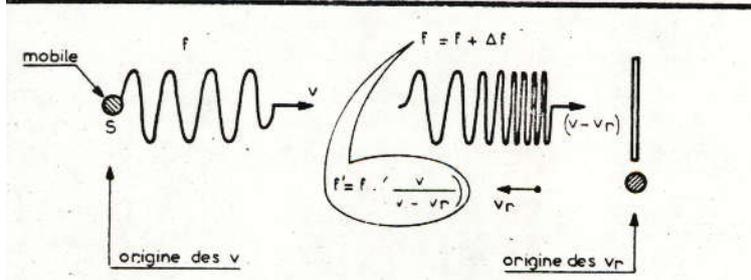


Fig. 2. - La source s'approche de l'observateur, la fréquence apparente augmente, la « note » devient plus aiguë.

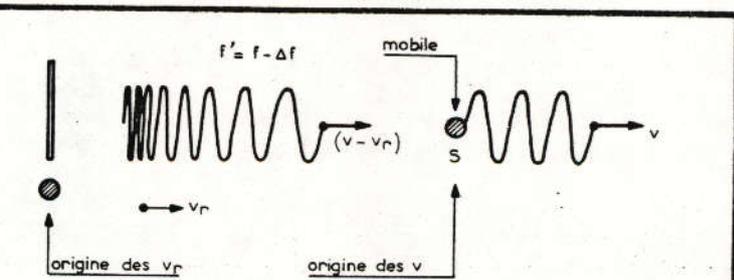


Fig. 3. - La source s'éloigne de l'observateur, la fréquence apparente diminue, le « ton » se fait plus grave.

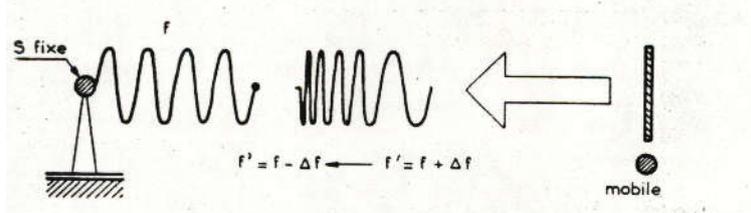


Fig. 4. - En se rapprochant de la source fixe, l'observateur entend une tonalité qui devient de plus en plus haute.

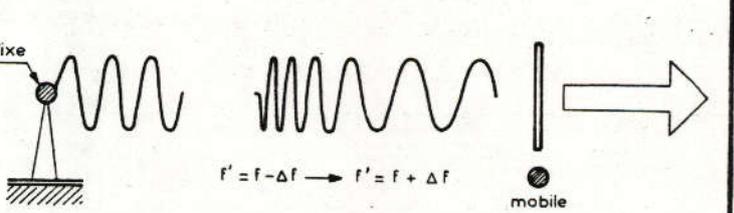


Fig. 5. - Quittant la source sonore, l'observateur a l'impression que le son émis décroît en fréquence.

est-à-dire qu'on introduit une « correction relativiste », non-négligeable.

Il nous faudra revenir sur la relativité, surtout sur la correction proposée par Lorentz qui impose la constance de la vitesse de la lumière... laquelle est pas, sub-microscopiquement, un... invariant, d'où vient paradoxe en physique des particules.

3. BARRAGES ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES

1. DÉTECTION D'UN AVION

Un avion A poursuit sa route Ox. Sa trajectoire (ou ligne de course) coupe un pinceau électromagnétique onde entretenue pure, continuellement émise sous forme d'une sinusoïde (fig. 6-a). L'effet Döppler se marque de la façon dont la figure 6-b le souligne : à l'accroissement de l'amplitude succède un changement de fréquence suivi

d'une atténuation d'amplitude. L'aéronef est ainsi détecté. Des faisceaux parallèles aident alors à préciser sa position par rapport à une référence géographique.

Une telle réalisation se nomme « barrage électromagnétique ». Aucun intrus ne peut le franchir sans déclencher une alarme. Evidemment un récepteur aéroporté large bande indique au pilote qu'il a franchi le « mur » ainsi élaboré (contre-mesure électronique).

Très dispendieuse, cette solution a été abandonnée. Les radars C.W. M.T.I. et pulse Döppler lui ont succédé avec maints avantages, parmi lesquels l'aspect financier n'est pas négligeable.

3.2. RADAR A SUPPRESSION D'ÉCHOS FIXES

La littérature de langue anglaise et le jargon « français » de nos techniciens appellent les radars à suppression d'échos fixes, à onde hyperfréquence entretenue

pure, des radars M.T.I. (« Moving Target Indicator » : indicateur de cible mobile), ou parfois encore C.W. (Continuous Wave).

Ces détecteurs d'ondes électromagnétiques sont sensibles au Δf qu'impose la vitesse radiale de la cible à la fréquence f émise, après qu'elle ait été réfléchiée par l'objectif en mouvement vers l'antenne de la station terrestre (fig. 7).

La station radar émet sur une fréquence f vers une cible C qui se rapproche à la vitesse v de l'antenne.

L'objectif mobile est soumis à une fréquence apparente :

$$f' = \frac{c + v_r}{c} \cdot f$$

où c , célérité des ondes électromagnétiques, se substitue au v des vibrations acoustiques (matérielles).

A son tour, la cible, par son effet réflecteur, joue le rôle d'un générateur de fréquence f' . Elle se comporte dès lors comme un émetteur qui se déplace à la vitesse v dans la même direction que l'écho.

Le récepteur radar reçoit donc un signal de fréquence :

$$f'' = \frac{c}{c - v_r} \cdot f' \\ = \frac{c}{c - v_r} \cdot \frac{c + v_r}{c} \cdot f$$

Après simplification, il reste :

$$f'' = \frac{c + v_r}{c - v_r} \cdot f$$

Il suffit de faire battre entre elles la fréquence d'émission f et la fréquence de réception f'' pour en obtenir par différence la fréquence Döppler désirée :

$$f_d = f'' - f_0 = \frac{c + v_r}{c - v_r} f - f \\ = \frac{2 v_r f}{c} = \frac{2 v}{\lambda}$$

en négligeant v devant c . Par exemple, si $v = 500$ km/h et $\lambda = 23$ cm, le glissement de fréquence vaudra 1200 [Hz] environ.

En fait, étant donné les fréquences mises en jeu, rendant délicat l'opération de réception, ce seront plutôt les phases qui seront prises en considération.

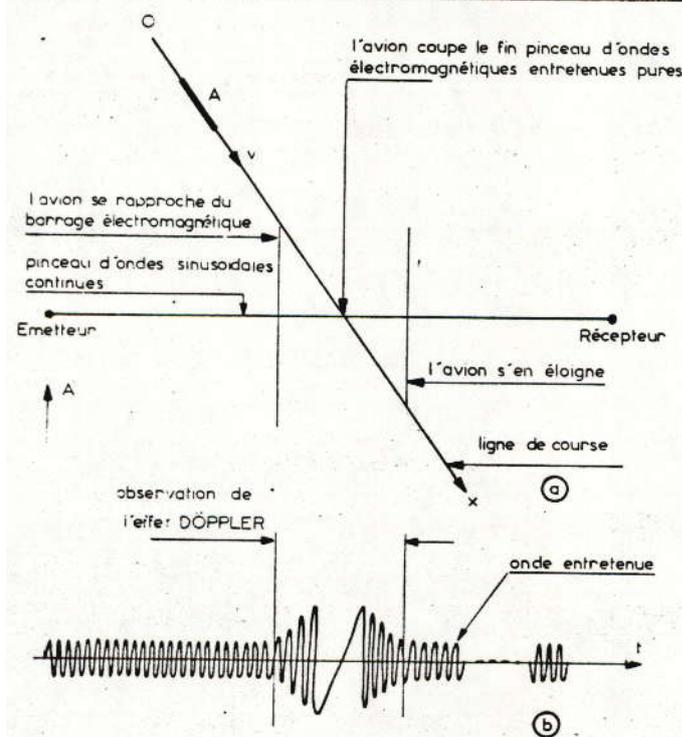


Fig. 6. - Principe du barrage électromagnétique (a). Signal obtenu par effet Döppler (b).

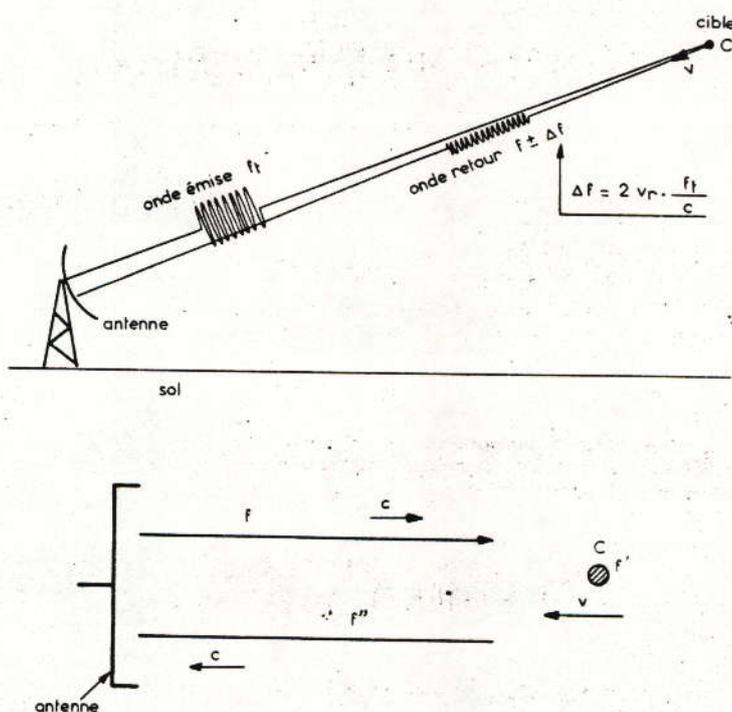


Fig. 7. - Le radar à glissement de fréquence permet d'éliminer les échos dus à des obstacles réflecteurs fixes.

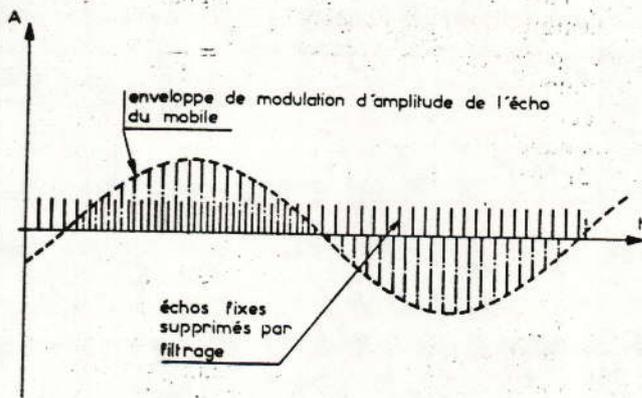


Fig. 8. - Signal vidéo d'un radar « pulse » Doppler.

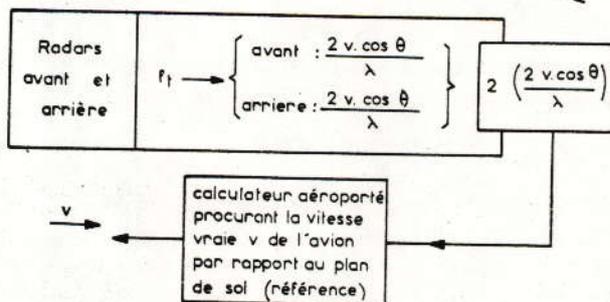
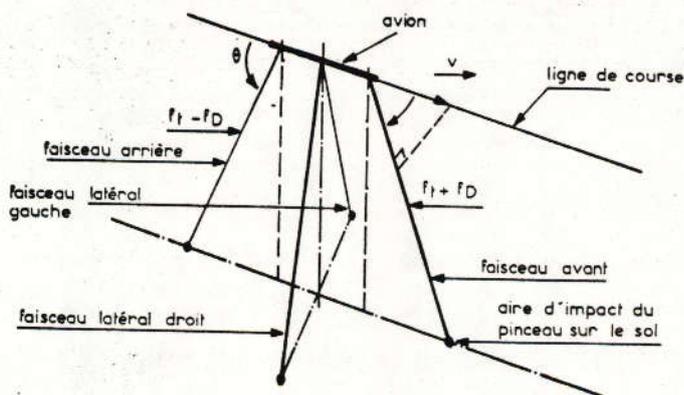


Fig. 9. - Equipement aéroporté permettant de déterminer la vitesse réelle de l'aéronef par rapport au sol.

RADARS DÖPPLER A IMPULSIONS

Pour obtenir, outre la mesure de l'objectif, sa distance, il est nécessaire d'employer une méthode différentielle. Il est donc utile de combiner les qualités d'un radar à impulsions à des équipements à suppression d'échos fixes, ce que le « radar pulse Doppler ». Les impulsions reçues au retour sont des portions découpées de la réponse globale expliquée au cas précédent (§ 1.1.). Une cible fixe émet une série d'impulsions uniformes, alors qu'un objet se transcrit sur l'écran sous forme d'impulsions dont l'amplitude varie périodiquement. L'analyse de ce signal permet de déterminer la cohérence de phase. Chaque fois qu'un écho de l'objectif fixe est reçu, il est mélangé à une onde de tension qui possède la même différence de phase par rapport à l'onde de référence. Il apparaît à la sortie du récepteur un signal identique et immuable. En comparant, avec les cibles mobiles, la sortie du discriminateur, la variation de

phase, qui dépend de la vitesse, par une séquence dont le niveau crête varie en fonction de l'effet Doppler (fig. 8).

À la sortie de l'extracteur, le circuit électronique post-vidéo, chaque bloc d'information contient un signal de la forme :

$$e = E_0 \sin \pi f_d \theta$$

où : E_0 est la tension de sortie de la référence, θ l'intervalle entre les impulsions contiguës.

Le problème actuel, sur lequel les meilleurs radaristes, prétendent est le bruit de phase de l'impulsion contenant la porteuse haute fréquence. Le bruit de fréquence est mesurable à l'aide de systèmes métrologiques (hyperfréquences) très élaborés, mais convenables. La méthode d'interprétation du bruit de phase n'est pas encore complètement élucidée.

4. SYSTÈMES DE NAVIGATION

4.1. « NAVIGATEUR » DÖPPLER

Il s'agit d'un dispositif émettant deux, quatre (ou

quelquefois plus) rayons électromagnétiques fins, en avant et en arrière, d'une surface réfléchissante, qui met à profit le changement de fréquence consécutif au déplacement Doppler observé dans la radiation de retour, pour mesurer la vitesse du véhicule par rapport au plan de référence (fig. 9).

Ce système est du genre aéroporté, hélicoptère, bref, réservé aux aéronefs.

Son homologue, ultrasonore, cette fois-ci, est utilisé (à moindre extension que le précédent, toutefois) sur les navires.

4.2. V.O.R. DÖPPLER

La radionavigation aérienne, moyenne distance, utilise des balises électroniques très haute fréquence (V.H.F.) irradiant dans tout l'espace (omnidirectionnel range) une série de nappes électromagnétiques, grâce auxquelles le navigateur repère sa position en gisement (noté θ), par référence aux coordonnées géographiques du point où l'émetteur correspondant est implanté (fig. 10).

Les récepteurs V.O.R. classiques, aéroportés présentent

les caractéristiques énoncées ci-après, conformes aux normes OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) :

- 20 canaux dans la bande 108-112 [MHz] (mêlés avec le rayonnement de localisation - « I.L.S.-localizer » d'aide à l'atterrissage).

- 60 canaux dans la bande 112-128 [MHz].

L'antenne pivote à raison de 30 tours par seconde, ce qui module le signal émis en amplitude (modulante de 30 [Hz]).

Une sous-porteuse stable de 9960 [MHz] est modulée en fréquence avec l'onde de 30 Hz qui lui confère une excursion de ± 480 [Hz].

Le gisement est une fonction de la différence de phase entre la phase du signal F.M. et celle du signal A.M.

L'idée du V.O.R. Doppler consiste à utiliser une antenne omnidirectionnelle délivrant une irradiation très ouverte (aérienne dont le diamètre est de 14 [m] environ) afin de générer un signal à phase variable. La phase de référence est fournie par une antenne centrale (fig. 11).

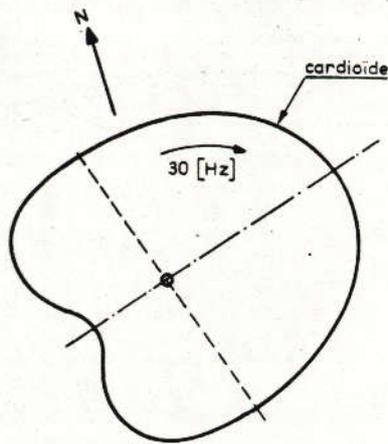
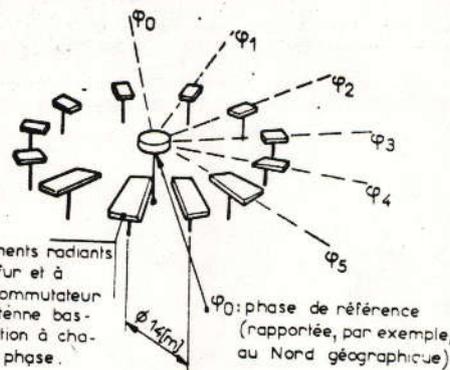


Fig. 10. - Diagramme rotatif d'une antenne V.O.R. de radionavigation à moyenne distance.



chacun des éléments radiants est alimenté au fur et à mesure par un commutateur électronique d'antenne basculant d'une position à chaque variation de phase.

Fig. 11. - Représentation schématique d'un V.O.R. impulsif à effet Doppler : antenne sol à multi-stimulation.

CONCLUSION

L'effet Doppler-Fizeau étudié dans le cadre des phénomènes périodiques au chapitre de la propagation. Il se trouve ainsi associé aux interférences (une source et un plan de réflexion, ou deux sources synchrones) et aux

battements (deux sources asynchrones).

Ce phénomène a permis de mesurer les vitesses radiales des étoiles et de déceler les amas stellaires. Il est couramment utilisé de nos jours pour mettre en évidence les vitesses de mobiles rapides.

Il sert à détecter l'arrivée de voitures pour des feux de cir-

culat placés sur des voies peu passante. On le retrouve aussi sur les autoroutes pour rappeler aux automobilistes que la vitesse est limitée sur telle portion du circuit.

Nous avons vu combien la mathématique qui l'explique s'avère simple. Ceci signifie que l'on n'a pas toujours besoin d'équations fastidieu-

ses pour rendre intelligible un phénomène physique. Hélas ! ce n'est pas toujours le cas et un bon électronicien doit s'entraîner à l'interprétation algébrique des données tout en se passionnant pour les calculs qui évitent beaucoup de tâtonnements en pratique.

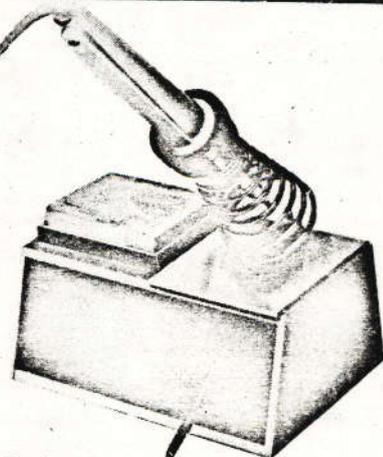
B. MARIN

WELLER W.T.C.P.

- Les performances d'un matériel professionnel
- Un prix : **335 F** (T.V.A. et frais de port en recommandé inclus).

Vous êtes exigeants pour la qualité de vos soudures. Nous le sommes pour la qualité de notre matériel.

- Fer ultra léger alimenté en basse tension par l'intermédiaire d'un transformateur : meilleure protection de l'utilisateur et des composants.
- Sélection et régulation de température pour un travail parfait.
- Panne en cuivre plaqué fer et métaux précieux (chrome et nickel) pour une plus grande durée de vie.
- Mise en route instantanée et inertie thermique faible.
- Protection par fusible.
- Interrupteur général avec voyant de contrôle.
- Cordon en silicone thermo-résistant.
- "Eponge nettoiyante" assurant la propreté et la longévité de la panne.



GENERIM distribue et assure la maintenance de tous les produits WELLER : fers et accessoires. (documentation sur demande)



GENERIM
GENERAL IMPORT

Avenue des Andes - Zone d'Activités de Courtabœuf
91403 ORSAY - Tél. 907.78.78 - Téléx 691700 F

BON DE COMMANDE A RETOURNER A : GENERIM, Avenue des Andes, Zone d'Activités de Courtabœuf, 91403 ORSAY.

- Veillez m'envoyer un fer WELLER W.T.C.P. au prix de 335 F (Prix T.T.C. et franco de port France métropolitaine).
- Ci-joint un chèque bancaire ou C.C.P. ou mandat à l'ordre de GENERIM GENERAL IMPORT.
 - Je réglerai "contre remboursement" (4 F de supplément à réception) .

NOM PRENOM SIGNATURE :

ADRESSE

CODE POSTAL