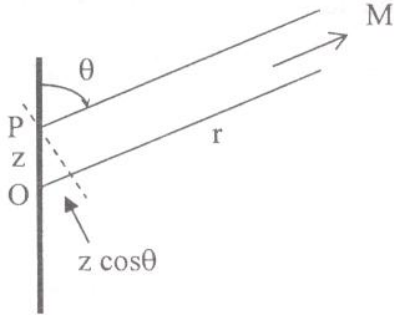


Corrigé T-2013

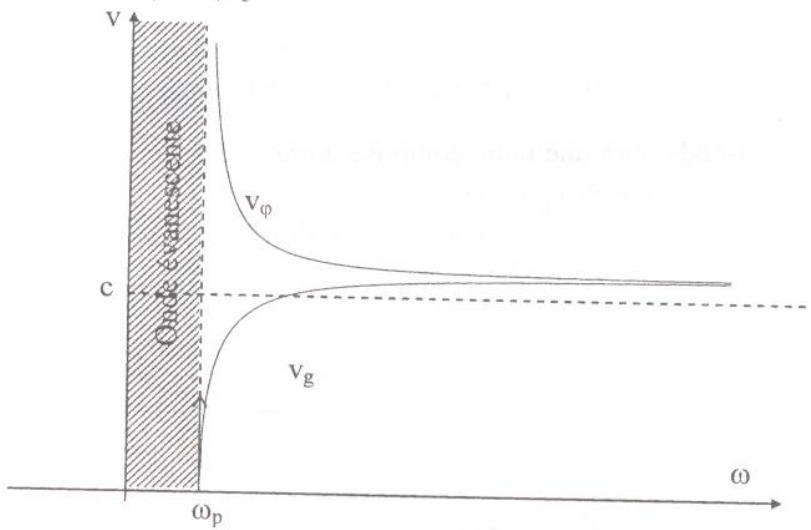
Partie 1 (08 / 80) :

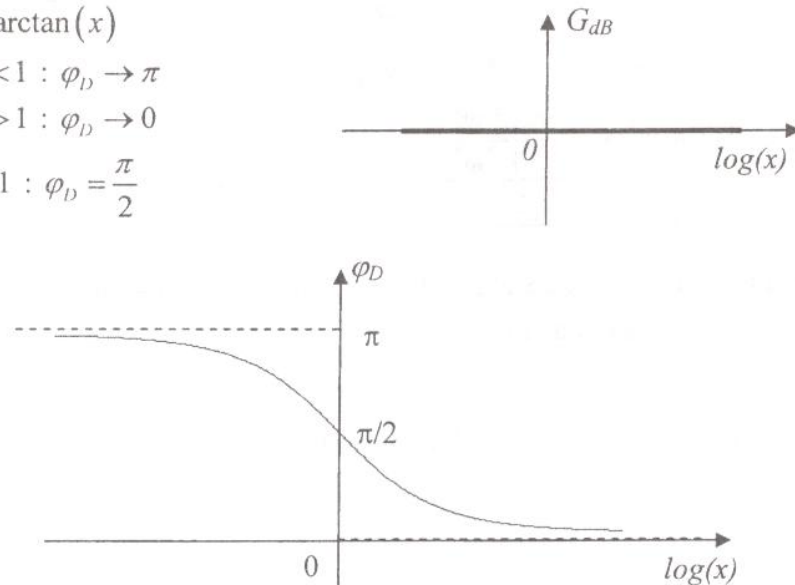
Question		Barème
1-	$(M-G) : \text{div} \vec{E} = \frac{\rho(M,t)}{\epsilon_0} \quad (M-\Phi) : \text{div} \vec{B} = 0$ $(M-F) : \vec{\text{rot}} \vec{E}(M,t) = -\frac{\partial \vec{B}(M,t)}{\partial t}$ $(M-A) : \vec{\text{rot}} \vec{B}(M,t) = \mu_0 \vec{j}(M,t) + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}(M,t)}{\partial t}$	1
2-	$\rho = 0, \vec{j} = \vec{0} :$ démonstration : $\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}$, de même : $\Delta \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \vec{0}$	0.75 + 0.5
3-	C'est une onde plane progressive monochromatique polarisée rectilignement selon $\vec{u}_x$, se propageant dans le sens des z croissants (si $k > 0$)	1
4-	En remplaçant l'expression donnée dans l'équation de propagation, on trouve : $k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \Rightarrow k = \frac{\omega}{c}$: relation de dispersion. La relation de dispersion est linéaire, le vide n'est pas dispersif.	0.75 + 0.5
5-	$\vec{B}(M,t) = \frac{\vec{u}_z \wedge \vec{E}(M,t)}{c} = \frac{E_0}{c} \exp j(\omega t - kz) \vec{u}_y$	1
6-	$u_{em} = \epsilon_0 \frac{E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} = \epsilon_0 E_0^2 \cos^2(\omega t - kz)$ $\langle u_{em} \rangle = \frac{\epsilon_0 E_0^2}{2}$	0.75 + 0.5
7-	$\vec{\Pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} = c \epsilon_0 E_0^2 \cos^2(\omega t - k_0 z) \vec{u}_z = c \cdot u_{em} \vec{u}_z$ $\ \langle \vec{\Pi} \rangle\ = c \langle u_{em} \rangle = c \frac{\epsilon_0 E_0^2}{2} = I$: intensité énergétique de l'onde	0.75 + 0.5
Partie 2 (20 / 80) :		
8-1-	Le plan $(M, \vec{u}_r, \vec{u}_\theta)$ est un plan de symétrie pour la distribution de charge $\Rightarrow$ le champ magnétique est perpendiculaire à ce plan : $\vec{B}(M,t) = B(M,t) \vec{u}_\phi$.	0.5
8-2-	$\vec{B}(M,t) = j\omega \frac{\mu_0 p_0 \sin \theta}{4\pi r^2} \left(1 + j \frac{r\omega}{c}\right) e^{j\omega \left(t - \frac{r}{c}\right)} \vec{u}_\phi$	0.5
9-1-	Zone de rayonnement : $r \gg \lambda$	0.5
9-2-	$\frac{r\omega}{c} = 2\pi \frac{r}{\lambda}$, d'où $\vec{B}(M,t) = -\frac{\omega^2 p_0 \sin \theta}{4\pi \epsilon_0 r c^3} e^{j\omega \left(t - \frac{r}{c}\right)} \vec{u}_\phi$	1
10-	Onde localement plane : $\vec{E}(M,t) = -c \left(\vec{u}_r \wedge \vec{B}(M,t)\right)$ $\Rightarrow \vec{E}(M,t) = -\frac{\omega^2 p_0 \sin \theta}{4\pi \epsilon_0 r c^2} e^{j\omega \left(t - \frac{r}{c}\right)} \vec{u}_\theta$	1
11-	$\vec{\Pi}(M,t) = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} = \frac{\omega^4 p_0^2 \sin^2 \theta}{16\pi^2 \epsilon_0 c^3 r^2} \cos^2 \omega \left(t - \frac{r}{c}\right) \vec{u}_r$; $\langle \vec{\Pi}(M,t) \rangle = \frac{\omega^4 p_0^2 \sin^2 \theta}{32\pi^2 \epsilon_0 c^3 r^2} \vec{u}_r$	1+0.5
12-	$\mathcal{P}_R = \oint_{\text{sphère}} \langle \vec{\Pi} \rangle \cdot r^2 \sin \theta d\theta d\phi \vec{u}_r \Rightarrow \mathcal{P}_R = \frac{p_0^2 \omega^4}{12\pi \epsilon_0 c^3}$	1

13-	$q(z,t) = \int i(z,t) dt \Rightarrow q(z,t) = \frac{I_0}{\omega} \cos\left(\frac{\pi}{\ell} z\right) \sin(\omega t)$	1
14-	$\delta \vec{p}(z,t) = q(z,t) dz \vec{u}_z = \frac{I_0}{\omega} \cos\left(\frac{\pi}{\ell} z\right) \sin(\omega t) \vec{u}_z ; \ell = \frac{\lambda}{2}$ $\delta \vec{p}(z,t) = -j \frac{I_0}{\omega} dz \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right) \exp(j\omega t) \vec{u}_z$	1
15-	$d\vec{B}_O(M,t) = \frac{\mu_0 \sin \theta}{4\pi r c} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} (\delta p) \right)_{\left(t - \frac{r}{c}\right)} \vec{u}_\phi$ (question 9), soit $d\vec{B}_O(M,t) = \frac{\mu_0 \sin \theta}{4\pi r c} j\omega I_0 dz \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right) \exp j\omega \left(t - \frac{r}{c}\right) \vec{u}_\phi$: dipôle dz en O $d\vec{B}(M,t) = \frac{\mu_0 \sin \theta}{4\pi c PM} j\omega I_0 dz \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right) \exp j\omega \left(t - \frac{PM}{c}\right) \vec{u}_\phi$: dipôle dz en P, ce qui donne puisque $\frac{1}{PM} \approx \frac{1}{r}$ et $\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, $d\vec{B}(M,t) = j\omega \frac{\mu_0 \sin \theta}{4\pi c PM} I_0 dz \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right) \exp j\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} PM\right) \vec{u}_\phi$	0.75 + 1.25
16-	$PM = r - z \cos \theta$ 	1
17-	$d\vec{B}(M,t) = j\omega \frac{\mu_0 I_0 \sin \theta}{4\pi c r} \exp j(\omega t - kr) \left[\exp(jk(1 + \cos \theta)z) + \exp(-jk(1 - \cos \theta)z) \right] dz \vec{u}_\phi$ $\vec{B}(M,t) = \int_{-\frac{\lambda}{4}}^{\frac{\lambda}{4}} d\vec{B}(M,t) ; \text{ soit : } \vec{B}(M,t) = j \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r} \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \exp j\left(\omega t - \frac{\omega}{c} r\right) \vec{u}_\phi$ ou en notation réelle $\vec{B}(M,t) = -\frac{\mu_0 I_0}{2\pi r} \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c} r\right) \vec{u}_\phi$	0.5 + 2 + 0.5
18-	L'onde rayonnée est localement plane : $\vec{E}(M,t) = -c(\vec{u}_r \wedge \vec{B}(M,t))$ $\vec{E}(M,t) = -\frac{I_0}{2\pi \epsilon_0 c r} \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \sin \omega(t - \frac{r}{c}) \vec{u}_\theta$	0.5 + 0.5
19-	$\vec{\Pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} = \frac{I_0^2}{4\pi^2 \epsilon_0 c r^2} \frac{\cos^2(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin^2 \theta} \sin^2\left(\omega t - \frac{\omega}{c} r\right) \vec{u}_r$ $\langle \vec{\Pi} \rangle = \frac{I_0^2}{8\pi^2 \epsilon_0 c r^2} \frac{\cos^2(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin^2 \theta} \vec{u}_r$	0.75 + 0.5
20-	$P_m = \oint_{\text{sphère}} \langle \vec{\Pi} \rangle r^2 \sin \theta d\theta d\phi \vec{u}_r \Rightarrow P_m = \frac{0,61}{2\pi \epsilon_0 c} I_0^2$	1.25

21-	$R_r = \frac{0,61}{\pi \epsilon_0 c} ; R_r = 73,2 \Omega$	0.5+0.5
22-	Dipôle : $G_{dipôle} = \frac{3}{2} \sin^2 \theta = 1,5$ Antenne : $G_{antenne} = 0,61 \frac{\cos^2(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin^2 \theta} = 1,64$ La directivité de l'antenne est plus grande que celle du dipôle.	0.5 + 0.5 + 0.5
Partie 3 (10 / 80) :		
23-	Terre à symétrie sphérique : $\vec{F} = -G \frac{M_T m_s}{r^2} \vec{u}_r = m_s \vec{g}(M) \Rightarrow \vec{g}(M) = -G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_r$	1
24-1-	$(m_s + M_T) \vec{v}_{\mathcal{R}}(G) = M_T \vec{v}_{\mathcal{R}}(T) + m_s \vec{v}_{\mathcal{R}}(s)$, $\mathcal{R}$ un référentiel galiléen Le système {terre+satellite} est isolé : $\vec{p}_{\mathcal{R}} = M_T \vec{v}_{\mathcal{R}}(T) + m_s \vec{v}_{\mathcal{R}}(s)$ se conserve $\Rightarrow \vec{v}_{\mathcal{R}}(G) = cte \Rightarrow$ le référentiel barycentrique ($\mathcal{R}^*$) est galiléen	1
24-2-	Référentiel géocentrique ($\mathcal{R}_g$) : le centre est confondu avec le centre de la terre et les axes sont dirigés vers 3 étoiles supposées fixes.	0.5
24-3-	$\frac{m_s}{M_T} \ll 1 \Rightarrow$ le barycentre du système {terre+satellite} se confond pratiquement avec le centre de la terre.	0.5
25-	$\vec{F} = -G \frac{M_T m_s}{(R_T + h)^2} \vec{u}_r = -m_s \frac{v^2}{(R_T + h)} \vec{u}_r \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T + h}}$	1
26-1-	$T = 2\pi \frac{(R_T + h)}{v} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{GM_T}}$	1
26-2-	$T^2 = 4\pi^2 \frac{r^3}{GM_T} \Rightarrow \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM_T}$, dans le cas des planètes en mouvement elliptique autour du soleil : $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_s}$ (3 ^{ème} loi de Kepler), avec a : demi-grand axe de l'ellipse, M_s : masse du soleil	1
27-1-	TMC : $\frac{d\vec{\sigma}_{O_{\mathcal{R}_g}}}{dt} = O\vec{M} \wedge \vec{F} = \vec{0} \Rightarrow \vec{\sigma}_{O_{\mathcal{R}_g}}$ se conserve TEM : $\left. \frac{dE_m}{dt} \right _{\mathcal{R}_g} = P_{nc} = 0 \Rightarrow E_m$ se conserve	0.5 + 0.5
27-2-	$\vec{\sigma}_{O_{\mathcal{R}_g}} = O\vec{M}_0 \wedge m_s \vec{v}_{\mathcal{R}_g}(M_0)$: le mouvement du satellite est plan. Le plan du mouvement est orthogonal à $\vec{\sigma}_{O_{\mathcal{R}_g}}$. $\vec{\sigma}_{O_{\mathcal{R}_g}} = O\vec{M} \wedge m_s \vec{v}_{\mathcal{R}_g}(M) = m_s r^2 \dot{\theta} \vec{u}_z \Rightarrow r^2 \dot{\theta} = C$: loi des aires	0.5 + 0.5
28-	$v = 7,45 \cdot 10^3 m.s^{-1} = 7,45 km.s^{-1}$ $\sigma_{O_{\mathcal{R}_g}} = m_s (R_T + h) v = 10,73 \cdot 10^{13} kgm^2.s^{-1}$ $E_m = -G \frac{M_T m_s}{2(R_T + h)} = -5,56 \cdot 10^{10} J$	0.5 + 0.75 + 0.75

Partie 4 (28 / 80) :		
29-1-	Soit q la charge du porteur, $\vec{F}_{Lor} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$	0.5
29-2-	$\frac{\ \vec{F}_m\ }{\ \vec{F}_e\ } = \frac{\ \vec{v}\ B}{E} < \frac{\ \vec{v}\ }{c} \ll 1 \Rightarrow$ la contribution de $\vec{F}_m$ à la force de Lorentz est négligeable devant celle de $\vec{F}_e$.	0.5
30-	Application de la RFD : • Un électron : $m_e \frac{d\vec{v}_e}{dt} = -e \vec{E}$ • Un ion positif : $m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = e \vec{E}$	0.5 + 0.5
31-	En régime établi : $\frac{d\vec{v}}{dt} \approx \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = j\omega \vec{v}$, d'où : $\vec{v}_e = j \frac{e}{m_e \omega} \vec{E}$ $\vec{v}_p = -j \frac{e}{m_p \omega} \vec{E}$	0.5 + 0.5
32-	$\vec{J} = Ne \vec{v}_p - Ne \vec{v}_e = -j \frac{Ne^2}{\omega m_e} \left(1 + \frac{m_e}{m_p}\right) \vec{E}$	0.75
33-	$\frac{m_e}{m_p} = 5,45 \cdot 10^{-4} \ll 1 \Rightarrow \vec{J} = -j \frac{Ne^2}{\omega m_e} \vec{E}$	0.5+0.5
34-	$\text{div} \vec{E} = 0$; $\text{div} \vec{B} = 0$; $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$; $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	1
35-	$\text{div} \vec{E} = 0 \Rightarrow j\vec{k} \cdot \vec{E} = 0$; $\text{div} \vec{B} = 0 \Rightarrow j\vec{k} \cdot \vec{B} = 0$; $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \Rightarrow \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega} = \vec{B}$ $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \Rightarrow \vec{k} \wedge \vec{B} = \left(\frac{\mu_0 Ne^2}{\omega m_e} - \frac{\omega}{c^2}\right) \vec{E}$ L'onde possède la structure d'une onde plane TEM	1 + 0.5
36-	$\Delta \vec{E} = \frac{1}{c^2} \left(1 - \frac{Ne^2}{m_e \epsilon_0 \omega^2}\right) \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$ (démonstration)	1.25
37-	$\Delta \vec{E} = (-jk)^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right) (j\omega)^2 \vec{E} \Rightarrow k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right) = \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{c^2}$: relation de dispersion, avec $\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m_e \epsilon_0}$.	1.25
38-	$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{N}{\epsilon_0 m_e}}$; A.N. : $f_p = 4 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 4 \text{ MHz}$	0.75
39-	Propagation sans atténuation si k est réel $\Rightarrow k^2 > 0 \Rightarrow \omega > \omega_p$, soit $f > f_p \Rightarrow$ l'ionosphère se comporte comme un filtre passe-haut pour les ondes électromagnétiques.	0.75
40-	Pour $\omega > \omega_p$: $k = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}$	0.75

41-	On pose, $k_0 = \frac{\omega}{c}$ et $n(\omega) = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}$, $\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - k_0 n(\omega) z) \vec{u}_x$; $\vec{B} = \frac{n(\omega)}{c} E_0 \cos(\omega t - k_0 n(\omega) z) \vec{u}_y$	0.5 + 0.75
42-1-	Vitesse de phase : $v_\phi = \frac{\omega}{k} \Rightarrow v_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}} > c$ Vitesse de groupe : $v_g = \frac{d\omega}{dk} \Rightarrow v_g = c \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} < c$ Le plasma est un milieu dispersif puisque $v_\phi = v_\phi(\omega)$ (relation de dispersion non linéaire)	0.5 + 0.75 + 0.5
42-2-	Pour tout $\omega > \omega_p$: $v_\phi v_g = c^2$ 	1
43-	$\langle \vec{\Pi} \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 n(\omega) E_0^2 \vec{u}_z = \frac{\epsilon_0 E_0^2}{2} v_g \vec{u}_z$	1
44-	$\langle u_{em} \rangle = \langle \epsilon_0 \frac{E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \rangle = \frac{\epsilon_0 E_0^2}{4} \left(2 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)$; $\langle e_c \rangle = N \langle \frac{1}{2} m_e v_e^2 \rangle = \frac{\epsilon_0 E_0^2 \omega_p^2}{4 \omega^2}$	1 + 1
45-	$\langle u \rangle = \langle u_{em} + e_c \rangle = \frac{\epsilon_0 E_0^2}{2}$; On voit que : $\langle \vec{\Pi} \rangle = \langle u \rangle v_g \vec{u}_z$, d'où la vitesse de groupe n'est autre que la vitesse de propagation de l'énergie .	0.5 + 0.5
46-	$n(\omega) = \frac{c}{v_\phi} = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}$ A.N. $n = 0,8$	0.5 + 0.5
47-	$\vec{B}_i(M, t) = \frac{E_0}{c} \exp j(\omega t - k_0 z) \vec{u}_y$, $\vec{B}_r(M, t) = -\frac{E_{0r}}{c} \exp j(\omega t + k_0 z) \vec{u}_y = -\frac{r E_0}{c} \exp j(\omega t + k_0 z) \vec{u}_y$ $\vec{B}_t(M, t) = \frac{n}{c} E_{0t} \exp j(\omega t - kz) \vec{u}_y = \frac{n}{c} \frac{t}{c} E_0 \exp j(\omega t - kz) \vec{u}_y$	0.5 + 0.5 + 0.5

48-	Continuité des composantes tangentielle des champs : $1 + \underline{r} = \underline{t}$ et $1 - \underline{r} = \underline{n} \underline{t}$ On déduit que : $\underline{t} = \frac{2}{1 + \underline{n}}$; $\underline{r} = \frac{1 - \underline{n}}{1 + \underline{n}}$	0.5 + 0.5
49-	En $z = 0$, $\ \langle \vec{\Pi}_i \rangle \ = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2$, $\ \langle \vec{\Pi}_r \rangle \ = \frac{1}{2} \underline{r} ^2 \epsilon_0 c E_0^2$, $\ \langle \vec{\Pi}_t \rangle \ = \frac{1}{2} \underline{t} ^2 \epsilon_0 c E_0^2 n$	0.75 + 0.75 + 0.75
50-	$R = \underline{r} ^2$, $T = \underline{t} ^2 n \Rightarrow R = \left(\frac{1 - n}{1 + n} \right)^2$ et $T = \frac{4n}{(1 + n)^2}$ Si $\omega \gg \omega_p$: $n \rightarrow 1 \Rightarrow R \rightarrow 0$ et $T \rightarrow 1$	0.75 + 0.5
51-	$R + T = 1$: traduit la conservation de l'énergie	0.5
52-	Si $\omega < \omega_p$: $R = 1$ et $T = 0 \Rightarrow$ réflexion totale de l'onde incidente en $z = 0$	0.5
Partie 5 (14 / 80) :		
53-1-	$\lambda = \frac{c}{f}$, $f_1 = 20 \text{ Hz} \Rightarrow \lambda_1 = 1500 \text{ km}$; $f_2 = 20 \text{ kHz} \Rightarrow \lambda_2 = 15 \text{ km}$ Une antenne demi-onde aura une taille comprise entre 7,5 km et 7500 km, ceci est impossible à réaliser en pratique.	1 + 0.5
53-2-	On utilise une porteuse de haute fréquence, c'est-à-dire de longueur d'onde beaucoup plus petite, on aura des antennes demi-onde réalisables.	0.75
54-1-	$\underline{H}_1(j\omega) = -\frac{R_1}{R_1} = -1$	0.75
54-2-	C'est un montage inverseur	0.5
55-	$\underline{H}_2(j\omega) = \frac{1 - jRC\omega}{1 + jRC\omega}$	1.5
56-1-	$\underline{H}(j\omega) = -\frac{1 - jRC\omega}{1 + jRC\omega} = -\frac{1 - jx}{1 + jx}$; $x = RC\omega$	0.75
56-2-	Diagramme de Bode : $G_{dB} = 20 \log H = 0 \quad \forall \omega$ $\varphi_D = \pi - 2 \arctan(x)$ $x \ll 1$: $\varphi_D \rightarrow \pi$ $x \gg 1$: $\varphi_D \rightarrow 0$ $x = 1$: $\varphi_D = \frac{\pi}{2}$ 	0.75 + 1.75
56-3-	Le montage est un déphaseur	0.5

57-	$v_s(t) = k u_s u_1 + u_c = U_0 \cos(\omega_{port} t) + k U_m \cos(\omega_m t) \cdot u_s$ On veut avoir $v_s(t) = U_0 \cos[\omega_{port} t + m \cos(\omega_m t)]$, soit en développant $(m = k U_m \ll 1) : v_s(t) = U_0 \cos(\omega_{port} t) - m U_0 \cos(\omega_m t) \sin(\omega_{port} t)$ Par comparaison : $u_s(t) = -U_0 \sin[\omega_{port} t] = U_0 \cos[\omega_{port} t + \frac{\pi}{2}]$	0.5 + 1 + 0.5
58-	$u_s(t) = H(j\omega) U_0 \cos[\omega_{port} t + \varphi_D] = U_0 \cos[\omega_{port} t + \varphi_D]$, il faut que : $\varphi_D = \frac{\pi}{2} \Rightarrow RC = \frac{1}{\omega_{port}}$	0.5 + 0.5
59-	$u_0(t) = -\frac{U_m \omega_m}{\alpha} \sin(\omega_m t)$	0.5
60-1-	$\Omega(t) = \omega_{port} - m \omega_m \sin(\omega_m t)$	0.5
60-2-	$\Omega(t) = \omega_{port} + k \alpha \cdot u_0(t)$	0.5
60-3-	La fréquence de la porteuse est modulée proportionnellement à $u_0(t)$: c'est la modulation de fréquence.	0.75