

PROPAGATION DES ONDES ET TRANSMISSION DE L'INFORMATION

Introduction

* Objectif: retrouver 1 ami à Crêtelet pour déjeuner
Transmettre l'information du lieu exact et de l'heure du RDV
 $d = 21 \text{ km}$

Comparaison de $\neq$ systèmes de transmission de l'informa^{ti}
→ quelles ondes utilisées ?
→ quelles caractéristiques + grandeurs associées chiffrées

* La voix:

→ onde acoustique
→ vitesse de propaga^{ti}: $v = 342 \text{ m/s}$ à 17°C
 $\Rightarrow \Delta t = 61 \text{ s} \approx 1 \text{ minute}$
→ atténua^{ti}: onde sphériq

$f = 100 \text{ Hz}$ → constante linéique d'atténua^{ti}: $\alpha \sim 4 \text{ dB/km}$
 $\Rightarrow$ atténua^{ti} de 86 dB ,
soit $\frac{I_{\text{resu}}}{I_{\text{emis}}} \sim 10^{-9}$

1^{er} problème = atténua^{ti}

* Pigeon voyageur:

1^{ère} utilisat^{ion} = il y a 3000 ans, pour proclamer le vainqueur des JO antiq^{ues}
→ vitesse: $v \sim 100 \text{ km/h} = 28 \text{ m/s} \Rightarrow \Delta t = 750 \text{ s} \approx 12 \text{ min}$
→ débit binaire = mesure de qté de données transmises par unité de temps

Message de 10^3 caractères codés sur 5 bits ($2^5 = 32$)

$$\hookrightarrow n \sim 10^3 \times 5 = 5 \cdot 10^3 \text{ bits}$$

$$\Rightarrow \mathcal{D} = \frac{n}{\Delta t} \sim 5 \text{ bit/s}$$

Enjeux actuels: appel $\rightarrow \mathcal{D} \sim 64 \text{ kbit/s}$
vidéo $\rightarrow \mathcal{D} \sim 7 \text{ Mbit/s}$

* Deux systèmes utilisés pour la transmission d'info avec 1 approche historiq

↳ comment remédier aux problèmes de minimisa° de l'atténua° et de maximisa° du débit binaire ?

I] Transmission par lignes : le télégraphe électrique

1) Présentation du système

* 1838 : 1^{er} télégraphe électriq mis au point par Charles Wheatstone (pont de Wheatstone) entre Londres et Birmingham

* Onde électriq

Transmetteur et récepteur reliés par 1 circuit élec.

Bouton sur le manipulateur = interrupteur

↳ en appuyant sur le bouton, on ferme le circuit élec.

↳ impulsions élec.

Syst. récepteur : impulsion → marques d'encr. sur la bande de papier

pour la transmission

* Intérêt = ligne de transmission

1^{er} type de
ligne utilisé
historiq^t pr les
liaisons télégrap.

Ligne bifilaire : deux conducteurs maintenus à distance constante au moyen de supports isolants régulièrement espacés

Expl: $d \sim 20 \text{ cm}$; isolant = air

2) Équation de propagation

* Modèle électrocinétique de la ligne

• Hyp: ligne idéale → ptes électriqs identiqs sur tt la longueur

• 2 conducteurs séparés par 1 isolant → capacité

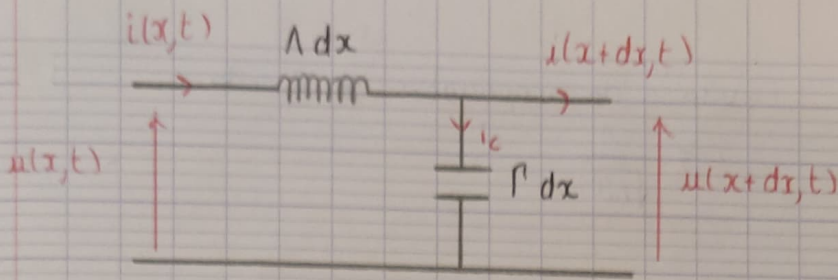
• Effets magnétiques liés au passage du courant ds les conducteurs → inductance

• Londres - Birmingham : $d \sim 7 \cdot 10^3 \text{ km}$

$\lambda \sim c/f \sim 20 \cdot 10^3 \text{ km}$ ($f = 15 \text{ kHz}$ ligne téléph. sub)

!! À HF, $l \ll \lambda$ n'est vérifié

↳ modélisé sur 1 tronçon infinitésimal de



Loi des nœuds : $i(x,t) = i(x+dx,t) + i_c$

Condensateur : $i_c = C dx \frac{\partial u}{\partial t}(x+dx,t)$

Développement de Taylor à l'ordre 1 en dx :

$$i(x+dx,t) \simeq i(x,t) + \frac{\partial i}{\partial x}(x,t) dx$$

$$\Rightarrow \underline{\frac{\partial i}{\partial x} + \Gamma \frac{\partial u}{\partial t} = 0} \quad (1)$$

Loi des mailles : $u(x,t) = u(x+dx,t) + \Lambda dx \frac{\partial i}{\partial t}(x,t)$

$$\text{Taylor} \Rightarrow \underline{\frac{\partial u}{\partial x} + \Lambda \frac{\partial i}{\partial t} = 0} \quad (2)$$

* Deux équations couplées : échange d'énergie magnétique et électrique $\rightarrow$ propagation de l'onde

$$\frac{\partial(1)}{\partial t} : \frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x} + \Gamma \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial(2)}{\partial x} : \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \Lambda \frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x} = 0 \quad (\text{théorème de Schwartz})$$

$\Rightarrow$

$$\boxed{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \underbrace{(\Lambda \Gamma)}_{1/c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0}$$

Équation des télégraphistes pour la ligne sans pertes

Rq : • équation de D'Alembert $\rightarrow$ onde plane progressive harmon.

- vitesse de propagation de l'onde :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\Lambda \Gamma}}$$

AN Ligne téléphonique souterraine

$$\Gamma = 43 \text{ pF/m} ; \Lambda = 2,6 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} \approx \text{vitesse de la lum. ds le vide}$$

↳ on ne peut pas faire ça rapide

Chatelet : $\Delta t \sim 7 \cdot 10^{-5} \text{ s}$: quasi-instantané

* Débit binaire du télégraphe :

Code Morse $\rightarrow \sim 30 \text{ mots/min}$

Or $\sim 5 \text{ lettres par mots}$ } $\varnothing \sim 10 \text{ bit/s}$
 Codage sur 5 bits

* Amélioration du système : câble coaxial

$\rightarrow$ m ppe

$\rightarrow$ débit : $\varnothing \sim 10^2 \text{ Mbit/s}$

Pb : $\varnothing$ au delà de 10 km à cause de la dégradation du syst

Transition : modèle avec pertes ; défauts ligne bifilaire

3) Modèle avec pertes : atténuation et

* Prise en compte des pertes :

$\rightarrow$ dans les conducteurs : $R dx$

$\rightarrow$ dans le diélectrique : $G dx$

* Modèle électrocinétique

Nouvelle équation de propagation :

* On retrouve la même vitesse de propagation c .

* On injecte $\underline{u}(x,t) = U_0 e^{j(\omega t - kx)}$

Relat de dispersion: $k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - j\omega(R' + G') - RG$

↳ $k \in \mathbb{C}$: il y a amortissement

↳ $v_g(\omega)$: il y a dispersion

* On peut s'affranchir de la dispersion: très important pour
Conditions d'Heaviside: $R' = G'$ transmettre 1 signal

$$\hookrightarrow \underline{k} = \pm \left(\frac{\omega}{c} - j\alpha\right) \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{R}{2c\Lambda}$$

multi-fréquences

* Éléments dissipatifs $\Rightarrow$ tjs amortissement
 $\underline{u}(x,t) = U_0 e^{j(\omega t \mp \frac{\omega x}{c})} e^{-\alpha x}$

Atténuation en décibels: $A_{dB} = 20 \log \frac{|U(L)|}{|U(0)|} = -20 \alpha l_0 \log_{10} e$

$$\Rightarrow \text{coefficient linéiq d'atténua} : \alpha_{dB} = \frac{A_{dB}}{l_0} = -8,69 \alpha$$

AN Ligne téléphonique souterraine

$$\alpha_{dB} = -3,2 \text{ dB/km}$$

Châtelet: atténua de -67 dB

→ pupinisa: intercaler des bobines tous les 2 kms

↳ $\uparrow \Lambda$: $\downarrow$ atténua

Transition: transmission par ondes rayonnées

II] Transmission par ondes rayonnées : l'antenne

1) Rayonnement à grande distance émis par 1 antenne

- * Onde électromagnétique qui se propage ds l'atmosphère
→ vitesse de propagat° = vitesse de la lumière
- * Antenne = conducteur métallique parcouru par 1 courant électriq variable
→ ~ assemblée de dipôles oscillants

* Rappel: champ rayonné par 1 dipôle

- Schéma
- $\vec{E}, \vec{B}$

* Antenne émettrice demi-onde:

Conducteur rectiligne de longueur L comparable à λ émis

• Obj: relier $\ddot{p}$ à $i(t)$

Soit 1 élément de conducteur de scd S et de longueur l suffisamment petit pr que le vecteur densité vol. de courant soit constant à 1 date donnée

$$\vec{p}_e(t) = \sum_i q_i \vec{OP}_i$$

↑ charge présente ds l'antenne à t

$$\vec{j}(t) = \sum_i \frac{1}{se} q_i \vec{v}_i$$

$$\Rightarrow \frac{d\vec{p}_e}{dt} = \vec{j}(t) se = l i(t) \vec{e}_z$$

$$\Rightarrow \boxed{\ddot{p} = l \frac{di}{dt}}$$

* ARQS locale: $l \ll cT$

$$\begin{cases} \vec{E}(M,t) = l \frac{d^2 i}{dt^2} \frac{\sin\theta}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \vec{e}_\theta \\ \vec{B}(M,t) = l \frac{d^2 i}{dt^2} \frac{\sin\theta}{4\pi c r} \vec{e}_\varphi \end{cases}$$

2) Puissance rayonnée et amortissement

* Poynting: $\vec{R} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}$

$$\vec{R} = l^2 \left(\frac{di_l}{dt} \right)^2 \frac{\sin^2 \theta}{16\pi^2 \epsilon_0 c^3 r^2} \vec{e}_r \quad \rightarrow \quad \langle \vec{R} \rangle = \frac{1}{12\pi} l^2 i_0^2 \cos^2(\omega t) \frac{1}{\epsilon_0 c^3 r^2}$$

$$\langle P \rangle = \vec{R} \cdot d\vec{S} = l^2 \left(\frac{di_l}{dt} \right)^2 \frac{\sin^2 \theta}{4\pi \epsilon_0 c^3} - P_E =$$

$$i(t) = I_0 \cos(\omega t) : \quad P = R_{\text{ray}}(\omega) I_0^2 \quad R_{\text{ray}}(\omega) = l^2 \omega^2$$

* $P_R = \langle \vec{T} \rangle \cdot \vec{S}_R$

$$\alpha_{\text{dB}} = 10 \log \left(\frac{P_E}{P_R} \right)$$

Conclusion