

## RAPPORT 716-3

## LA PHASE DE L'ONDE DE SOL

(Question 1/5)

(1978-1982-1986-1990)

**1. Introduction**

1.1 La phase de l'onde de sol est importante pour deux raisons principales. La stabilité de cette phase permet la mise au point de systèmes de radionavigation précis tels que les systèmes Decca et Loran-C. Inversement, la précision avec laquelle la phase de l'onde de sol est mesurée au moyen de ces systèmes de navigation permet une vérification expérimentale précise des théories relatives à la propagation de l'onde de sol.

1.2 Il est commode de définir la phase  $\Phi$  de l'onde de sol comme la somme d'une phase primaire et d'une phase secondaire  $\Phi_s$ . A une distance,  $d$ , d'un émetteur, la phase de l'onde de sol peut être représentée par:

$$\Phi = nkd + \Phi_s$$

où  $n$  est la valeur au voisinage du sol de l'indice de réfraction de l'atmosphère et  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  étant la longueur d'onde en espace libre du signal de l'onde de sol. Dans cette équation, la phase secondaire  $\Phi_s$  est exprimée en radians. Toutefois, dans la plupart des applications, on l'exprime en microsecondes sous forme de temps de propagation de phase; on a, entre les deux, la relation:

$$t_s = \frac{\Phi_s \cdot \lambda}{2\pi \cdot 300} = \frac{\Phi_s \cdot 10^6}{2\pi f}$$

dans laquelle:

$t_s$ : temps de propagation de phase secondaire ( $\mu$ s)

$\Phi_s$ : phase secondaire (rad)

$\lambda$ : longueur d'onde (m)

$f$ : fréquence (Hz).

Le reste du présent Rapport a trait aux divers facteurs influant sur la phase secondaire et aux méthodes permettant de la calculer.

**2. Propagation au-dessus d'un terrain régulier et homogène**

Le point de départ essentiel du calcul de la phase secondaire est la théorie de la propagation de l'onde de sol au-dessus d'une Terre régulière et homogène [Johler et autres, 1956]. Les méthodes actuelles sont identiques à celles qui ont servi pour tracer les courbes de propagation de l'onde de sol que l'on trouve dans la Recommandation 368. Cette méthode fondamentale peut aussi être appliquée aux systèmes de radionavigation à impulsions [Johler et autres, 1979].

Pour permettre l'application de cette méthode fondamentale à des cas plus généraux, il est utile d'exprimer les résultats des calculs sous la forme d'une impédance de surface générale [Hill et Wait, 1980]. Bon nombre des méthodes utilisées pour calculer la phase de l'onde de sol emploient le concept d'impédance de surface équivalente qui englobe les notions de conductivité et de permittivité équivalentes.

### 3. Perturbations de la phase secondaire

Aux fréquences inférieures à 3 MHz environ, on peut utiliser la théorie de la Terre régulière et homogène pour calculer la phase de l'onde de sol avec la précision exigée pour les systèmes de navigation, notamment sur des trajets maritimes caractérisés, dans certains cas, par la présence de grosses vagues. Sur les trajets terrestres, la phase secondaire est au contraire modifiée par les variations des caractéristiques électriques le long du trajet, par les irrégularités du terrain et par les couches au-dessous de la surface du sol. Diverses méthodes ont été mises au point pour la prévision de la perturbation de la phase secondaire due à ces facteurs [Samaddar, 1979].

#### 3.1 Couches au-dessous de la surface du sol

L'effet des couches au-dessous de la surface du sol sur la propagation de l'onde de sol est décrit dans le Rapport 229. Pour calculer la phase de l'onde de sol, on peut utiliser la méthode de l'impédance équivalente [Wait, 1970] qui sert à calculer l'amplitude de l'onde de sol. Il faut cependant disposer pour cela d'un modèle approprié des caractéristiques électriques des couches au-dessous de la surface du sol [Johler et Horowitz, 1974] permettant le calcul de l'impédance équivalente du sol. Cette même méthode peut être utilisée sur des trajets maritimes pour prévoir les effets qu'exerce sur la phase la présence de glace dans l'eau de mer [Bourne et autres, 1970].

#### 3.2 Trajets non homogènes

Lorsque les caractéristiques électriques ou l'impédance du sol le long d'un trajet varient, par exemple, à la limite entre la terre et la mer, on observe une variation brusque correspondante de l'amplitude et de la phase de l'onde de sol. Dans ce cas, la phase peut être calculée au moyen de la méthode de Millington-Presssey [Presssey et autres, 1953]. Cette méthode est tout à fait analogue à la méthode imaginée par Millington pour calculer l'amplitude de l'onde de sol sur des trajets non homogènes. La phase d'un signal d'onde de sol pour un trajet à deux sections peut se calculer à partir des formules de la méthode de Millington décrite dans l'Annexe II à la Recommandation 368, à condition de remplacer les amplitudes des formules par les phases correspondantes applicables à une Terre homogène.

Des mesures de signaux Loran-C (100 kHz) sur un trajet de 600 km au nord de la Norvège ont permis de constater un bon accord entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées par la méthode de Millington-Presssey. De bons résultats peuvent aussi être obtenus en appliquant la méthode simplifiée (graphique) de Millington [Saether et Vestmo, 1987].

Lorsque les caractéristiques électriques du sol sont différentes dans différentes directions, le front de l'onde est courbé dans la région de la zone de conductivité la plus faible. Ceci peut provoquer des difficultés dans les systèmes radiogoniométriques. Des mesures effectuées au Danemark ont montré que des signaux provenant d'une balise radioélectrique (374 kHz) avaient accusé des écarts allant jusqu'à 10° par rapport à l'azimut correct [Stokke, 1988].

#### 3.3 Irrégularités du terrain

Le Rapport 1145 contient la description d'une théorie de l'impédance équivalente permettant le calcul des facteurs de propagation de l'onde de sol au-dessus d'un terrain irrégulier. Toutefois, la précision que nécessite la navigation exige des calculs très complexes. Dans ce cas, il est plus efficace d'utiliser la méthode de l'équation intégrale pour calculer la phase de l'onde de sol.

#### 3.4 Méthode de l'équation intégrale

Cette méthode est décrite dans le Rapport 1145. On peut l'utiliser pour calculer la phase de l'onde de sol au-dessus d'un terrain irrégulier et non homogène. La Fig. 1 représente une comparaison des méthodes de calcul et des mesures expérimentales [Samaddar, 1979]. Le trajet indiqué traverse «Death Valley» (Californie) à une hauteur de 100 m par rapport au niveau de la mer, ainsi que la chaîne de la Sierra Nevada. Pour la méthode de calcul Millington-Presssey, on a utilisé un modèle d'impédance équivalente à deux couches correspondant à une Terre régulière.

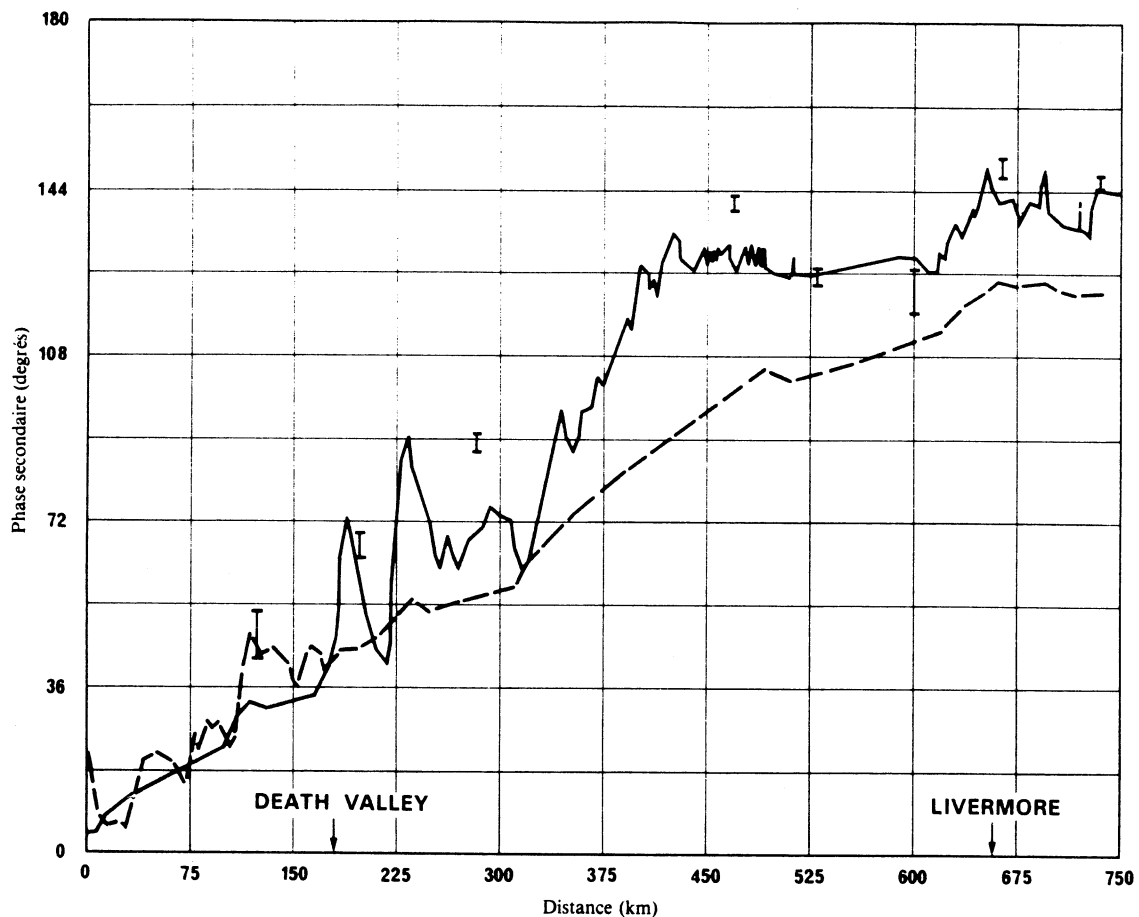


FIGURE 1 - Comparaison de la phase mesurée et calculée pour le système Loran-C de la côte ouest des Etats-Unis d'Amérique

(Les points mesurés sont représentés par le symbole (I). La courbe en trait plein a été calculée au moyen de la méthode faisant appel à l'équation intégrale. La courbe en tirets a été calculée au moyen de la méthode de Millington-Pressey avec des impédances de surface équivalentes pour un modèle à deux couches. A 100 kHz, une phase secondaire de  $36^\circ$  correspond à  $1 \mu\text{s}$  (voir le § 1.2).)

#### 4. Effets météorologiques

Plusieurs recherches portant sur la stabilité des signaux du système Loran-C ont révélé l'existence de variations de phase correspondant à des variations du temps d'arrivée de  $\pm 0,5 \mu\text{s}$  [Doherty et Johler, 1975; Samaddar, 1980]. Ces variations présentent une caractéristique diurne et une caractéristique à long terme et sont en corrélation avec les variations du gradient du terme «sec» de l'indice de réfraction. Les variations à long terme sont associées au passage de fronts météorologiques le long du trajet mesuré.

On a constaté que des variations de la phase de l'onde de sol précèdent le passage d'un front chaud. Des variations similaires associées à un front froid se produisent après le passage de celui-ci. Il sera vraisemblablement possible à l'avenir de corriger les données de navigation pour compenser en moyenne les effets météorologiques en utilisant les données provenant des stations météorologiques et des stations de contrôle des systèmes.

Des mesures à 100 kHz sur un trajet de 600 km, pour la plus grande partie au-dessus d'un sol de conductivité médiocre au nord de la Norvège, ont montré que le temps de propagation de phase présentait des variations climatiques saisonnières de l'ordre de 200 à 400 ns [Saether et Vestmo, 1987].

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOURNE, I. A., ROSS, D. B. et SEGAL, B. [1970] Phase instability in radio waves propagating across ice-covered seas. AGARD Conf. Proc. No. 33, NTIS Accession Number AD 882901, National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- DOHERTY, R. H. et JOHLER, J. R. [1975] Meteorological influences on Loran-C ground-wave propagation, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 1117-1124.
- HILL, D. A. et WAIT, J. R. [1980] Ground-wave attenuation function for a spherical earth with arbitrary surface impedance. *Radio Sci.*, Vol. 15, 3.
- JOHLER, J. R., DOHERTY, R. H. et COOK, A. R. [1979] Loran-C pulse transient propagation. DOT United States Coast Guard Report CG-D-52-79 NTIS Accession Number AD 077551 NTIS, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- JOHLER, J. R. et HOROWITZ, S. [mars 1974] Propagation of a Loran pulse over irregular, inhomogeneous ground. AGARD Conf. Proc. No. 144 on Electromagnetic wave propagation involving irregular surfaces and inhomogeneous media. 28-1 to 28-13 (Edité par Dr. A. N. Ince. SHAPE Technical Centre, P.O. Box 174, La Haye, Pays-Bas.) NTIS Accession Number AD A008583, National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- JOHLER, J. R., KELLAR, W. J. et WALTERS, L. C. [juin 1956] Phase of the low radio-frequency ground wave. NBS Circular 573, Supplément de Documents, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402, Etats-Unis d'Amérique.
- PRESSEY, B. G., ASHWELL, G. E. et FOWLER, C. S. [1953] The measurements of the phase velocity of ground-wave propagation at low frequencies over a land path. *Proc. IEE*, 100, Pt. III.
- SAETHER, K. et VESTMO, E. [1987] - Loran-C signal stability study in North Norway. *Teletronikk nr. 1*, pp 89-94. Administration des télécommunications norvégienne, Oslo.
- SAMADDAR, S. N. [1979] The theory of Loran-C ground-wave propagation — A review. *Navigation*, Vol. 26, 3.
- SAMADDAR, S. N. [1980] Weather effects on Loran-C propagation, *Navigation*, Vol. 27, 1.
- STOKKE, K. N. [1988] Measurements of signals from a radio beacon. Influence of the ground conductivity. *Teletronikk No. 1*, Administration des télécommunications norvégienne.
- WAIT, J. R. [1970] *Electromagnetic Waves in Stratified Media*, 2<sup>e</sup> édition, Pergamon Press, Oxford, Royaume-Uni.
-