

Identité de Poynting et en puissance
et non pas en énergie !!

D' Kchaou borhen

modèle
de Drude

conducteur ohmique

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E}$$

régime lentement variable :

$$\text{Câble} \quad \frac{\omega \ll \Gamma}{r \ll \lambda} \quad \text{avec } \omega = \frac{PM}{\epsilon} = r$$

Section MP2-PT2-PC2

non magnétique :

$$\mu_r = 1$$

$$\text{et } \mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0$$

ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE

SERIE N°1

Exercice 1 : Etude énergétique d'un cylindre conducteur

On considère un conducteur ohmique non magnétique, de conductivité σ , occupant le volume d'un cylindre de rayon a et de longueur infinie. Ce conducteur est parcouru par un courant stationnaire, uniformément réparti d'intensité I .

- 1- Etablir les expressions des champs électrique et magnétique en tout point intérieur au conducteur.
- 2- Etablir l'expression de l'énergie électromagnétique délocalisée dans un tronçon de longueur L du conducteur.
- 3- Etablir l'expression de l'énergie cedée, par le champ électromagnétique, à la matière de ce tronçon, entre les instants t et $t + dt$.
- 4- Etablir l'expression de l'énergie électromagnétique rayonnée, à travers la surface latérale du tronçon de longueur L , entre les instants t et $t + dt$.
- 5- Commenter les résultats obtenus.

$$P_{Joule} = \iiint (\vec{J}_c \cdot \vec{E}) d\tau$$

$$\oint \vec{\pi} \cdot d\vec{S}$$

fautes à éviter :

$$\sqrt{\vec{r}(\theta)} = \mu \vec{J}_c \quad \text{et non } \mu \vec{I} \times$$

$$\sqrt{\vec{J}_c} = \sigma \vec{E} \quad \text{et non } \vec{I} = \sigma \vec{E} \times$$

Exercice 2 : condensateur et solénoïde en régime lentement variable

Condensateur plan

Les armatures d'un condensateur plan sont deux disques métalliques de rayons a et d'axe Oz de cotés respectives $-h$ et $+h$. Négligeant les effets de bords et supposant un régime lentement variables. On admet que le champ électrique est dans tout le volume du condensateur, uniforme et non permanent $\vec{E} = E(t) \vec{u}_z$ et l'on étudie le système pendant la décharge du condensateur à travers un circuit extérieur au cours de laquelle $E(t)$ évolue selon la loi $E(t) = E_0 e^{-t/\tau}$.

$$\sigma = 0$$

car le condensateur assure la conduction par

- 1- On cherche un champ magnétique correspondant sous la forme $\vec{B} = B(r, t) \vec{u}_\theta$. Donner l'expression de $B(r, t)$ en fonction de E , r et τ .
- 2- En un point du volume du condensateur, exprimer en fonction de r et de $\lambda = \tau$ le rapport des contributions électrique et magnétique à la densité d'énergie électromagnétique $u_{em} : \mu = u_m/u_e$.
- 3- Montrer que pour un régime lentement variable il est légitime de considérer un condensateur comme un système purement électrique.
- 4- Donner l'expression en fonction de r , E et τ du vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$ en un point intérieur au condensateur et commenter la direction de celui-ci.
- 5- Donner l'expression de la puissance rayonnée Φ du vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$ à travers le cylindre de rayon a et de hauteur $2h$ qui délimite le condensateur en fonction de E , τ et volume V de ce cylindre.

Solénoïde.

On s'intéresse à une section de longueur l d'un long solénoïde circulaire d'axe Oz et de rayon a dans lequel on suppose qu'est établi le champ magnétique $\vec{B} = B(t) \vec{u}_z$ avec $B(t) = B_0 e^{-t/\tau}$.

- 1- On cherche un champ électrique correspondant sous la forme $\vec{E}(r, t) = E_\theta(r, t) \vec{u}_\theta$. Donner l'expression de $B(r, t)$ en fonction de E , r et τ .
- 2- En un point du volume du solénoïde, exprimer en fonction de r et de $\lambda = \tau$ le rapport des contributions électrique et magnétique à la densité d'énergie électromagnétique $u_{em} : \mu = u_m/u_e$.
- 3- Montrer que pour un régime lentement variable il est légitime de considérer le solénoïde comme un système purement magnétique.
- 4- Donner l'expression en fonction de r , E et τ du vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$ en un point intérieur au solénoïde
- 5- Donner l'expression de la puissance rayonnée Φ du vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$ à travers le cylindre de rayon a et de longueur l qui délimite le solénoïde en fonction de E , τ et volume V de ce cylindre.

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} ;$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{M.F}$$

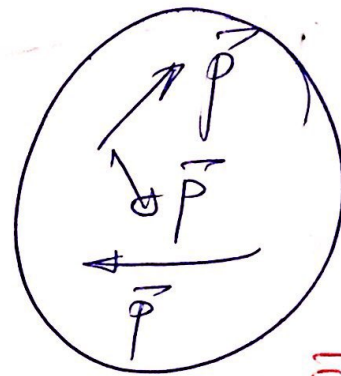
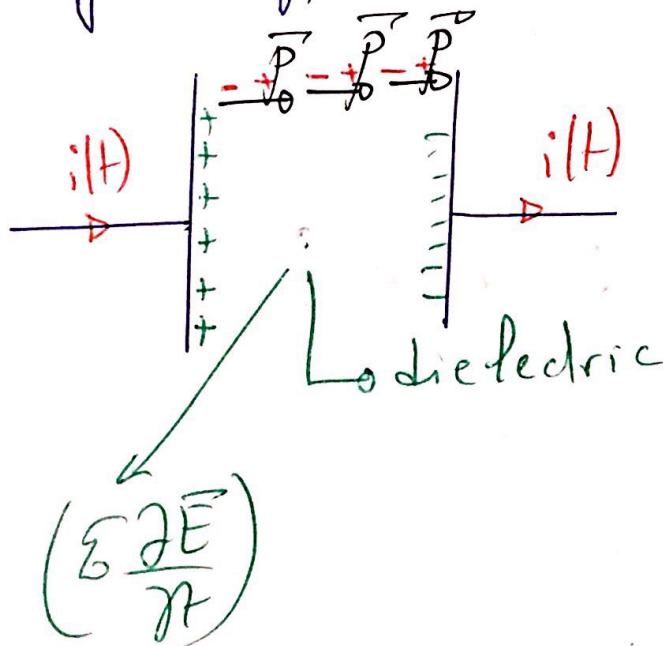
$$\text{div } \vec{B} = 0$$

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \left[\vec{J}_c + \left(\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \right] \quad \text{M.A}$$

η - Flux

⊙ $\vec{J}_c$ = courant les e^- de valences

$\vec{J}_D = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$: courant de déplacement des dip^{les}



$$\vec{P} = \vec{p} \wedge \vec{E}_{ext}$$

(-) (+) $\vec{p}$

Vide: $\rho = 0, \vec{J}_c = \vec{0}$

$$\text{div } \vec{E} = 0, \quad \text{rot } \vec{B} = \mu_0 \left(\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

dielectric.
neutre (ϵ_r) $\rho = 0$; $\vec{J}_c = \vec{0}$

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \left(\epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (1)$$

métal: Cuivre

$$\|\vec{J}_D\| \ll \|\vec{J}_c\|$$

$$\vec{\text{rot}} \vec{B} = \mu_0 (\gamma \vec{E})$$

$$* \vec{\text{rot}} \vec{B} = \mu \left[(\gamma \vec{E}) + \left(\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \right]$$

Plasma

$$\text{div} \vec{J}_c + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{équation locale de conservation de charge.}$$

$$* \text{div}(\vec{\text{rot}} \vec{B}) = 0 ; \quad \text{div}(\vec{J}_c) + \epsilon \frac{\partial \text{div} \vec{E}}{\partial t} = 0$$

$$\text{or } \text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \Rightarrow \epsilon \text{div} \vec{E} = \rho$$

$$\text{div} \vec{J}_c + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

$$* \vec{J}_c = \gamma \vec{E} : \text{conducteur}$$

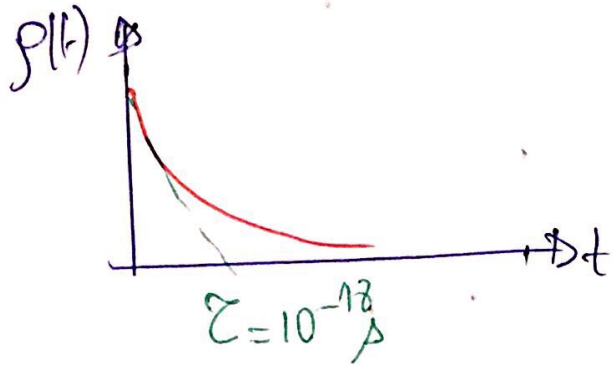
$$\gamma \text{div} \vec{E} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{\gamma}{\epsilon} \rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

$$\text{on pose } \tau = \frac{\epsilon}{\gamma} = 10^{-18} \text{ s}$$

(2)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{e}{\tau} = 0 \quad ; \quad \int \frac{d\rho}{\rho} = - \int \frac{dt}{\tau} \Rightarrow \ln \rho = -\frac{t}{\tau} + \text{cte}$$

$$\rho(t) = \rho_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

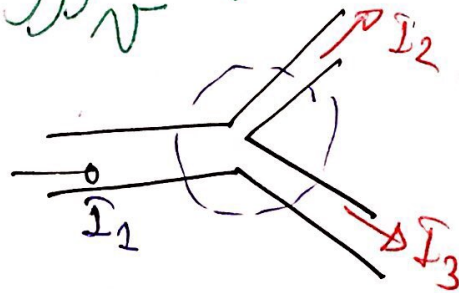


$$\begin{aligned} &1 \text{ ns}, \quad 1 \text{ ps} \\ &10^{-12} \text{ s} \\ &\Rightarrow \rho(t \gg \tau) \approx 0 \end{aligned}$$

le milieu est localement neutre

$$\Rightarrow \text{div } \vec{j} = 0 \Rightarrow \iiint_V \text{div } \vec{j} \cdot d\tau = 0 = \oiint \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

$$\oiint \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0$$



équation locale de conservat° de charge
surfacique ; linéique

$$\frac{\partial j_s}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad \checkmark$$

$$\frac{\partial j(r,t)}{\partial r} + \frac{\partial \lambda(r,t)}{\partial t} = 0 \quad \checkmark$$

(3)

Pression énergétique

$$\frac{dL_{em}}{dt} = - \oint \vec{\pi} \cdot d\vec{S} - \iiint (\vec{j} \cdot \vec{E}) d\tau$$

$$* L_{em} = \iiint \left(\frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) d\tau = \iiint U_{em}(\vec{r}, t) d\tau$$

$\downarrow$
 $\vec{j} \cdot m^{-3}$

BORHEN = $\iiint_{\text{borhen}} d\tau$

$/m^3$

$$* P_{emle} = \iiint (\vec{j} \cdot \vec{E}) d\tau$$

$$P_{raymée} = \oint \vec{\pi} \cdot d\vec{S}$$

$$\langle P_{raymée} \rangle = \int \langle \|\vec{\pi}\| \rangle dS = \sigma T^4 S$$

$\leftarrow$ Stefan

$$\lambda_m T = 2898 \mu m \cdot K$$

(4)

$$\vec{\pi} = \vec{R} = \vec{S} = \vec{N} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}$$

$$* \frac{\vec{B}}{\mu_0} \operatorname{rot} \vec{E} \stackrel{(1)}{=} - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \frac{1}{\mu_0} = - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right)$$

$$\vec{E} \operatorname{rot} \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} \right) = \vec{j}_c \vec{E} + \left(\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \vec{E}$$

$$\stackrel{(2)}{=} \vec{j} \cdot \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon_0 E^2}{2} \right)$$

$$(2) - (1) \Rightarrow \vec{j} \cdot \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{\epsilon_0 E^2}{2} \right) + \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right) \right]$$

$$\left(\vec{E} \operatorname{rot} \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \frac{\vec{B}}{\mu_0} \operatorname{rot} \vec{E} \right) = - \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right)$$

سواء كان في

$$\vec{j} \cdot \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right) \Rightarrow .$$

(5)

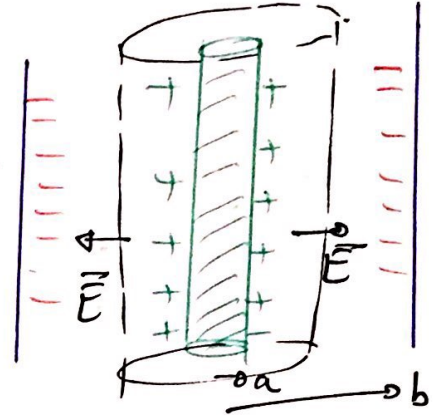
Condensateur plan: $C = \frac{\epsilon_0 S}{e}$

$$-\text{grad} V = \vec{E}_{\text{plan}} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \vec{U}_z = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{U}_z + \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{U}_z = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \vec{U}_z$$

$\vec{E}(r) = ??$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$

$$E(r) 2\pi r h = \frac{Q}{\epsilon_0}$$



$$E(r) = \frac{Q}{2\pi \epsilon_0 h} \frac{1}{r} = -\frac{dV}{dr}$$

$$\int_a^b dV(r) = -\frac{Q}{2\pi \epsilon_0 h} \int_a^b \frac{dr}{r}$$

$$V_a - V_b = + \frac{Q}{\left(\frac{2\pi \epsilon_0 h}{\ln(b/a)} \right)} = \frac{Q}{C}$$

$$C = \frac{2\pi \epsilon_0 h}{\ln(b/a)}$$

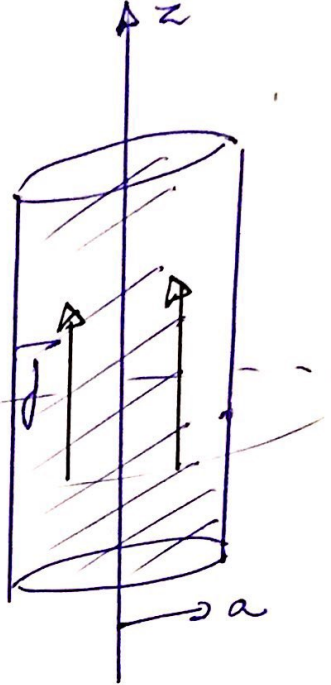
$$\text{on } \Delta V = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right) = 0$$

(6)

Serie N°1

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

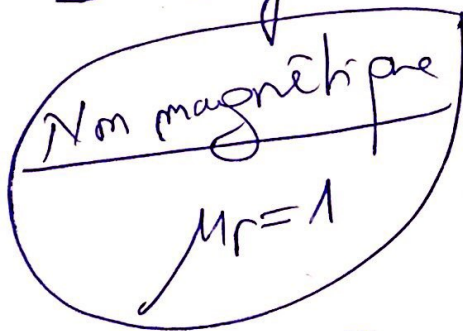
stationnaire : $\frac{d(\dots)}{dt} = 0$



uniformément répartie

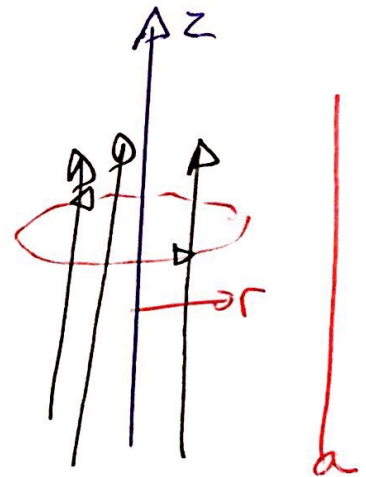
$$I = \iint \vec{J} \cdot d\vec{S} = j S$$

$$I = j \pi a^2 ;$$



$$\mu_0 \mu_r = \mu$$

$$1) \vec{E} = \frac{\vec{J}}{\sigma} = \frac{I}{\pi a^2 \sigma} \vec{u}_z$$



$$\oint_{\vec{u}_\theta} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \iint \mu_0 \vec{J}_{\text{enc}} \cdot d\vec{S}$$

$$2\pi r B_\theta(r) = \mu_0 (j \pi r^2)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 j r}{2} \vec{u}_\theta = \frac{\mu_0 I r}{2\pi a^2} \vec{u}_\theta$$

$$\vec{B}(r \geq a) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{u}_\theta$$

$$* \text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j}_{\text{cond}}$$

$$2) U_{\text{em}} = \iiint \left(\frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) d\tau$$

$$= \iiint \left(\frac{\epsilon_0}{2} \left(\frac{I}{\pi a^2} \right)^2 + \frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{\mu_0 I r}{2\pi a^2} \right)^2 \right) r dr d\theta dz$$

= ne dépend pas du temps

$$\Rightarrow \frac{dU_{\text{em}}}{dt} = 0$$

$$3) P_{\text{mle}} = \iiint (\vec{j}_c \cdot \vec{E}) d\tau$$

$$= \sigma \left(\frac{I}{\pi a^2} \right)^2 (\pi a^2) L$$

$$= \frac{1}{\sigma} \frac{L}{(\pi a^2)}$$

$$I^2 = R \cdot I^2$$

$$4) \vec{\pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} = \frac{E B}{\mu_0} (-\vec{u}_r)$$

$$\vec{\pi} = \left(\frac{I}{\pi a^2 \sigma} \right) \left(\frac{I r}{2\pi a^2} \right) (-\vec{u}_r)$$

$$P_{raym\acute{e}e} = - \iint \frac{I^2 a}{(\pi a^2)^2 2\sigma} \text{ add } dz \quad \begin{matrix} 2\pi \\ \swarrow \\ L \end{matrix}$$

$$= - \frac{I^2 L}{\sigma (\pi a^2)} = -R I^2$$

$$5) + P_{ Joule } + P_{ raym\acute{e}e } = \frac{dW_{\text{em}}}{dt} \Rightarrow$$

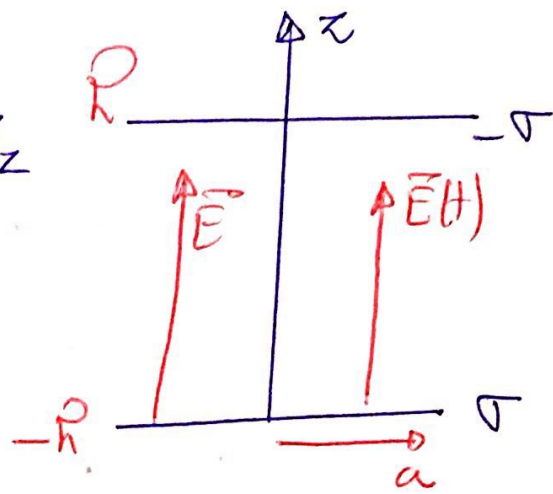
$$R I^2 - R I^2 \quad \parallel$$

$$R_e = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{(\pi a^2)}$$



$\gamma \rightarrow \sigma$: inductivité
 ~~$\neq$~~ C/m^2

$$\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{E \times B} = E_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \vec{u}_z$$



1) $\vec{E}(t) \rightarrow \vec{B}(r,t)$
cause effet

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \left[\vec{j}_{\text{ind}} + \left(\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \right]$$

$$\text{or } \mu_0 \epsilon_0 c^2 = 1$$

$$\text{rot } \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

(MUT $\vec{u}_z$) $\perp$ S $\perp$ pour la cause
 $\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t}$ alors l'effet $\vec{B}(r,t) \perp$ à ce plan
 $\Rightarrow \vec{B} = B_0(r,t) \vec{u}_\theta$

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_0(r,t)) - \frac{1}{r} \frac{\partial B_0(r,t)}{\partial \theta} \right] = \frac{1}{c^2} \frac{\partial E_z(t)}{\partial t}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_0(r,t)) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial E_z(t)}{\partial t}$$

$$r B_\theta(r, t) = \frac{r^2}{2c^2} \frac{dE(t)}{dt} + A_1$$

$$B_\theta(r, t) = \frac{r}{2c^2} \frac{dE(t)}{dt}; \quad (A_1 = 0)$$

$$\boxed{\vec{B} = -\frac{r}{2c^2 \tau} E(t) \vec{u}_\theta}$$

2) $U_{em} = U_e + U_m$

$$\frac{U_m}{U_e} = \frac{B^2}{2\mu_0} \frac{d^2}{\epsilon E^2} = \left(\frac{B}{E}\right)^2 \frac{1}{\mu_0 \epsilon}$$

$$= \left(\frac{-\frac{r}{2\tau c^2}}{1}\right)^2 c^2 = \left(\frac{r}{2\tau c}\right)^2 = \left(\frac{r}{2\lambda}\right)^2$$

$$\leq \left(\frac{a}{2\lambda}\right)^2$$

3) A.R.Q.S $\tau \ll T$: période

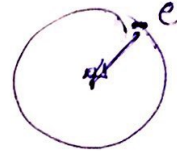
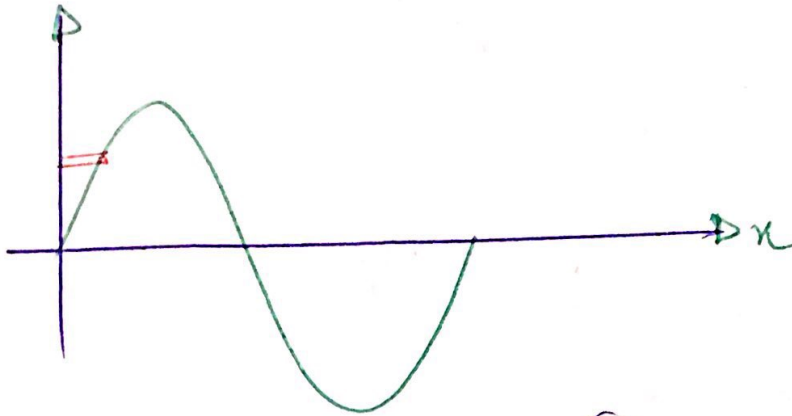
$$\tau_{prop} = \frac{\text{distance}}{c} \ll T$$

$$\underline{\underline{\text{dimens}}} \ll cT = \underline{\underline{\lambda}}$$

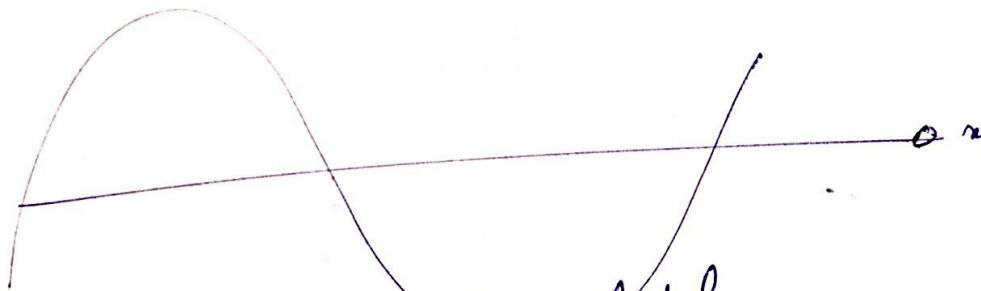
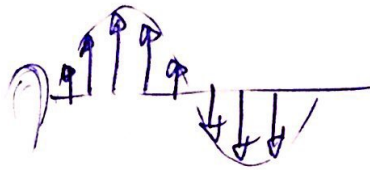
$$\Rightarrow a \ll \lambda$$

$$\underline{\underline{U_{em} \simeq U_e}}$$

$$f_{\text{STEG}} = 50 \text{ Hz}; \quad \lambda_{\text{STEG}} = \frac{c}{f} = 6000 \text{ km}$$



$$\underline{l \ll \lambda}$$



AR.Q.S. : 1st plus variable;

antenne : $l = \frac{\lambda}{2}$

$V(M, t - \frac{r}{c})$: potentiel retard

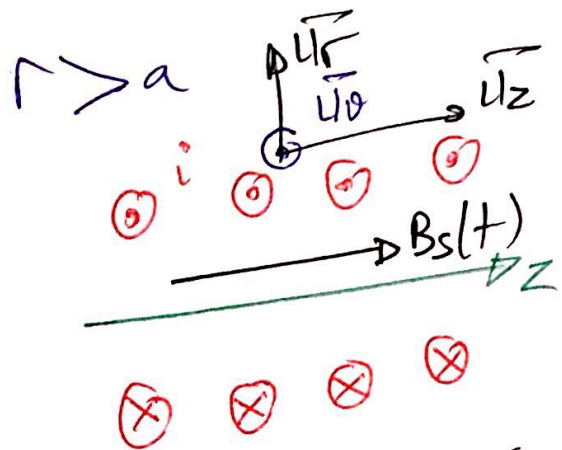
$$4) \vec{\pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} = \frac{E \vec{u}_z \wedge B \vec{u}_\theta}{\mu_0} = \frac{EB}{\mu_0} (-\vec{u}_r)$$

$$\vec{\pi} = \frac{E(t)}{\mu_0} \left(-\frac{r}{2\epsilon_0 c^2} E(t) \right) (-\vec{u}_r)$$

2) Solénóïde :

$$\vec{B}_s = \mu n i(t) \vec{u}_z \quad r < a$$

$$\vec{B}_s = \vec{0}$$



$$\vec{B}_s(t) \longrightarrow \vec{E}(r,t)$$

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}_s}{\partial t}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \iint \text{rot } \vec{E} \cdot d\vec{S} = - \frac{d}{dt} \iint \vec{B}_s(t) \cdot d\vec{S}$$

$$(M \vec{u}_r \vec{u}_\theta) \text{ 2SI case } \Rightarrow \vec{E} \in$$

$$(M \vec{u}_r \vec{u}_z) \text{ 2SI case } \Rightarrow \vec{E} \perp$$

$$\vec{E} = E_\theta(r,t) \vec{u}_\theta$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 2\pi r E_\theta(r,t) = - \frac{d B_s(t)}{dt} \pi r^2$$

$$\vec{E} = - \frac{r}{2} \frac{d B_s(t)}{dt} = + \frac{r}{2} B_s(t) \vec{u}_\theta$$

$$\vec{M}(\vec{F}) = \vec{OM} \wedge \vec{F} ; \quad \vec{L}_0 = \vec{OM} \wedge m \vec{v}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{(\vec{Idl} \wedge \vec{r})}{r^3}, \quad \vec{K} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu}$$

$$\vec{\pi} = + \frac{\epsilon E^2(t) \vec{r}}{2\epsilon_0}$$

$$P_{rayonnée} = \oint \vec{\pi} \cdot d\vec{S}$$

$$= \int \left(\frac{\epsilon E^2(t)}{2\epsilon_0} \right) a \sin\theta dz$$

$$= \frac{a^2 \epsilon E^2(t)}{2\epsilon_0} 2\pi (2h)$$

$$= \frac{(\pi a^2) (2h) \epsilon E^2(t)}{2}$$

$$P_{rayonnée} = \frac{V}{2} \epsilon E^2(t)$$

$$\star \frac{dU_{em}}{dt} = \frac{dU_e}{dt} = \frac{d}{dt} \int u_e d\tau$$

$$= \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\epsilon E^2(t)}{2} \right) \right] V$$

$$= V \epsilon E(t) \frac{dE(t)}{dt}, \quad E(t) = E_0 e^{-t/\tau}$$

$$-\frac{1}{\tau} \epsilon V E^2(t)$$

$$\vec{B}(t) = \mu_0 n i(t) \vec{u}_z = (\mu_0 n I_0) \cos(\omega t) \vec{u}_z$$

$$\vec{B}(t) = B_0 \cos(\omega t) \vec{u}_z$$

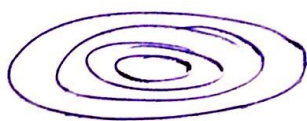
1) Arant fixe, placé dans $\vec{B}_{ext}(t) \Rightarrow \Phi(t)$
 $\Rightarrow e(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt}$: création d'un
 courant induit : courant de Foucault

- fusion des matériaux
- four à induction.

$$2) \vec{B}(t) \longrightarrow \vec{E}(r, t)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

($\nabla_r \vec{u}_z$) $\perp$ $\vec{B}$ pour la cause $\vec{B}(t)$

$\Rightarrow$ l'effet $\vec{E} \perp$ 

$$e = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{1}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$e = 2\pi r E(r, t) = + \left[B_0 \omega \sin(\omega t) \right] \pi r^2$$

$$\vec{E} = \frac{B_0 \omega r}{2} \sin(\omega t) \vec{u}_\theta$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \frac{\sigma B_0 \omega}{2} r \sin(\omega t) \vec{U}_\theta$$

$$4) \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E(r, t)) \right] \vec{U}_z = - \frac{dB(t)}{dt} \vec{U}_z$$

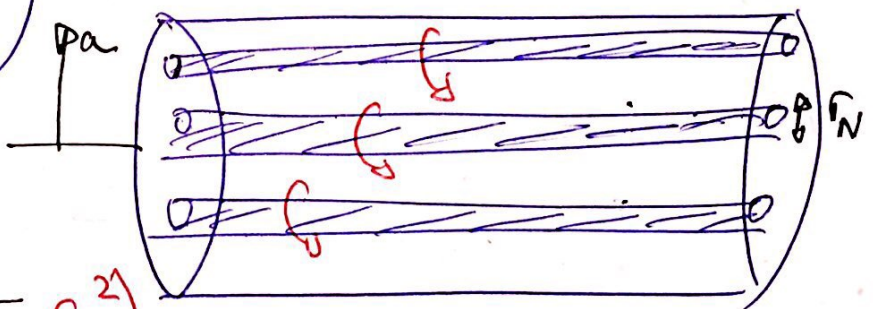
$$5) \langle P_{\text{Joule}} \rangle = \iiint \langle \vec{J} \cdot \vec{E} \rangle r dr d\theta dz$$

$$= \int_0^a \sigma \frac{B_0^2 \omega^2}{4} r^2 \langle \sin^2(\omega t) \rangle r dr \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^L dz$$

$$= \frac{\sigma B_0^2 \omega^2}{4} \times \frac{1}{2} \frac{a^4}{4} 2\pi L$$

$$= \left(\frac{\sigma B_0^2 \pi L}{16} \right) a^4 \omega^2, \quad Q = m L_{\text{Fusion}}$$

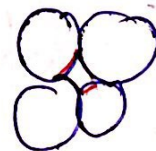
6) a)



$$\pi a^2 = N (\pi r_N^2)$$

$$a^2 = N r_N^2$$

$$a = \sqrt{N} r_N$$



$$\langle P \rangle_{\text{Fibres}} = N \langle P_{\text{Joule}} \rangle_{\text{fibre}}$$

$$= N (K r_N^4)$$

$$= N \frac{K a^4}{N^2} = \frac{K a^4}{N}$$

$$K = \frac{B_0^2 \pi L V \omega^2}{16}$$

$$\langle P_{\text{Joules}} \rangle_{\text{Fibres}} = \frac{\langle P \rangle}{N}$$

techniques de fibrillation.

