ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES.
ECOLES NATIONALES SUPERIEURES DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE,
DE TECHNIQUES AVANCEES, DES TELECOMMUNICATIONS,
DES MINES DE PARIS, DES MINES DE SAINT– ETIENNE, DES MINES DE NANCY,
DES TELECOMMUNICATIONS DE BRETAGNE,
´ECOLE POLYTECHNIQUE (FILIERE TSI)
CONCOURS D'ADMISSION **2009**
PHYSIQUE II — MP

OSCILLATIONS DE PUISSANCE À HAUTE FRÉQUENCE

Corrigé de Mohamed Elabdallaoui
Professeur agrégé CPGE Marrakech

I. — Le magnétron, oscillateur hyperfréquence

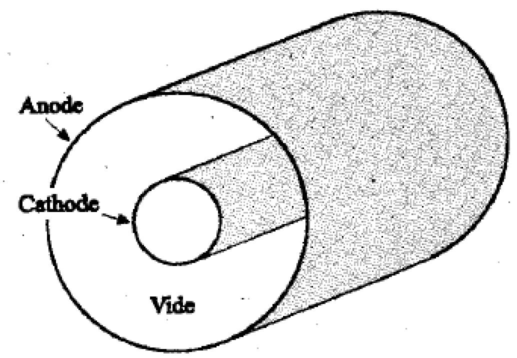


Fig. 1 - Le magnétron vue d'ensemble

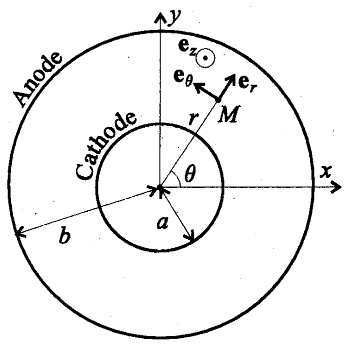


Fig 2

I.A. — Le magnétron sans champ magnétique

❑**-1** l'équation de Poisson $\Delta V+\frac{\rho}{\varepsilon_0}=0$ et $\rho=0$ donne $\Delta V=0$

$$\Delta V=div\left(\overrightarrow{grad}V\right)=\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dV}{dr}\right)=0\Rightarrow\left(r\frac{dV}{dr}\right)=A\Rightarrow\left(\frac{dV}{dr}\right)=\frac{A}{r}\Rightarrow V(r)=A\ln(r)+B$$

$$V(a)=0\ \ et\ \ V(b)=V_0\qquad \boxed{V(r)=V_0\frac{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}}$$

❑**-2**

$$\vec{E}=-\overrightarrow{grad}V\Rightarrow\vec{E}=-\frac{V_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\frac{1}{r}\vec{e}_r\quad\text{or}\quad m\frac{d\vec{v}}{dt}=-eE(r)\vec{e}_r\Rightarrow\ md\vec{v}=-eE(r)\vec{e}_r dt$$

$$m\vec{v}(t)-m\vec{v}(0)=-\left(\int_0^t eE(r)dt\right)\vec{e}_r$$

Si $\left\|\vec{v}(0)\right\|\ll\left\|\vec{v}(t)\right\|$ alors $m\vec{v}(t)=-\left(\int_0^t eE(r)dt\right)\vec{e}_r$ la trajectoire est une droite suivant un rayon du cylindre.

$$\frac{d^2r}{dt^2}=\frac{eV_0}{m\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\frac{1}{r}\Rightarrow 2\frac{dr}{dt}\frac{d^2r}{dt^2}=2\frac{eV_0}{m\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\frac{1}{r}\frac{dr}{dt}\Rightarrow\frac{d\dot r^2}{dt}=2\frac{eV_0}{m\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\frac{d\ln r}{dt}\Rightarrow$$

$$\dot r^2=2\frac{eV_0}{m\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\ln r+Cste$$

Si $r=a$ *alors* $\dot r=0$ (négligeable) donc $\dot r^2=2\frac{eV_0}{m\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\ln\left(\frac{r}{a}\right)\Rightarrow\boxed{\dot r=\sqrt{\frac{2eV_0}{m\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\ln\left(\frac{r}{a}\right)}}$

❑- 3 la durée τ du trajet de la cathode à l'anode. On posera $f(u)=\int_1^u\frac{dx}{\sqrt{\ln x}}$

$$\dot r=\sqrt{\frac{2eV_0}{m\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\ln\left(\frac{r}{a}\right)}\Rightarrow\frac{dr}{\sqrt{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}}=dt\sqrt{\frac{2eV_0}{m\ln\left(\frac{b}{a}\right)}}\text{ On pose }x=\frac{r}{a}$$

$$\Rightarrow\frac{dx}{\sqrt{\ln x}}=\sqrt{\frac{2eV_0}{m\ln\left(\frac{b}{a}\right)}}\frac{dt}{a}\Rightarrow\int_1^{\frac{b}{a}}\frac{dx}{\sqrt{\ln x}}=\sqrt{\frac{2eV_0}{m\ln\left(\frac{b}{a}\right)}}\frac{\tau}{a}$$

$$\Rightarrow\boxed{\tau=\sqrt{\frac{ma^2\ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2eV_0}}f\left(\frac{b}{a}\right)}$$

I.B. - Le magnétron vide, avec un champ magnétique.

❑-4

On a $m\frac{d\vec v}{dt}=-eE(r)\vec e_r-e\vec v\wedge\vec B_0$ donc si on multiplie par $\vec e_z$ on trouve $m\frac{dv_z}{dt}=0$ soit $v_z=Cste$ si l'électron est émis au niveau de la cathode sans vitesse initiale alors $\boxed{v_z=0}$ le mouvement se fait dans le plan xOy.

$-eE(r)\vec e_r$ est une force centrale conservative, $-e\vec v\wedge\vec B_0$ ne travail pas donc l'énergie mécanique Em de cet électron est conservée.

on a $-eE(r)\vec e_r=\frac{eV_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\frac{1}{r}\vec e_r=-\frac{dEp}{dr}\vec e_r\Rightarrow Ep=-\frac{eV_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\ln\left(\frac{r}{a}\right)$ donc

$$\boxed{Em=\frac{1}{2}m\left(\dot r^2+r^2\dot\theta^2\right)-\frac{eV_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\ln\left(\frac{r}{a}\right)}$$

❑-5

$$\frac{d\vec\sigma_O}{dt}=\underbrace{\overrightarrow{OM}\wedge -eE(r)\vec e_r}_{=0}+\overrightarrow{OM}\wedge -e\vec v\wedge\vec B_0\Rightarrow\frac{d\vec\sigma_O}{dt}=-e\begin{vmatrix}r\\0\\0\end{vmatrix}\wedge\left(\begin{vmatrix}\dot r\\r\dot\theta\\0\end{vmatrix}\wedge\begin{vmatrix}0\\0\\B_0\end{vmatrix}\right)=-e\begin{vmatrix}r\\0\\0\end{vmatrix}\wedge\begin{vmatrix}r\dot\theta B_0\\-\dot rB_0\\0\end{vmatrix}=-e\begin{vmatrix}0\\0\\-r\dot rB_0\end{vmatrix}$$

soit $\dfrac{d\vec{\sigma}_O}{dt} = er\dot{r}B_0\vec{e}_z \Rightarrow \dfrac{d\vec{\sigma}_O}{dt} = \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{er^2B_0}{2}\right)\vec{e}_z \Rightarrow \dfrac{d\vec{\sigma}_O}{dt} = \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{er^2B_0}{2}\right)\vec{e}_z$ or $\vec{\sigma}_o = mr^2\dot{\theta}\vec{e}_z$ donc

$$\boxed{mr^2\dot{\theta} - \frac{er^2B_0}{2} = Cste = -\frac{ea^2B_0}{2}}$$

❑-6

en $r = b$ alors $\dot{r} = 0$ le mouvement est impossible si $Em - E_{peff} < 0$ c'est-à-dire

$\dfrac{2eV_0}{\ln\left(\dfrac{b}{a}\right)}\ln\left(\dfrac{b}{a}\right) - mb^2\dot{\theta}^2 \prec 0$ ou $mb^2\dot{\theta}^2 \succ 2eV_0$ or $mb^2\dot{\theta} = \dfrac{eb^2B_0}{2} - \dfrac{ea^2B_0}{2} \Rightarrow B_0 \succ \sqrt{\dfrac{2emV_0}{\left(\dfrac{eb^2}{2b} - \dfrac{ea^2}{2b}\right)^2}}$ et

$$\boxed{B_C = \sqrt{\frac{8b^2mV_0}{e\left(b^2 - a^2\right)^2}}}$$

si b ≫ a ; cette relation porte le nom d'équation de HULL. $\boxed{B_C = \sqrt{\dfrac{8mV_0}{eb^2}}}$

$\omega = \dfrac{eB_c}{2m}\left(1 - \dfrac{a^2}{r_0^2}\right) \Rightarrow$ si $r_0 = b \gg a$ alors $\boxed{\omega \to \omega_c = \sqrt{\dfrac{2eV_0}{mb^2}}}$

I.C. - Le magnétron, avec charge d'espace et champ magnétique

❑-7 $mr^2\dot{\theta} - \dfrac{er^2B_0}{2} = Cste \Rightarrow r^2\left(m\dot{\theta} - \dfrac{eB_0}{2}\right) = Cste$ $\forall r$ ne peut être réalisé que si $\dot{\theta} = \omega_B = \dfrac{eB_0}{2m}$

le mouvement est circulaire $\dot{r} = 0$ et $Em = \dfrac{1}{2}m\left(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2\right) - eV(r)$ donne

$V(r) = \dfrac{m}{2e}\left(\dfrac{eB_0}{2m}\right)^2 r^2 - \dfrac{Em}{e}$ le potentiel qui règne dans l'espace inter électrode.

Et l'équation de Laplace donne $\dfrac{m}{2e}\left(\dfrac{eB_0}{2m}\right)^2 \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial}{\partial r}\left(r\dfrac{\partial r^2}{\partial r}\right) + \dfrac{\rho}{\varepsilon_0} = 0 \Rightarrow$

$\boxed{\rho = -\dfrac{2m\varepsilon_0}{e}\left(\dfrac{eB_0}{2m}\right)^2 \neq 0}$ Donc on doit tenir compte d'une charge dans l'espace inter-électrode.

❑-8

On a $V(r) = \dfrac{m}{2e}\left(\dfrac{eB_0}{2m}\right)^2 r^2 - \dfrac{Em}{e}$ avec $V(a) = 0$ et $V(b) = 0 \Rightarrow \boxed{V(r) = \dfrac{V_0}{b^2 - a^2}\left(r^2 - a^2\right)}$

Autre méthode $m\dfrac{d\vec{v}}{dt} = -eE(r)\vec{e}_r - e\vec{v} \wedge \vec{B}_0$

$$\begin{cases} m\left(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2\right) = -eE - er\dot{\theta}B_0 \\ m\left(2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}\right) = e\dot{r}B_0 \\ \ddot{z} = 0 \end{cases}$$

$$m\left(\ddot{r}-r\dot{\theta}^2\right)=-eE-er\dot{\theta}B_0 \Rightarrow mr\omega_B^2-er\omega_B B_0=eE \Rightarrow \frac{m}{e}r\omega_B^2-r\omega_B B_0=E=-\frac{dV}{dr} \Rightarrow$$

$$V(r)=\frac{1}{2}\left(\omega_B B_0-\frac{m}{e}\omega_B^2\right)r^2+Cste$$

Les conditions aux limites $\frac{1}{2}\left(\omega_B B_0-\frac{m}{e}\omega_B^2\right)a^2+Cste=0$ et $\frac{1}{2}\left(\omega_B B_0-\frac{m}{e}\omega_B^2\right)b^2+Cste=V_0$

$$\boxed{V(r)=V_0\frac{r^2-a^2}{b^2-a^2}}$$

$$\frac{1}{2}\left(\omega_B B_0-\frac{m}{e}\omega_B^2\right)\left(b^2-a^2\right)=V_0 \Rightarrow \boxed{B_0=B_B=\frac{m\omega_B}{e}+\frac{2V_0}{\left(b^2-a^2\right)\omega_B}}$$

❑-9

Si $r \gg a$ alors (toujours le mouvement est circulaire et $Em(t=0)=0$)

$$\begin{aligned}Em &\approx \frac{1}{2}m\left(r^2\omega_B^2\right)-eV_0\frac{r^2-a^2}{b^2-a^2}\\ &\approx \frac{1}{2}m\left(r^2\omega_B^2\right)-eV_0\frac{r^2}{b^2}\\ &=r^2\left(\frac{1}{2}m\omega_B^2-\frac{eV_0}{b^2}\right)\\ &=0\end{aligned}$$

Possible si $\boxed{\omega_B=\sqrt{\frac{2eV_0}{mb^2}}}$ et $\boxed{B_B=\sqrt{\frac{8mV_0}{eb^2}}}$

❑-10 $\boxed{V_0=\frac{mb^2\omega_B^2}{2e}=\frac{9,1.10^{-31}.25.10^{-6}.\left(2.3,14.2,45.10^9\right)^2}{2.1,6.10^{-19}}=16,83kV}$

$$\boxed{B_B=\frac{2m}{e}\omega_B=\frac{2.9,1.10^{-31}.2.3,14.2,45.10^9}{1,6.10^{-19}}=0,175T}$$

Soit quatre milles fois le champ magnétique terrestre.

II.A. - Étude du faisceau d'électrons dans le tube

❑-11 $\boxed{I_0=-\rho u_0\pi a^2}$

Invariance par rotation autour de Oz $\vec{E}$ ne dépend pas de θ

$$\Phi=\frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0}$$

$$\Phi=E.2\pi rh$$

si $r<a$ $Q_{\text{int}}=\rho\pi r^2h$ donc $E.2\pi rh=\frac{\rho\pi r^2h}{\varepsilon_0}$ et $\boxed{E_c=-\frac{I_0}{2\varepsilon_0u_0\pi a^2}r}$

si $r>a$ $Q_{\text{int}}=\rho\pi a^2h$ donc $E.2\pi rh=\frac{\rho\pi a^2h}{\varepsilon_0}$ et $\boxed{E_c=-\frac{I_0}{2\varepsilon_0u_0\pi}.\frac{1}{r}}$

❑-12

$m\frac{d^2r}{dt^2}=-eE_c(a)$ donc $r-a=-\frac{eE_c(a)t^2}{2m}$ soit $\Delta r=-\frac{eE_c(a)\tau^2}{2m}$

Or $m\dfrac{d^2z}{dt^2}=0 \quad \dot{z}=u_0$ et $\ell=u_0.\tau$

$$\boxed{\Delta r=-\frac{eE_c(a)}{2m}\left(\frac{\ell}{u_0}\right)^2>0}$$

Si $\Delta r \ll a$ alors le faisceau est cylindrique : $\dfrac{eI_0}{4\pi\varepsilon_0 m u_0 a}\left(\dfrac{\ell}{u_0}\right)^2 \ll a \Rightarrow I_0 \ll \dfrac{4\pi\varepsilon_0 m u_0 a^2}{e}\left(\dfrac{u_0}{\ell}\right)^2$

$$\boxed{I_1=\frac{4\pi\varepsilon_0 m u_0^3}{e}\left(\frac{a}{\ell}\right)^2}$$

❑-13

$div\vec{E}=\dfrac{\rho}{\varepsilon_0} \Rightarrow \dfrac{dE}{dz}=\dfrac{\rho}{\varepsilon_0} \Rightarrow \boxed{\dfrac{dE}{dz}=-\dfrac{I_0}{\varepsilon_0 u_0 s}}$ de plus $E=-\dfrac{dV}{dz}$

$\Rightarrow \dfrac{d^2V}{dz^2}=\dfrac{I_0}{\varepsilon_0 u_0 s} \Rightarrow \dfrac{dV}{dz}=\dfrac{I_0}{\varepsilon_0 u_0 s}z+C_1 \Rightarrow V=\dfrac{I_0}{2\varepsilon_0 u_0 s}z^2+C_1 z+C_2$

$V(0)=C_2=V_A$

$V(\ell)=\dfrac{I_0}{2\varepsilon_0 u_0 s}\ell^2+C_1\ell+V_A=V_A$ soit $C_1=-\dfrac{I_0}{2\varepsilon_0 u_0 s}\ell$

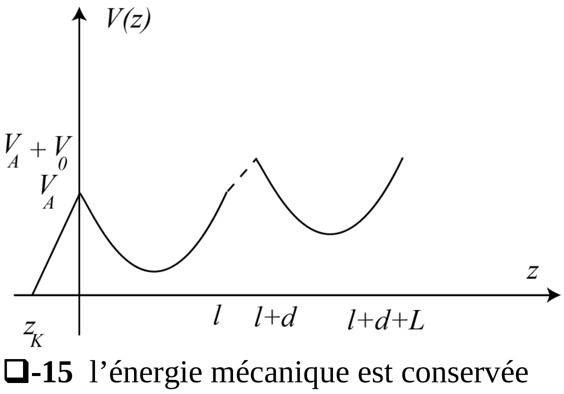
$$\boxed{V(z)=\frac{I_0}{2\varepsilon_0 u_0 s}\left(z^2-\ell.z\right)+V_A}$$

$V(z)$ est minimale si $z=z_1=\dfrac{\ell}{2}$ donc $V(z)$ est uniforme si $\left|V(z_1)-V_A\right| \ll V_A$

$\dfrac{I_0\ell^2}{8\varepsilon_0 u_0 s} \ll V_A$ soit $I_0 \ll \dfrac{8\varepsilon_0 u_0 s V_A}{\ell^2}$ en fin $\boxed{I_2=\dfrac{8\varepsilon_0 u_0 s V_A}{\ell^2}}$

$|\rho| << \dfrac{8\varepsilon_0 V_0}{\ell^2}$

❑-14



❑-15 l'énergie mécanique est conservée

$Em=\dfrac{1}{2}mu_0^2-eV_A=\dfrac{1}{2}mu^2-eV_M$ donc $\dfrac{1}{2}mu^2=\dfrac{1}{2}mu_0^2-eV_A+eV_M \Rightarrow u=\sqrt{u_0^2+\dfrac{2eV_0}{m}\sin\omega t}$

Or $\dfrac{1}{2}mu_0^2=eV_A$ d'où $u=u_0\sqrt{1+\dfrac{V_0}{V_A}\sin\omega t} \Rightarrow \boxed{u=u_0\sqrt{1+2\beta\sin\omega t}}$

Pour $\beta \ll 1$ alors $\boxed{u=u_0\left(1+\beta\sin\omega t\right)}$

❑-16

$$\boxed{<E_c>=\frac{1}{2}m<u^2>\approx\frac{1}{2}mu_0^2<(1+2\beta\sin\omega t)>\approx\frac{1}{2}mu_0^2}$$

Chocs et les forces de frottement consomme l'énergie.

II.B. - Étude de la modulation de vitesse du faisceau d'électrons

❑**-17** on a $u(t_1)=\dfrac{L}{t_2-t_1}$ soit $(1+\beta\sin\sigma_1)=\dfrac{\sigma_0}{(\sigma_2-\sigma_1)}$

L'unité des grandeurs $\sigma_1,\sigma_2,\sigma_0$ *et* k est le rad mais ils sont sans dimensions physiques.

Rappel :

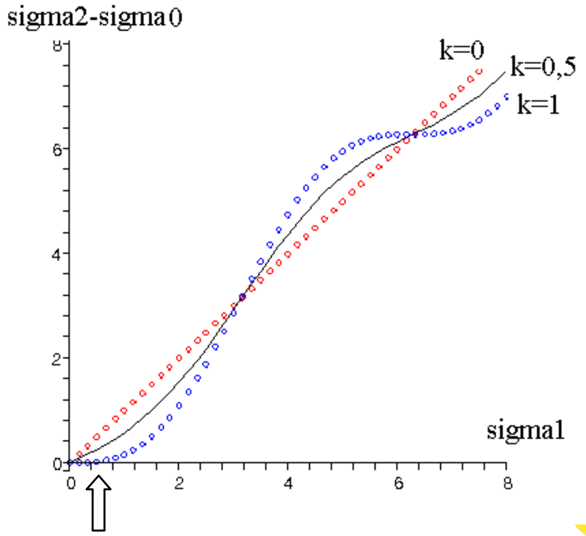
« La dimension d'une grandeur physique est son unité exprimée par rapport aux sept unités de base du système international. Exemple la fréquence : la dimension de Hz est $[Hz]=T^{-1}$ et son unité s^{-1} »

$$\boxed{\sigma_2=\sigma_1+\sigma_0\left(1-\frac{k}{\sigma_0}\sin\sigma_1\right)}$$

❑**-18**

$$\boxed{\sigma_2-\sigma_0=\sigma_1-k\sin\sigma_1}$$

```
➢ plot([x,x-(sin(x)/2),x-sin(x)], x=0..8,
  color=[red,black,blue], style=[point,line]);
```



$$k=\beta\sigma_0=\frac{V_0}{2V_A}\cdot\frac{\omega L}{u_0}$$

Paramètre du regroupement : le temps du parcours depuis M2 à D1 dépend de k.

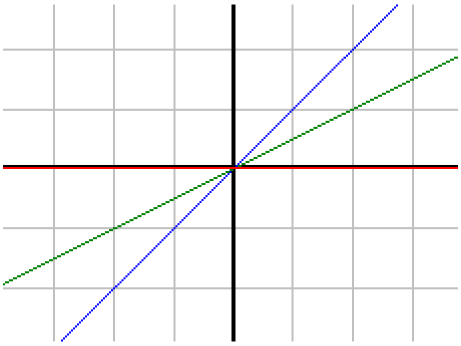
Si $k=0$ il n'y a pas du regroupement

Si $k=0,5$ il y a du regroupement

Si $k=1$ il y a regroupement marqué

Il y'a un groupement marqué pour des valeurs de k assez élevées car $\sigma_2-\sigma_0\approx 0$ voir la flèche.

Remarque dans cettte question on peut se limiter au tracés de **(x,x/2,0)**



❑-19

Rappel $\sin x = x - \dfrac{x^3}{6}$

On a $\sigma_2 - \sigma_0 = \sigma_1 - k\sin\sigma_1$

donc $\sigma_2^{+1/2} - \sigma_0 = \sigma_1^{+1/2} - \sin\sigma_1^{+1/2}$ et $\sigma_2^{-1/2} - \sigma_0 = \sigma_1^{-1/2} - \sin\sigma_1^{-1/2}$

$\dfrac{t_2^{+1/2} - t_2^{-1/2}}{t_2^{+1/2}} = 0{,}01 \Rightarrow \dfrac{\sigma_2^{+1/2} - \sigma_2^{-1/2}}{\sigma_2^{+1/2}} = 0{,}01 \Rightarrow \boxed{dt_1 = \left(\dfrac{0{,}24.L}{\omega^2 u_0}\right)^{1/3}}$ AN $\boxed{dt_1 = 1{,}6.10^{-10}\,s}$ $\varepsilon = 15\%$

❑-20

La charge entrante est égale à la charge sortante $I(\sigma_1)dt_2 = I_0 dt_1$

$$\boxed{I_0 = I(\sigma_1)\frac{d\sigma_2}{d\sigma_1}}$$

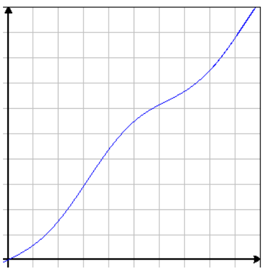
Or $\sigma_2 - \sigma_0 = \sigma_1 - k\sin\sigma_1$ donne $\dfrac{d\sigma_2}{d\sigma_1} = 1 - k\cos\sigma_1$

$\boxed{I(\sigma_1) = \dfrac{I_0}{1 - k\cos\sigma_1}}$ cqfd

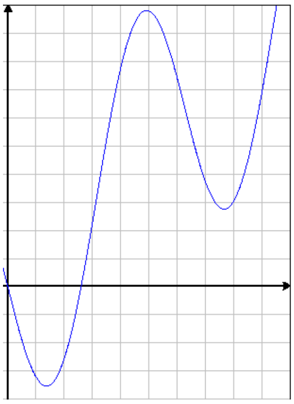
❑-21 $\varphi = \omega\left(t_2 - \dfrac{L}{u_0}\right) = (\sigma_2 - \sigma_0)$ soit $\varphi = \sigma_1 - k\sin\sigma_1$

Si $k \le 1$ $I(\sigma_1) = \dfrac{I_0}{1 - k\cos\sigma_1} > 0$ et croissante donc I est une fonction de φ

« Voila les courbes de φ en fonction de σ_1 si



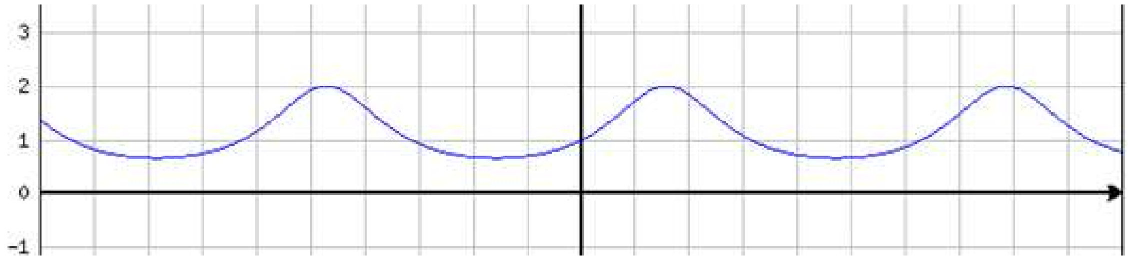
$k \le 1$



$k > 1$

$\varphi + T_\varphi = \sigma_1 + 2\pi - k\sin\sigma_1$ soit $T_\varphi = 2\pi$

$I(\varphi)$ est une fonction paire



❑-22

$$\boxed{< I >= \frac{1}{\pi}\int_0^\pi I(\varphi)d\varphi = I_0}$$

Fonction paire $\boxed{b_n = 0}$

$$a_n = \frac{2}{\pi}\int_0^\pi I(\varphi)\cos n\varphi d\varphi = \frac{2I_0}{\pi}\int_0^\pi \frac{\cos n\varphi}{1 - k\cos\sigma_1}(1 - k\cos\sigma_1)d\sigma_1 \text{ puisque } d\varphi = (1 - k\cos\sigma_1)d\sigma_1$$

$$a_n = \frac{2I_0}{\pi}\int_0^\pi \cos n(\sigma_1 - k\sin\sigma_1)d\sigma_1 \text{ donc } \boxed{a_n = 2I_0.J_n(nk)}$$

Avec $J_n(nk) = \frac{1}{\pi}\int_0^\pi \cos(nk\sin\psi - n\psi)d\psi$

❑-23

On a $\beta\frac{\omega L_m}{u_0} = \alpha_m \Rightarrow L_m = \frac{u_0\alpha_m}{\beta\omega}$

Or $\frac{1}{2}mu_0^2 = eV_A$ donc $\boxed{L_m = \frac{\alpha_m}{2\pi f\beta}\sqrt{\frac{2eV_A}{m}}}$

❑-24

$\boxed{f = \frac{\alpha_m}{2\pi L_m\beta}\sqrt{\frac{2eV_A}{m}}}$ $\boxed{f = \frac{1{,}84}{2.3{,}14.0{,}1.0{,}5}\sqrt{\frac{2.1{,}6.10^{-19}.75000}{9{,}1.10^{-31}}} = 952 MHz}$

UHF 300 MHz à 3 GHz

Télédiffusion, radiodiffusion numérique, radioamateurs, radiocommunications professionnelles, transmissions militaires y compris aéronautiques, liaisons gouvernementales, liaisons satellites, FH terrestres, radiolocalisation et radionavigation, services de la DGAC, usages spatiaux, satellites météo, téléphonie GSM et UMTS, liaisons Wi-Fi et Bluetooth, systèmes radar

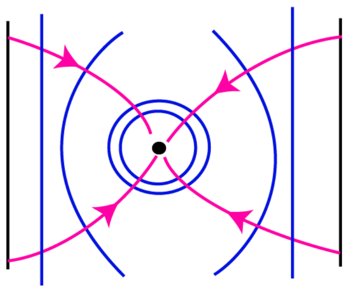
❑-25

$\Sigma_{01} = \frac{Q}{s} = -\frac{Cv_D}{s}$ or $C = \frac{\varepsilon_0 s}{d}$

$\boxed{\Sigma_{01} = -\frac{\varepsilon_0 v_D}{d}}$ $\boxed{\Sigma_{02} = \frac{\varepsilon_0 v_D}{d}}$

❑-26

les lignes du champs ***les surfaces équipotetielles***



$\Sigma_1 > 0, \Sigma_2 > 0, q_1 > 0$ et $q_2 > 0$.

$q_1 + q_2 = e$

❑-27

$z_e << d$ On aura $\lim q_{1i} = e$ et $\lim q_{2i} = 0$

$z_e \simeq d$ On aura $\lim q_{1i} = 0$ et $\lim q_{2i} = e$

$q_D = e$

❑-28

$\boxed{i_D = I_K}$

❑-29

On peut raisonner dans le cas où on a un maximum pour α_m. et $\eta = \frac{i_D(\alpha_m)}{I_0}$.