

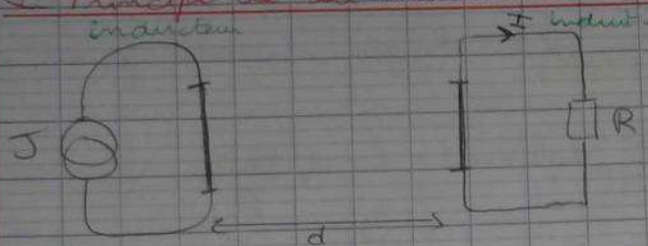
Cours de t.

C4 1

21.02.12

Chapitre IV : Propagation en espace libre - Antenne

I Principe de la transmission hertzienne



I dérivé de la conductance
rectiligne I génération

Si I est variable, $\forall d$, un courant i proportionnel à I circulera.

Descript + précise : Transmission électromagnétique

On a donc une force électrique : donc un champ électrique $\vec{E}$.

Avec $|\vec{E}|$ exprimée en Volt/m.

Induct^e électrique : $\vec{D}$ $|\vec{D}|$ en Coulomb/m.

$$\hookrightarrow |\vec{D}| = \epsilon_0 |\vec{E}|$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \text{ F/m permittivité du vide}$$

Force magnétique

• chp magnétique $\vec{H}$ $|\vec{H}|$ en ampère/m

• Induct^e — $\vec{B}$ $|\vec{B}|$ en Tesla/m.

$$\hookrightarrow |\vec{B}| = \mu_0 |\vec{H}|$$

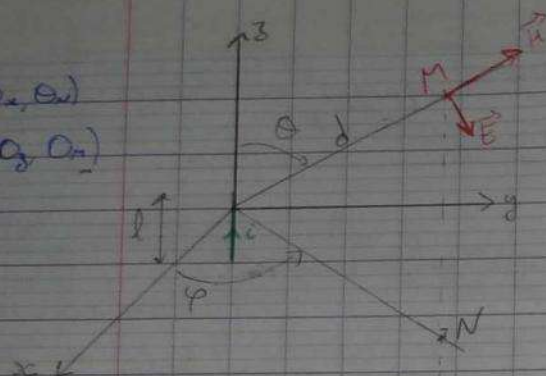
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$\vec{E}$ et $\vec{H}$ forment la propagation électromagnétique. Se déplace à la vitesse c . Ils sont $\perp$.

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \text{ impédance du vide}$$

Ad le chp électromagnétique rencontre l'antenne, il y a déplacement des charges.

vl $\text{Pangle}(Ox, Oz)$
 II $\text{Angle}(Oz, Oz')$



i : courant de l'antenne
 d : distance de l'antenne (d est grand, plus fois la long. d'onde)

Régime sinusoïdal, pulsatⁿ ω

Eq de Maxwell définissent E, H, D, B

$$\vec{E} \begin{cases} E_r = 0 \\ E_\theta = \frac{j\pi i l \sin\theta}{\lambda^2 \epsilon_0 \omega} \cdot \frac{1}{d} e^{-j\frac{\omega d}{\lambda}} \\ E_\phi = 0 \end{cases}$$

$$\vec{H} \begin{cases} H_r = 0 \\ H_\theta = 0 \\ H_\phi = \frac{il \sin\theta}{2\lambda} \cdot \frac{1}{d} e^{-j\frac{\omega d}{\lambda}} \end{cases}$$

$$|\vec{E}| = |E_\theta| = \frac{60\pi i l}{\lambda d} |\sin\theta|$$

$$\left(\text{avec } \omega = 2\pi f \quad f = \frac{c}{\lambda} \right)$$

$$E_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9}$$

$$|\vec{H}| = |H_\phi| = \frac{il}{2\lambda d} |\sin\theta|$$

II Caractérisatⁿ des antennes

Antenne peut être liée à une source d'émission ou un récepteur

Antenne d'émission - antenne de réceptⁿ au niveau technologi^a

≠ ondes → ondes kilométr^a, décamétr^a, métr^a, décimétr^a, centimétr^a, millimétr^a
 on étudie

≠ technologie suivant le type d'onde.

2 types d'antennes d'après:

Le doublet de Hertz: tige métall^a, utilisée par la réceptⁿ en onde hectométr^a ou kilométr^a, de long l très petite devant λ .
 L'antenne $\lambda/2$.

1) La puissance rayonnée

C'est la puissance que l'on peut récupérer au total à la réception.
On va intégrer la densité surfacique de puissance sur une sphère qui entoure l'antenne. Si cette densité dépend de la direction de propagation, l'antenne est dite directive. Sinon isotrope (théorique).

Vecteur de Poynting: $\vec{P} = \frac{1}{2} (\vec{E} \wedge \vec{H})$ $\vec{P} \perp \vec{E}, \vec{P} \perp \vec{H}$

$$\Rightarrow \vec{P} = \frac{1}{2} |\vec{E}| \cdot |\vec{H}| \text{ W/m}^2$$

$$P = \frac{1}{2} \frac{60\pi \cdot I^2}{\lambda d} \sin \theta \cdot \frac{1}{2\lambda d} \sin \theta$$

$$P = 15\pi \frac{I^2 \sin^2 \theta}{\lambda^2 d^2}$$

Puissance totale rayonnée: $P = \iint_S P \, dS$

2) Diagramme de rayonnement, diag de directivité

a) Diag de rayonnement

Il représente les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide de la direction de l'espace.

Une direction de l'espace où la puissance rayonnée est maximale: $P_0(\theta_0, \varphi_0)$

$$n(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0, \varphi_0)}$$

b) Diag de directivité

Dans le plan vertical: $\theta = \text{cte}$

horizontal: $\varphi = \text{cte}$

On place l'antenne de réception sur l'axe du lobe principal.

En telecom le niveau du lobe second doit être inférieur à -20 dB.

1: Impédances et adaptation

3) Gain

Gain = $\frac{\text{densité de puissance dans la direct° maximale}}{\text{de l'antenne isotrope} \rightarrow \text{omnidirectionnelle}}$

$$\text{gain} = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{isot}}}$$

Pour le doublet de Hertz : $P_{\text{max}} = 15 \pi \left(\frac{I_0 l}{\lambda \pi} \right)^2$

gain doublet = 1,5 $\Rightarrow$ 1,76 dB (pu la puissance $10 \log(\text{gain})$)

gain d'une antenne $\frac{\lambda}{2} = 1,64 \Rightarrow$ 2,15 dB

4) Résistance de rayonnement

(antenne d'émission)

Une antenne se comporte à une charge vis-à-vis de la source donc on peut lui associer une résistance de rayonnement.

L'antenne de récepteur ——— source qui aurait une résistance interne appelée résistance de rayonnement.

5) Résistance ohmique

Représente la résistance des conducteurs de l'antenne.

L'antenne est réalisée par des conducteurs électri^{cs} traversés par des courants qui entraînent une perte par effet joule donc une perte d'én^{rg} calorifique.

6) Impédance d'antenne

Antenne = lg de transmission. À partir de ce moment la problématique d'adaptat^{on} se pose.

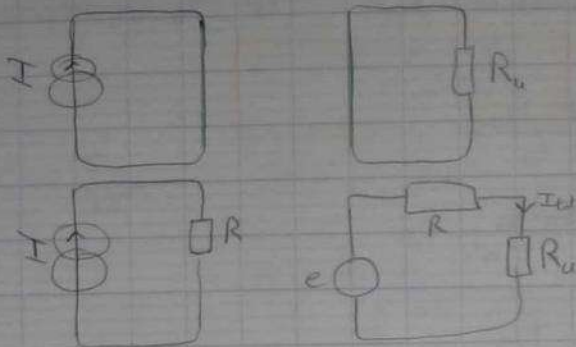
Il y a adaptat^{on} qd $R_L = R_c$. Pour réaliser l'adaptation, on doit connaître l'impédance caractéristi^{que} de l'antenne: Z_a , et si Z_c impédance caractéristi^{que} du câble, il faut : $Z_a = Z_c$

Canaux de transmission
C4 2

27.03.12

7) Surface équivalente

→ on calcule le doublet de Hertz



Aspect puissance :

$$P = \frac{1}{2} |\vec{E}| \cdot |\vec{H}|$$

$$= \frac{1}{2} \frac{|\vec{E}|^2}{120\pi}$$

émission

S surface équivalente

$$P_r = \frac{1}{2} \frac{|\vec{E}|^2}{120\pi} S$$

réception

Aspect champs :

$$|\vec{E}|$$

$$e = |\vec{E}| \cdot L$$

La puis max est obtenue quand $R = R_u$.

$$P_{\text{puiss max}} = \frac{1}{2} R_u I_{\text{ext}}^2 = \frac{1}{2} R_u \left(\frac{|\vec{E}|}{2R_u} \right)^2 = \frac{|\vec{E}|^2}{8R_u}$$

$$P_r = \frac{|\vec{E}|^2}{8R_u} L^2 = \frac{1}{2} \frac{|\vec{E}|^2 S}{120\pi}$$

Pour le doublet de Hertz : $R = 80 \cdot \left(\frac{\pi L}{\lambda} \right)^2$, gain = $\frac{3}{2}$

$$\frac{L^2}{8R_u} = \frac{1}{2} \frac{S}{120\pi} \Leftrightarrow \frac{L^2}{8 \cdot 80 \left(\frac{\pi L}{\lambda} \right)^2} = \frac{1}{2} \frac{S}{120\pi} \Rightarrow S = \frac{3\lambda^2}{8\pi}$$

$$\boxed{\frac{G}{S} = \frac{4\pi}{\lambda^2}}$$

pour le doublet de Hertz.

Généralisation

Une liaison entre 2 pts A et B : $\begin{cases} 1^{\text{er}} \text{ cas} & \left\{ \begin{array}{l} A \text{ émet} \\ B \text{ reçoit} \end{array} \right. \\ 2^{\text{em}} \text{ cas} & \left\{ \begin{array}{l} B \text{ émet} \\ A \text{ reçoit} \end{array} \right. \end{cases}$

A → B

B → A

I₁ en

I₂ en

A émet B reçoit
B — A —

A → B B → A
I₁ e₁ I₂ e₂

$$\frac{e_1}{I_1} = \frac{e_2}{I_2} \quad \text{principe de réciprocité}$$

Antenne A: S_A G_A R_A B: S_B G_B R_B

1^{er} cas: P_{e1} et P_{r1}

$$P_{e1} = \frac{1}{2} R_A I_1^2$$

$$P_{r1} = \frac{E^2}{8 R_B} = \frac{G_A P_{e1}}{4 \pi d^2} S_B$$

2^e cas: P_{e2} et P_{r2}

$$P_{e2} = \frac{1}{2} R_B I_2^2$$

$$P_{r2} = \frac{E^2}{8 R_A} = \frac{G_B P_{e2}}{4 \pi d^2} S_A$$

$$\left(\frac{e_1}{I_1}\right)^2 = \frac{G_A R_A R_B S_B}{\pi d^2}$$

$$\left(\frac{e_2}{I_2}\right)^2 = \frac{G_B R_B R_A S_A}{\pi d^2}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{e_1}{I_1}\right)^2 = \left(\frac{e_2}{I_2}\right)^2 \quad (\Rightarrow) \quad G_A S_B = G_B S_A$$

$$\Leftrightarrow \frac{G_A}{S_A} = \frac{G_B}{S_B}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{G}{S} = \frac{4\pi}{\lambda^2}}$$

$$G = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \quad \text{ou} \quad S = \frac{\lambda^2 G}{4\pi}$$

III Propagation en espace libre

P_e, on veut obtenir P_r puis reçue.

On sup. que les maximas des diag. de réactivité st alignés.

Pour une antenne isotrope: G_e = 1

$$P_{iso} = \frac{P_e}{4\pi d^2}$$

$$P_{max} = P_{iso} \cdot G_e = \frac{P_e G_e}{4\pi d^2}$$

P_e G_e = PIRE → Puiss Isotrope Rayonnée Equivalente

La puissance reçue : $P_r = p_r \cdot S_r$

On se place à une densité de puissance suffisamment grande pour que la densité de puissance soit uniforme vis-à-vis de la surface.

$$P_r = \frac{P_e \cdot G_e \cdot S_r}{4 \pi d^2}$$

$$S = \frac{\lambda^2 G}{4 \pi}$$

$$S_r = \frac{\lambda^2 G_r}{4 \pi} = \frac{c^2 G_r}{f^2 \cdot 4 \pi}$$

$$G = \frac{4 \pi S}{\lambda^2}$$

$$P_r = \frac{P_e G_e c^2 G_r}{f^2 16 \pi^2 d^2}$$

avec les gains

$$P_r = \frac{P_e S_e S_r f^2}{d^2 c^2}$$

avec les surfaces

NB Pour les gains f doit être petit pour que P_r soit max, et inversement pour les surfaces P_r des fréq ^{faibles} $< 1 \text{ GHz}$ on utilise plutôt des antennes fil, les surfaces de captatⁿ ne rendent pas en lg de compte m si elles sont définies. Pour $> 1 \text{ GHz}$ antennes parabol^{es} nécessaires, surface de captatⁿ grande.

$$P_r = P_e G_e G_r \frac{c^2}{f^2 16 \pi^2 d^2} = P_e G_e G_r \frac{\lambda^2}{16 \pi^2 d^2}$$

L'équation des Telecommunications :

Watt

$$P_r = \frac{P_e G_e G_r}{A_o}$$

$$A_o = \frac{4 \pi d^2}{\lambda^2} \text{ affaiblissement en espace libre}$$

$$P_{r\text{dB}} = P_{e\text{dB}} + G_{e\text{dB}} + G_{r\text{dB}} - A_{o\text{dB}}$$

$$A_{o\text{dB}} = 32,5 + 20 \log d(\text{km}) + 20 \log f(\text{MHz})$$

On utilise des dB $\neq$ importante entre les grandeurs, la puissance émise très forte alors que reçue faible

Exemple = Une sonde spatiale se trouve à 6 milliards de km
 la puissance émetteur = 20W, le gain de l'antenne parabolique = 48 dB,
 la fréquence utilisée = 2,4 GHz

1) Calcul de la densité de puissance rayonnée au niveau de la Terre

$$P_r = \frac{P_e G_e}{4\pi d^2}$$

$$\left. \begin{aligned} G_e &= 10^{(48/10)} = 63096 \\ R &= 6 \cdot 10^{11} \text{ m} \end{aligned} \right\} \Rightarrow P_r = 2,8 \cdot 10^{-24} \text{ W/m}^2$$

2) Calcul de la puissance transmise au récepteur sachant que le gain de l'antenne de réflexion = 70 dB et antenne parabolique

$$P_r = P_e \cdot S_r = P_e \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = 3,57 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$P_r = 2,84 \cdot 10^{-18} \text{ W}$$

$$G_r = 10^{(70/10)}$$

$$S_r = 1015 \text{ m}^2$$

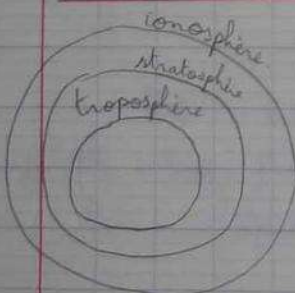
3) Calcul de $A_0 \rightarrow \frac{1}{A_0}$

$$A_0 = \frac{4\pi d^2}{\lambda^2} \rightarrow \alpha_{dB} = 20 \log\left(\frac{1}{4\pi d^2}\right) = -306,5 \text{ dB}$$

$$\text{L'affaiblissement de la liaison : } \alpha_L = \frac{P_r}{P_e} = \frac{G_e G_r}{A_0}$$

$$\alpha_{dB} = G_{e,dB} + G_{r,dB} + \alpha_{p,dB} = 48 + 70 - 306,5 \text{ dB}$$

IV. Validité de l'espace libre



Zones de Fresnel :

→ on va se limiter à la 1^{ère}, il suffit de dégager la zone de Fresnel de ts obstacles pour pouvoir faire l'approximation de l'espace libre.

$$d_1 + d_2 = ER = d$$

$E \xrightarrow{d_1} M \xrightarrow{d_2} P$ M E à la 1^{ère} zone de Fresnel si :

$$EM + MR = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d}}$$

rayon maximal de la 1^{ère} zone de Fresnel : $d_1 = d_2 = \frac{d}{2}$

$$r_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda d}$$