

<b>Zeitschrift:</b>	Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen
<b>Herausgeber:</b>	Eidg. Verband der Übermittlungstruppen; Vereinigung Schweiz. Feld-Telegraphen-Offiziere und -Unteroffiziere
<b>Band:</b>	40 (1967)
<b>Heft:</b>	8
<b>Artikel:</b>	Propagation des ondes en eau douce
<b>Autor:</b>	Dessoulavy, Roger / Hunkeler, Adrian
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-562709">https://doi.org/10.5169/seals-562709</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 29.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Propagation des ondes en eau douce

## 1. Introduction

Il est bien connu que les liaisons radio avec des submersibles en plongée dans la mer s'effectuent avec des ondes très longues (dizaines de kHz), étant donné que leur affaiblissement augmente considérablement avec la fréquence. Il s'avère généralement plus favorable d'établir des liaisons avec les sous-marins ou entre eux par ultra-sons, dont la portée est nettement plus considérable et qu'il est possible de concentrer en faisceaux.

La raison de l'affaiblissement des ondes électro-magnétiques dans l'eau s'explique par la conductivité du milieu dans lequel les ondes se propagent. Dans l'air, qui est un isolant, le champ électrique de l'onde n'engendre aucun courant de conduction, toute l'énergie de l'onde est conservée au cours de sa propagation. Dans l'eau, par contre, des courants circulent d'autant plus intensément que la conductivité est élevée, ils soutiennent à l'onde l'énergie nécessaire à couvrir les pertes par effet Joule, ce qui explique l'amortissement de l'onde.

Les sels dissous dans l'eau salée lui confèrent une conductivité quelques centaines de fois plus grande que celle de l'eau douce. On peut donc s'attendre à obtenir pour cette dernière un affaiblissement des ondes radio nettement plus faible qu'en mer.

L'occasion unique offerte par la présence du mésoscaphie dans le Léman nous a incités à vérifier expérimentalement ces propriétés, ce qui, à notre connaissance, n'avait pas encore été tenté. Les expériences ont pu heureusement se réaliser au début de 1965 dans le cadre d'une série d'expériences scientifiques touchant à des domaines divers (pollution des eaux, gravimétrie, géologie...), et pour lesquelles l'Exposition Nationale Suisse a mis son submersible à disposition.

## 2. Calcul de l'affaiblissement des ondes

Les équations de Maxwell permettent de calculer aisément les conditions de propagation des ondes dans un milieu caractérisé par:

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_r \mu_0 && \text{perméabilité} \\ \varepsilon &= \varepsilon_r \varepsilon_0 && \text{permittivité} \\ \sigma & && \text{conductivité}\end{aligned}$$

Dans le cas de l'eau:

$$\mu_r = 1, \text{ d'où: } \mu = \mu_0 = 0,4 \pi 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$\varepsilon_r \approx 81, \text{ d'où: } \varepsilon \approx \frac{81 \cdot 10^{-9}}{36 \pi} = \frac{9 \cdot 10^{-9}}{4 \pi} \text{ F/m}$$

$$\sigma \approx 4,6 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ pour l'eau salée}$$

$$\sigma \approx 16,2 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ pour l'eau douce à environ } 5^\circ\text{C.}$$

Valeur mesurée au cours des plongées.

Il est à remarquer que la conductivité varie avec la température (augmentation d'environ 2 % par  $^\circ\text{C}$ ).

Rappelons que pour une onde plane l'exposant linéique de propagation peut être tiré des valeurs citées plus haut et de la fréquence  $f$ :

$$\bar{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\delta + j\omega\varepsilon)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}\alpha &= \text{Re}\{\bar{\gamma}\} && \text{affaiblissement linéique en N/m} \\ \beta &= \text{Im}\{\bar{\gamma}\} && \text{déphasage linéique en rad/m} \\ \omega &= 2\pi f && \text{pulsation en s}^{-1} \\ f & && \text{fréquence en Hz}\end{aligned}$$

Nous nous intéressons particulièrement à la valeur de l'affaiblissement linéique  $\alpha$ , qui caractérise la baisse exponentielle de l'intensité des champs électriques et magnétiques avec la distance, ici la profondeur en dessous de la surface.

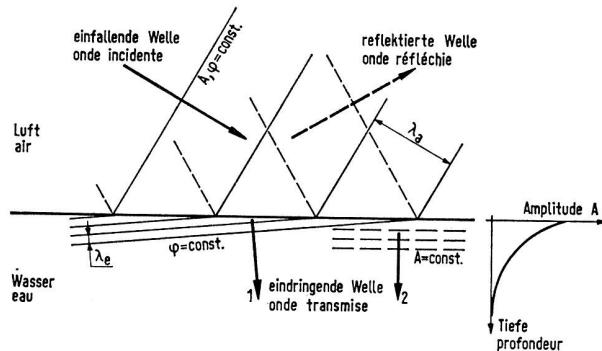


Fig. 1

$\lambda_a$  = Longueur d'onde dans l'air

$\lambda_e$  = Longueur d'onde dans l'eau

L'analyse exacte du problème de la transmission d'ondes planes en provenance d'un émetteur lointain et frappant la surface de l'eau avec un certain angle d'incidence est relativement compliquée. La majeure partie de l'onde est réfléchie et seule une petite fraction pénètre dans l'eau. L'onde ainsi transmise est caractérisée par des plans distincts de phase et d'amplitude constantes. Alors que l'onde se propage apparemment obliquement selon les lois de la réfraction, son amplitude varie selon la verticale ainsi que l'illustre la figure 1. Le calcul montre que l'affaiblissement avec la profondeur est pratiquement le même que celui d'une onde avec incidence normale (fig. 2), ce qui facilite grandement la suite des calculs. On tirera donc l'affaiblissement linéique directement de l'équation (1):

$$\alpha = \text{Re}\{\bar{\gamma}\} = \text{Re}\{\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)}\} \quad (2)$$

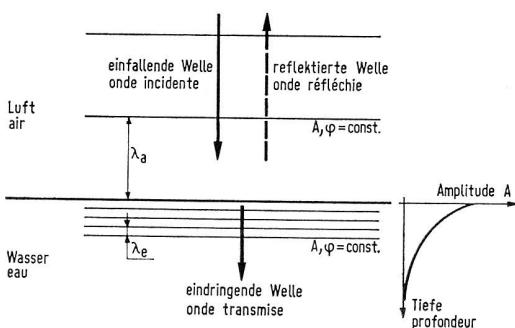


Fig. 2

$\lambda_a$  = Longueur d'onde dans l'air

$\lambda_e$  = Longueur d'onde dans l'eau

Deux cas limites sont à envisager et donnent des résultats simples:

Fréquences relativement basses

Pour les fréquences suffisamment basses, telles que:

$$\omega \epsilon \ll \sigma$$

l'équation (2) donne:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (3)$$

C'est le cas du milieu dit «bon conducteur». On constate l'avantage qu'il y a à utiliser des fréquences les plus basses possibles pour obtenir un faible affaiblissement.

Par ailleurs, la longueur d'onde est caractérisée par la valeur de  $\beta$  qui est la même que celle de  $a$ :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \quad (4)$$

La célérité  $v$  des ondes est alors beaucoup plus faible que dans l'air.

Fréquences relativement élevées

Pour les fréquences telles que:

$$\omega \epsilon \ll \sigma$$

l'équation (2) donne:

$$\alpha = \alpha_{\max} = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (5)$$

C'est la valeur limite maximale de l'affaiblissement linéique, qui est alors indépendante de la fréquence, pour autant que  $\sigma$ ,  $\mu$  et  $\epsilon$  en soient indépendants. Cela correspond au cas d'un milieu avec faibles pertes par longueur d'onde.

A titre indicatif, calculons cet affaiblissement linéique pour l'eau salée et pour l'eau douce avec les valeurs numériques citées plus haut:

$$\alpha_{\max} = \begin{cases} 97 \text{ N/m (840 dB)} & \text{en eau salée} \\ 0,34 \text{ N/m (2,95 dB/m)} & \text{en eau douce} \end{cases}$$

La variation de l'affaiblissement linéique pour une gamme étendue de fréquences est représentée à la figure 3.

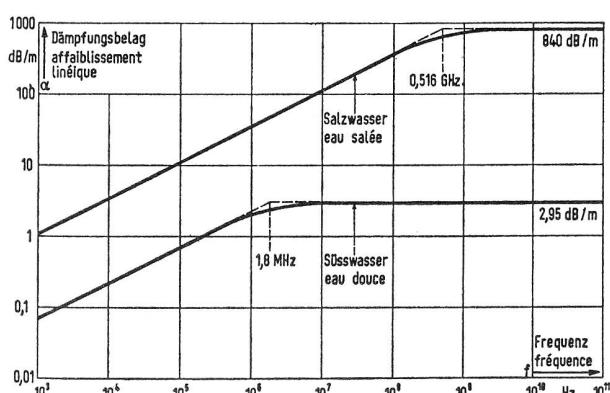


Fig. 3

Affaiblissement linéique  $\alpha$  en fonction de la fréquence  $f$

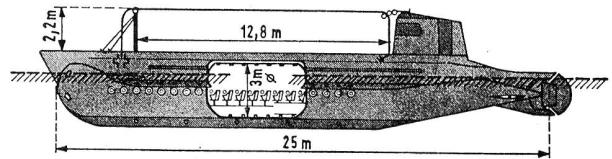


Fig. 4  
Mésoscaphe avec antenne à cadre

### 3. Dispositif de mesure

Au cours d'essais préliminaires, nous avons constaté dans la gamme de fréquences de 16 à 1000 kHz la présence de différents signaux assez forts, dont l'intensité de champ variait peu au cours d'une journée. Pour cette raison, il fut possible de se passer d'un émetteur propre, et il suffit de préparer pour le mésoscaphe un dispositif de réception, tel qu'il est représenté schématiquement dans les figures 4 et 5. Cet ensemble comprend essentiellement les parties suivantes:

- antenne à cadre, constituée par un fil isolé tendu et une partie du corps du bateau
- condensateur variable, formant un circuit résonnant parallèle avec l'inductivité du cadre
- récepteur Siemens E 566, dont la tension de contrôle automatique du gain (variant avec la tension HF à l'entrée) était branchée sur
- un amplificateur à courant continu, Keithley modèle 610
- un enregistreur Esterline 1 mA, enregistrant la tension HF en fonction du temps, pour une variation régulière de la profondeur.

En principe, une antenne sensible au champ électrique aurait aussi pu être utilisée. Mais aux fréquences choisies, l'adapta-

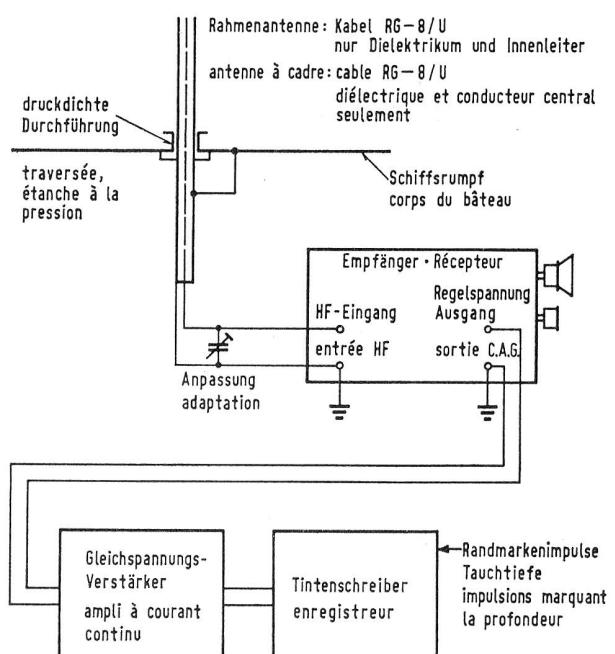


Fig. 5

Schéma de principe du dispositif de réception

tion du cadre à la haute impédance d'entrée du récepteur était réalisable avec des moyens simples. La traversée coaxiale étanche à la pression fut conçue par l'Expo et construite par l'EPUL.

Les émetteurs de télégraphie et de radiodiffusion mentionnés ci-après servaient pour les mesures. Leur intensité de champ fut déterminée en surface sur une vedette à l'emplacement des plongées:

Emetteur	Rugby Angleterre	Loran C Espagne	Europe I Sarre	Sottens
fréquence	16	100	180	764 kHz
puissance	250	100	400	150 kW
distance	860	≈ 700	290	22 km
azimut	320	≈ 240	5	32 °
intensité de champ	2,2	1,6	11,2	112 m V/m

### Résultats des mesures

Pour avoir des conditions aussi stables que possible et sans perturbations électriques des moteurs, nous avons fait les mesures lors de plongées et de remontées statiques du bateau, avec azimut constant et faible vitesse d'avancement. Au cours des différentes plongées, la variation de l'amplitude HF fut enregistrée. Les valeurs moyennes de ces mesures sont données par la figure 6.

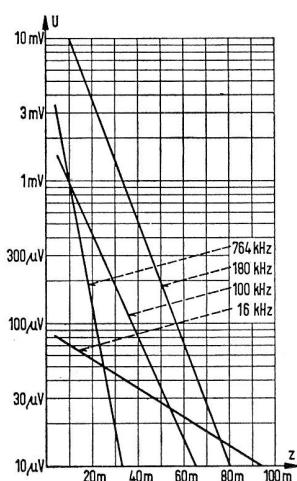


Fig. 6  
Tension HF reçue U en fonction de la profondeur z

En utilisant une échelle logarithmique pour la tension HF, U, la décroissance exponentielle avec la profondeur z (centre de l'antenne à cadre) apparaît clairement. L'influence de la fréquence sur l'affaiblissement linéaire se traduit par les pentes différentes des droites. On peut alors indiquer l'affaiblissement linéaire mesuré et le comparer avec le calcul (figure 3). Le tableau ci-dessous donne en outre l'erreur relative  $r$  de nos observations.

fréquence	f	16	100	180	764 kHz
erreur relat.	$r$	$\pm 12$	$\pm 9,4$	$\pm 7,0$	$\pm 11 \%$
a mesuré		0,20	0,71	0,90	1,75 dB/m
a calculé		0,29	0,71	0,95	1,84 dB/m

Cette comparaison démontre une bonne concordance entre la théorie et la mesure.

Pour compléter les résultats ci-dessus, voici encore quelques observations supplémentaires faites au cours de ces mesures. En faisant tourner le bateau sous l'eau, nous avons pu juger de l'effet directif de notre antenne à cadre. Lors de cet essai de radiogoniométrie, on mesura pour les émetteurs présents les azimuts prévus. A une profondeur de 10 m, le rapport entre les tensions de réception maximum et minimum était de 16 dB à 16 kHz et de 13 dB à 100 kHz. Il existe donc aussi pour l'exactitude du relèvement un avantage à utiliser des fréquences basses. En ce qui concerne le facteur de surtension du cadre, nous n'avons pratiquement pas noté de différence lorsque le cadre était hors de l'eau ou dans l'eau à la fréquence de 16 kHz, par contre pour les fréquences plus hautes le facteur de surtension tombait pour le cadre immergé à la moitié environ de sa valeur dans l'air.

Pour terminer, rappelons que les conditions de réception dans l'eau sont données par les propriétés du dispositif et par les niveaux du signal utile et des parasites. Il était possible de capter des signaux télégraphiques à 16 kHz jusqu'à une profondeur de 100 m avec un matériel qui n'était pas trop compliqué.

Roger Dessoulaury, Lausanne  
Adrian Hunkeler, Berne

Bulletin Technique PTT 5/1966