

## **Ernst LECHER (1856-1926).**

**Ernst LECHER** est né à Vienne et travaille sur la calorimétrie et le rayonnement thermique à l'université de Vienne. Il s'intéresse aux ondes électromagnétiques puisque la lumière visible et infrarouge rayonnée par les corps chauds pouvait être de même nature. En 1895, Lecher fut nommé professeur à l'université allemande de Prague comme successeur du physicien Mach. En 1909, il devint directeur du premier institut de physique de Vienne. Avant lui Faraday (1791-1867) supposait qu'un corps peut agir sur un autre au moyen d'un champ qu'il visualisait en terme de lignes de force. Maxwell (1831-1879) établit les équations de ces champs électriques et magnétiques. Ces équations prévoient le phénomène fondamental de la propagation. Hertz (1857-1894) confirme expérimentalement grâce à une oscillation très rapide générée par une bobine de Ruhmkorff. Il détecte l'onde grâce à une boucle presque fermée produisant une étincelle à la résonance.

Il montre ainsi l'existence des ondes électromagnétiques, qui obéissent aux lois de l'optique. Lecher confirme peu de temps après en propageant l'onde sur deux fils parallèles.

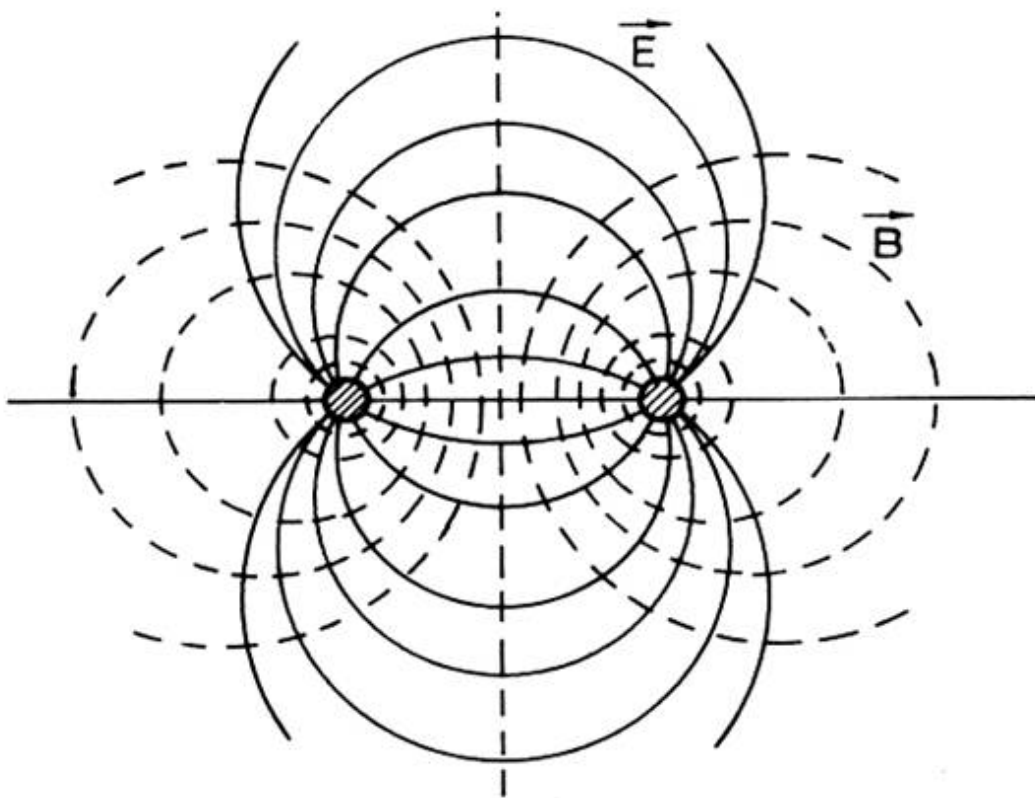
Reproduisons l'expérience de Lecher, 130 ans après, avec 2 fils cylindriques de diamètre  $d$  et d'entre axe  $D$ .

La bobine de Ruhmkorff est remplacée par une source cosinusoidale de puissance disponible  $\sim 10W$ , à la fréquence de 200,0016 MHz. La ligne bifilaire porte une onde "normale" allant de la source (à gauche) vers la terminaison T (à droite). A la terminaison T, l'onde "butant sur rien" voit sa puissance inutilisée en ce point. Une partie de la puissance repart vers la source, c'est l'onde réfléchie (miroir). Mais l'onde "normale" (directe ou incidente) rayonne (éclaire) autour des fils sous forme de champ magnétique B et champ électrique E (voir la coupe transversale). Ainsi elle s'affaiblit de gauche à droite, de même l'onde réfléchie s'affaiblit en allant de droite à gauche. Le phénomène essentiel à comprendre, est qu'en tout point de la ligne, les deux ondes s'additionnent avec leur "signe" (phase spatiale et temporelle). Soit il y a cumul ce qui donne un maximum de tension ou de champs E comme en M. Soit il y a décumul comme en m.

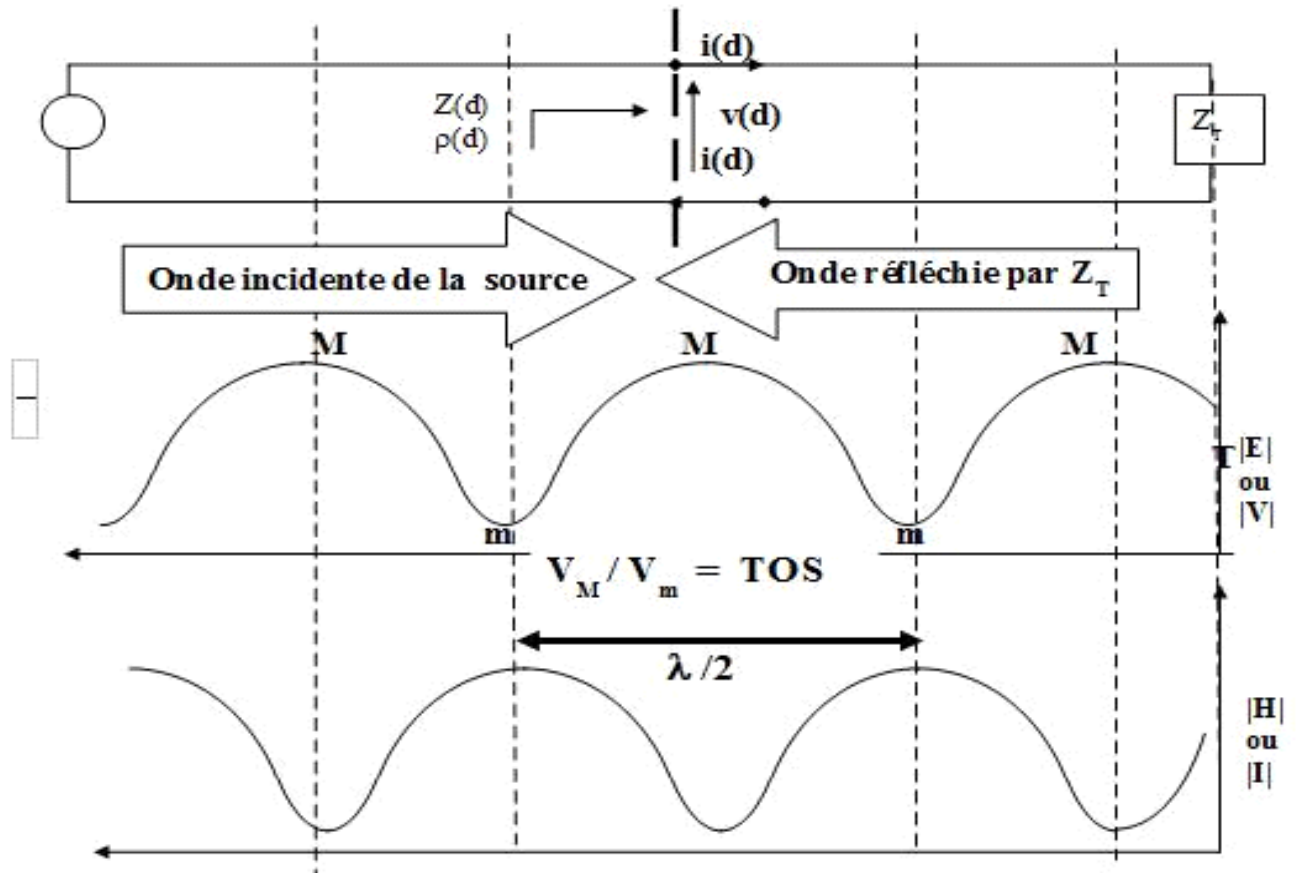
**! Puissance sortant du générateur = Puissance réfléchie + Puissance rayonnée.**

Une précaution que n'avais pas à prendre Lecher: protéger le transistor MOSFET à la sortie du générateur vis-à-vis de l'onde réfléchie ( il ne doit pas se retrouver en situation du point m ou M). Un circulateur avec charge "poubelle" le protège. Un filtre évite de rayonner ce qui est inutile, les harmoniques de 200 MHz.

**Jean-Marie Mathieu: Physique pour enfants de 7 à 97 ans.**



**Répartition des champ E et H ou tension et courant le long d'une ligne sans perte ni rayonnement !**



En tout point à la distance  $d$  du bout T sont définis une impédance  $Z(d)$  et un coefficient de réflexion  $\rho(d)$ .

$$Z(d) = Z_c \frac{1 + \rho(d)}{1 - \rho(d)} \quad \text{et réciproquement} \quad \rho(d) = \frac{Z(d) - Z_c}{Z(d) + Z_c}$$

Toujours en supposant ni pertes ni rayonnement  $\rho(d)$  garde un module constant et une phase (angle) décroissant lorsque l'on s'éloigne de T (d croissant).

$$\rho(d) = \rho_T \cdot e^{-j \cdot 4 \cdot \pi d / \lambda}$$

Le module est donc constant =  $|\rho_T|$  tout le long de la ligne et en général inférieur à un.

Jean-Marie Mathieu: Physique pour enfants de 7 à 97 ans.

**Caractéristiques de la ligne de Lecher:**

## Deux barres cylindriques paralleles.

$$C_{lin} = 12 \cdot \epsilon_r / \log_{10}(2D/d) \text{ pF/m} \quad L_{lin} = 0,92 \log_{10}(2D/d) \mu\text{H/m} \quad Z_c = 273 \sqrt{\epsilon_r} \cdot \log_{10}(2D/d) \Omega$$

$$\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Kg.m.A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\epsilon_0 = 1 / \mu_0 \cdot c^2 = 8,85 \text{ pF}$$

$$\epsilon_r = 1 \text{ pour l'air et le vide}$$

$$Z_0 = \mu_0 \cdot C = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120 \cdot \pi = 376,73 \Omega \text{ réel pour le vide, donc E et H en phase.}$$

Calculs numériques faits à 200MHz

Mesures à 200 MHz

d m m	D mm	Clin pF/ m	Llin μH/ m	Zc = (L/C) <sup>1/2</sup> Ω	1/ (L.C) <sup>1/2</sup> 10.E <sup>8</sup> m/s	λ m	λ m	V 10.E 8 m/s	C pF/ m
5, 5	20	14	0,8	237	~ 2,98	1,5	~ 1,40	~ 2,8	15,7
.	40	10,3	1,06	320	~ 3	.			11,4
.	60	9	1,23	370	~ 2,99	.			9,7
.	80	8,2	1,34	403	~ 3	.			9,3

## Quelques exemples de bifilaires non rayonnants.

**Ligne coaxiale**  $Z_c = 1/2 \cdot \pi \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot (\log_{10} D/d) = 138 \cdot V \cdot \log_{10}(D/d)$

**Cas du RG 58:** C ~ 100 pF/m  
~2 mS/m

L ~ 250 nH/m

R<sub>o</sub> ~ 4 Ω/m G<sub>o</sub>

Avec effet de peau R(f) ~ R<sub>o</sub> √f (10μm à 1 GHz) et pertes diélectriques G(f) ~ G<sub>o</sub>·f

**Cas du bifilaire torsadé** (connecteur Rj48) Z<sub>c</sub> = ~ 110 Ω

**Cas de la ligne téléphonique** (dites 600Ω)

C ~ 50 pF/m  
10 μS/m Z<sub>c</sub> ~ 100 Ω

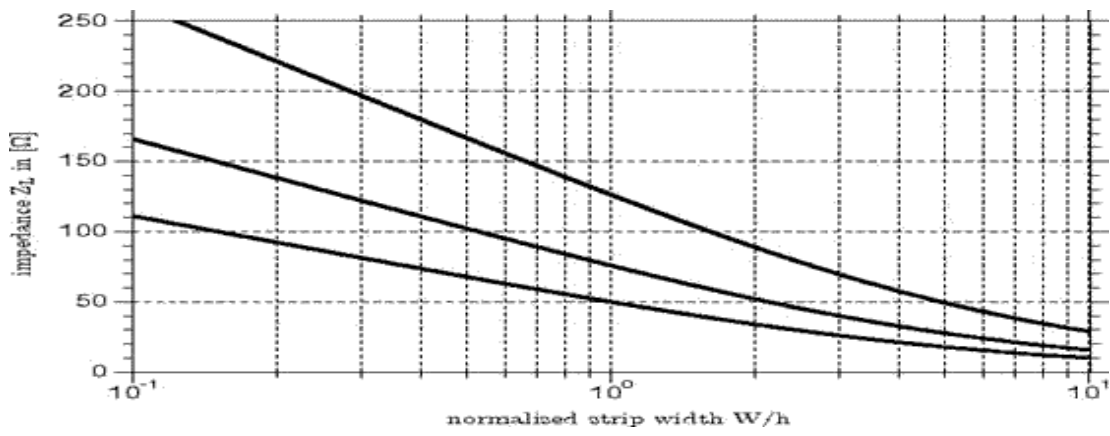
L ~ 500 nH/m

R<sub>o</sub> ~ 0,1 Ω/m

G<sub>o</sub> ~

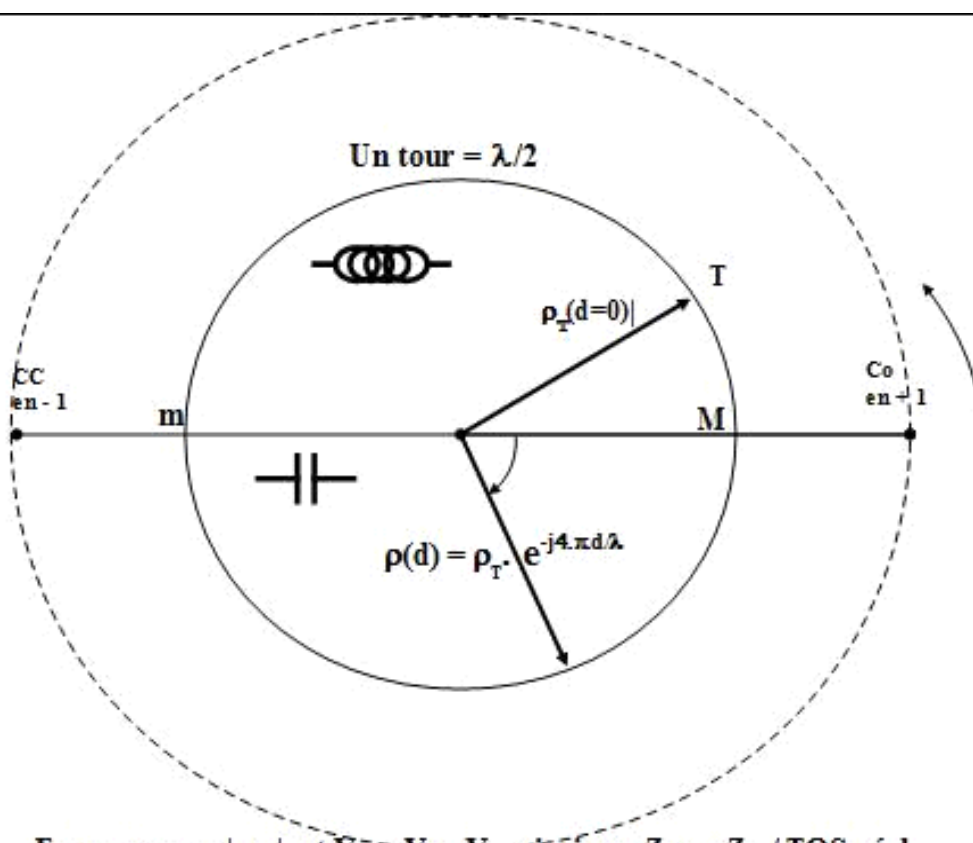
**Cas de la ligne imprimée double face:**

characteristic impedance 1.0 (air), 3.78 (quartz) 9.5 (alumina)



Vitesse V et impédance caractéristique  $Z_c$  dépendent de la géométrie des conducteurs.

**Jean-Marie Mathieu: Physique pour enfants de 7 à 97 ans.**



En m :  $\rho_m = -|\rho_T|$  et  $V_m = V_I - V_R$  ainsi que  $Z_m = Z_C / \text{TOS réel}$

En M :  $\rho_M = |\rho_T|$  et  $V_M = V_I + V_R$  ainsi que  $Z_M = Z_C / \text{TOS réel}$   
 $V_M / V_m = \text{TOS}$

Un puissant cas particulier : la ligne de longueur  $l/4$ .

$\rho_1 = -\rho_2$  et par conséquent  $Z_1 \cdot Z_2 = Z_C^2$  permet d'inverser une impédance.

L'impédance caractéristique  $Z_C$  est définie lorsqu'il n'y a pas d'onde réfléchie, c'est le rapport tension sur courant qui sont

alors en phase :  $Z_C = \frac{v_i(d,t)}{i_i(d,t)}$   $Z_C$  est donc réel.

Avec  $Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}}$  et  $V = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$$P_I = \frac{V_i^2}{2 \cdot Z_C}$$

$$P_R = \frac{V_R^2}{2 \cdot Z_C} = |\rho_T|^2 \cdot P_I$$

Pour les variables  $i(d,t)$  et  $v(d,t)$  le temps est sous entendu (.....) bonjour Claire



**Jean-Marie Mathieu: Physique pour enfants de 7 à 97 ans.**