



TECHNIQUE DE TRANSMISSION DE SIGNAUX EN ELF-ULF

G. SALVINI, ENSPM

ENSPM, U3 ST. JEROME, 13397 MARSEILLE cedex 13

RESUME

La propagation des ondes électromagnétiques dans l'eau de mer exige, pour compenser les effets de l'absorption et augmenter la portée, l'utilisation des très basses fréquences (ELF et ULF, Extremely et Ultra low frequencies). Cela implique la mise en oeuvre de technologies connues sous contraintes particulières: antennes coaxiales longues, cadres ou noyaux magnétiques alimentés en forts courants. On propose ici un système de transmission à volume ferromagnétique avec réception par magnétomètre adapté. Le fonctionnement est prévu dans une bande de quelques Hertz à plusieurs centaines de Hertz.

1

INTRODUCTION. L'étude de la propagation des ondes électromagnétiques dans l'eau de mer (1) montre que l'absorption est importante et augmente avec la fréquence des signaux. Les transmissions se sont donc orientées vers le domaine des très basses fréquences, ULF et ELF. Les technologies employées pour produire un champ à distance consistent à faire passer du courant dans une ligne, un cadre ou un enroulement à noyau. Le câble long parcouru par un courant fort (1000 ampères) (2) semble avoir la faveur des utilisateurs. Parmi les réalisations on peut citer: les antennes du Wisconsin (USA) formées de deux câbles longs de 22 km excités par un courant de 300 A, dont la portée peut atteindre 11000 km en surface et 100 m de profondeur dans la bande 10-100 Hz;

le système SEDAR avec une antenne de 15 m portant à 100 m sous l'eau, consommant une puissance de 1 kw dans la bande téléphonique;

des dispositifs à boucle d'induction fonctionnant jusqu'à 33 kHz à des profondeurs de 20 à 90 m.

La plupart des émetteurs sont encombrants. Nous avons donc étudié les éléments d'un

SUMMARY

Transmission of electromagnetic waves through sea subsurface needs the use of very low frequencies, for absorption minimizing. It is necessary to work with well known proceedings in special disposition: long coaxial antennas, loops or magnetic cores with strong currents. We describe, here, a transmission device with ferromagnetic volume, magnetometric receiver, using frequencies from few Hz to hundreds Hz.

émetteur magnétique, formé d'enroulements à noyau ferromagnétique, qui devrait permettre de réduire notablement les dimensions. On effectue une comparaison de ses paramètres caractéristiques avec ceux du fil et du cadre simple.

Enfin on fait état du récepteur employé dans le prototype réalisé: un magnétomètre capable de fonctionner sur plusieurs fréquences sinusoïdales simultanées et automatiquement compensé de l'effet de ses mouvements dans le champ magnétique terrestre.

2

QUELQUES RESULTATS SUR LA PROPAGATION ELECTROMAGNETIQUE DANS L'EAU DE MER.

Les bases du calcul se fondent évidemment sur la solution des équations de Maxwell en milieu homogène exprimée en régime harmonique:

$$H = H_0 e^{-kr}$$

en ondes planes

où H_0 est le champ magnétique à l'origine
 H est le champ magnétique au point M
à la distance $OM=r$ (fig. 1).

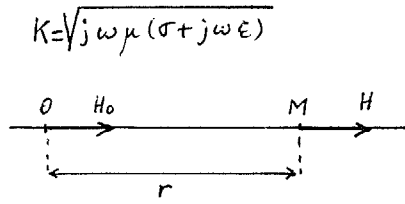


Fig. 1

- ω , pulsation, $\omega = 2\pi F$, F fréquence
- μ , perméabilité absolue,
- ϵ , permittivité absolue (constante diélectrique),
- σ , conductivité

sont des constantes du milieu.

On a aussi les relations:

- $J = \sigma E$ J, densité de courant
- E, champ électrique
- $B = \mu H$ B, induction magnétique
- $D = \epsilon E$ D, induction électrique.

Le champ instantané est donné par:

$$H(t,r) = H_0 e^{j\omega t - Kr}$$

en régime permanent sinusoïdal (AC),
t est le temps.

Les données pour l'eau de mer sont, en la considérant comme un milieu conducteur:

- conductivité $\sigma = 4,45$ mhos/m
- perméabilité $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
(μ_0 pour le vide)
- constante diélectrique:
 $\epsilon = 80 \epsilon_0 = 80 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}$

Le terme de conduction σ est très supérieur à celui du courant de déplacement, $\omega \epsilon$, de sorte que: $\sigma \gg \omega \epsilon$

la constante de propagation $K = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$ se réduit à:

$$K = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1+j) \frac{\omega\mu\sigma}{2} = \alpha + j\beta$$

avec: $\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\alpha = 4,19 \cdot 10^{-3} \sqrt{F}$ dB/m,
 λ , longueur d'onde, $\lambda = \sqrt{10^4/F\sigma}$

vitesse de phase: $v_\varphi = c = \frac{\omega}{\beta} = \lambda F = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}$

vitesse de groupe: $v_g = \frac{d\omega}{d\beta(\omega)} = \frac{1}{2} v_\varphi$

Le champ est alors donné par:

$$H(t,r) = H_0 e^{-\alpha r} e^{j(\omega t - \alpha r)}$$

où apparaissent les termes d'atténuation $e^{-\alpha r}$ et de phase $-\alpha r$.

L'induction magnétique est exprimée par:

$$B(t,r) = \mu_0 H(t,r)$$

$$B(t,r) = B_0 e^{-\alpha r} e^{j(\omega t - \alpha r)}$$

Si ce résultat est valable en ondes planes, il est toutefois insuffisant en très basse fréquence. L'onde rayonnée par l'élément produisant le champ magnétique n'est pas nécessairement de forme simple, sphérique ou plane. Le calcul doit donner un facteur $B_0(r)$ corrigeant $B(t,r)$ en rapport avec la géométrie de l'émetteur.

3

CHAMP ET INDUCTION PRODUITS PAR UN FIL CONDUCTEUR.

L'approche la plus classique est celle du "doublet" de Hertz (3) par la méthode des potentiels retardés. Son intérêt ici est de servir de référence théorique. Des cas pratiques ont été calculés par certains auteurs (,): câble coaxial immergé, isolé, avec circuit du courant se refermant par la mer, produisant $B=1$ nT à 130 m (1 nT=10 μ G). Dans l'hypothèse d'un conducteur rectiligne de longueur ℓ (fig. 2), on obtient:

pour le champ:

$$H_\varphi = \frac{1}{4\pi} \sin\theta I \ell \left(\frac{1}{r_2} + \frac{K}{r} \right) e^{-Kr} e^{j\omega t}$$

pour l'induction:

$$B(t,r) = \mu_0 \frac{\sin\theta}{4\pi} I \ell \left(\frac{1}{r_2} + \frac{K}{r} \right) e^{-Kr} e^{j\omega t}$$

I est l'amplitude du courant dans le fil.

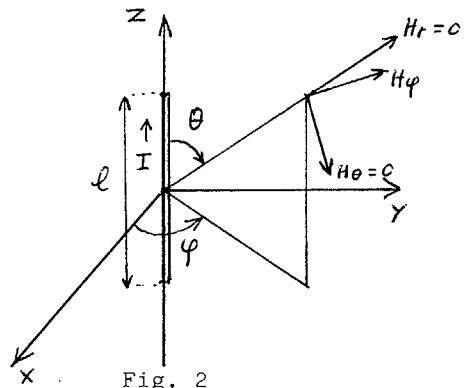


Fig. 2

La direction de $B(t,r)$ est perpendiculaire à celle du conducteur. L'amplitude complexe est fonction de r. On peut mettre en évidence un déphasage supplémentaire:

$$\gamma = \text{Arc tg} \frac{\alpha r}{1 + \alpha r}$$

et écrire l'induction sous la forme:

$$B(t,r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sin\theta \frac{I \ell}{r^2} \sqrt{1 + 2\alpha r + \alpha^2 r^2} e^{-\alpha r} e^{j(\omega t - \alpha r + \gamma)}$$

où apparaît l'action du milieu sur la phase et l'amplitude du signal magnétique.

4

INDUCTION MAGNETIQUE SUR L'AXE D'UN CADRE RECTANGULAIRE DE SECTION S.

Il y a N tours de fil, S=a.b (fig. 3).
La symétrie du système (fig. 4) permet d'écrire:

$$B(t,r) = k B_{\varphi_0} \sin u \quad (\text{si } a=b).$$

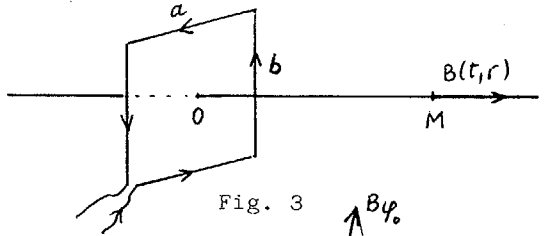


Fig. 3

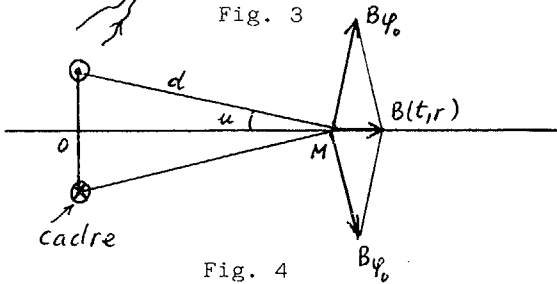


Fig. 4

avec: $B_{\varphi_0} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \ell}{d^2} (1+k d) e^{-k d}$ ($\ell = a \text{ ou } b$)
si $r \gg a$) $S = a \cdot b$;
 $r \gg b$

$$B(t,r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2 N I S}{r^3} \sqrt{1+2\alpha r + 2\alpha^2 r^2} e^{-\alpha r} j(\omega t - \alpha r + \delta)$$

La symétrie montre aussi que sur l'axe les champs électriques E_r et E_θ donnent des résultantes nulles. Comme $E_\varphi = 0$, il n'existe donc sur l'axe que la seule composante d'induction magnétique $B(t,r)$.

5

INDUCTION PRODUITE SUR L'AXE PAR L'ENROULEMENT UNIFORME SUR NOYAU FERROMAGNETIQUE.

L'enroulement comprend n tours par mètre, $n = N/\ell_n$, bobinés sur toute la longueur ℓ_n du noyau de perméabilité relative μ_r (fig.5) Si $r \gg \ell_n$ et $r \gg a$ ou b , il existe un cadre équivalent de moment magnétique:

$$M = \mu_r N I S, \quad S = a \cdot b.$$

Cette hypothèse, valable en courant continu, est transposée ici en régime permanent sinusoïdal; il y a lieu d'être prudent sur son exactitude, car en alternatif, au niveau du noyau, les phénomènes sont plus compliqués qu'en continu. Les valeurs maximales du champ et de l'induction peuvent être déphasées. Il convient de corriger la perméabilité relative μ_r et de la remplacer par une perméabilité complexe μ_c ou plus approximativement par une valeur apparente μ_a à déterminer

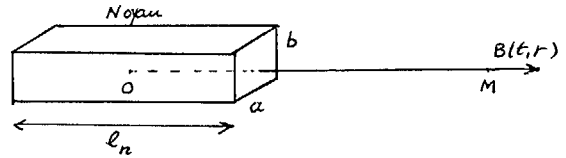


Fig. 5

expérimentalement. L'induction peut alors s'exprimer par:

$$B(t,r) = \frac{\mu_0 \mu_a}{4\pi} \frac{2 N I V}{\ell_n r^3} \sqrt{1+2\alpha r + 2\alpha^2 r^2} e^{-\alpha r} j(\omega t - \alpha r + \delta)$$

où: $\delta = \text{Arc tg} \frac{\alpha r}{1+\alpha r}$, $\alpha = \sqrt{\omega \mu_0 \sigma}$

où $V = a \cdot b \cdot \ell_n$ est le volume du noyau. Ceci montre que l'induction est proportionnelle au volume du noyau (lorsque N/ℓ_n est constant), donc au poids du métal. Cette relation rend compte de la sévérité du milieu marin vis-à-vis de l'induction qui décroît fortement par divergence de l'onde ($1/r^3$) et par absorption ($e^{-\alpha r}$).

6

GAIN APPORTE PAR L'ENROULEMENT A NOYAU.

En se référant au fil rectiligne, on peut écrire:

$$\text{Gain} = \frac{\mu_a 2 N I S}{r^3} \frac{r^2}{I_0 \ell} \quad (\sin \theta = 1)$$

$$G \gg 1 \text{ si: } \mu_a 2 N I S > r \cdot I_0 \cdot \ell$$

où I_0 est le courant dans le fil. Si maintenant on compare au cadre, l'induction est multipliée par μ_a grâce au noyau. On peut concevoir une disposition simple pour augmenter l'induction, donc la portée, en réalisant l'émetteur magnétique par juxtaposition d'éléments afin d'accroître le volume du noyau. L'expérimentation plus poussée permettra de trouver les limites d'un tel assemblage (fig. 6).

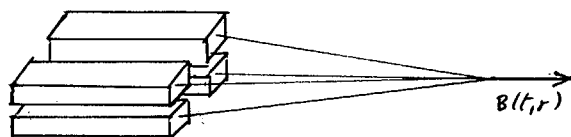


Fig. 6

7

LA RECEPTION MAGNETOMETRIQUE.

Le magnétomètre à noyau de mumétal présente une grande sensibilité, voisine du $\mu\text{Gauss} = 100 \text{ pT}$, grâce à l'utilisation de la détection synchrone sur harmonique 2. Cette sen-



sibilité est fortement dépendante de la qualité de traitement du noyau. Il a été reproché à ce type de capteur de se trouver saturé par le signal résultant de ses propres mouvements dans le champ magnétique terrestre, avec pour effet le masquage complet de la réception des signaux alternatifs, et comme conséquence l'impossibilité d'utiliser pleinement sa sensibilité lorsqu'un mobile en est équipé.

On a donc imaginé un dispositif complémentaire destiné à assurer la compensation automatique de l'action engendrée par les déplacements dans le champ terrestre, sans altération de la sensibilité aux signaux utiles. Des essais ont permis la réception de plusieurs fréquences simultanées dans la bande 10-100 Hz.

8

CONCLUSION.

On a fait fonctionner un prototype d'émetteur-récepteur dans l'air. Actuellement, avant de procéder en milieu marin, une partie codage à 5 fréquences est élaborée pour la transmission parallèle de caractères en code Baudot.

Les mesures devront permettre de préciser les paramètres caractéristiques de l'émetteur afin de l'optimiser.

L'expérimentation, grâce à la prise en compte de la dispersion importante du milieu, permettra également de choisir les fréquences et la durée des signaux à transmettre. L'effort entrepris pour mettre au point un procédé de codage parallèle est dicté par l'avantage qu'il présente sur le système séquentiel de diminuer le temps nécessaire à la transmission et de compenser ainsi la lenteur inhérente aux très basses fréquences utilisées.

9

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Electromagnetic Waves in Sea Water (Review). V.V. AKINDINOV, V.I. NARYSHKIN and A.M. RYAZANTSEV. (Article transmis par C. REY, IIRIAM, Marseille).
- (2) ULF/ELF Electromagnetic Fields Produced in a conducting Medium of Infinite Extent by a Linear Current Source of Finite Length. Aziz S. INAN, Antony C. FRASER-

SMITH and Oswald G. VILLARD, JR.
IEEE Transactions on Antennas and Propagation
Vol. AP 33-N° 12, Dec. 1985, pp. 1363-1368.

- (3) Compléments au cours d'électricité: sur la propagation des ondes électromagnétiques. J.M. BAUDON, D. HEISSAT. Institut National des Télécommunications (1985), pp. 33-78.
- (4) The Many Faces of the Insulated Antenna. Ronold W.P. KING, Proceedings of the IEEE, Vol. 64, N°2, Feb. 1976.
- (5) Extremely Low Frequency Quasi-Static Measurements from a calibrated Electric Field Source in the Ocean. Judith A. GIANNINI and David L. THAYER IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-30, N° 5, Sept. 1982, pp. 825-830.
- (6) Maximum Field Criteria for a Line Current Source in a Conducting Medium. Antony C. FRASER-SMITH, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-34, N° 5, May 1986, pp. 723-725.
- (7) Notes internes (1973), ENSPM, GANGI, J. MORHANGE, G. SALVINI.