ES4 : MODULATION

I - Principe

1 - Pourquoi moduler ?

signal utile (contient l'info) $s_m(t)$ $\xrightarrow{\text{"module"}}$ signal porteur $s_p(t)$ "la porteuse"

$f_p \gg f_m$

2 - Ordre de grandeur

AM : GO 150 kHz → 350 kHz
PO ~ 1 MHz

FM : 87 MHz → 108 MHz

France Inter GO 162 kHz → $\lambda = 1850$ m

Téléphonie mobile : 900 MHz → 2 GHz

WiFi : 2,4 GHz (ϕn)

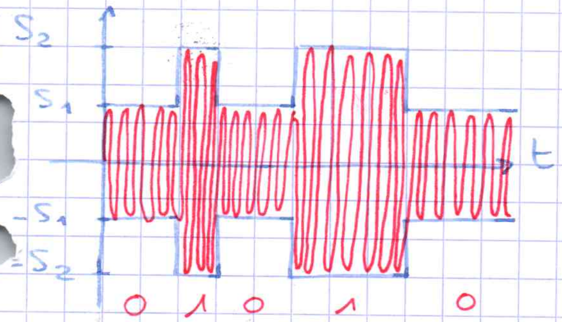
3 - 3 types de modulation

ex : codage d'un signal binaire par modulation d'un signal analogique
↳ porteuse
$s_p(t) = A_p \cos(\omega_p t + \varphi_p)$

(α) Modulat° d'amplitude = fonction affine du signal b

→ si $b = 0$, $S_1 = s_m$
→ si $b = 1$, $S_2 = s_m$ } $s_m = S_1 + b(S_2 - S_1)$

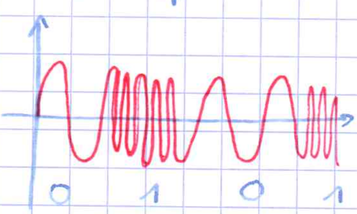
$s(t) = [S_1 + b(S_2 - S_1)] \cos(\omega_p t + \varphi_p)$



(β) Modulat° de fréq.

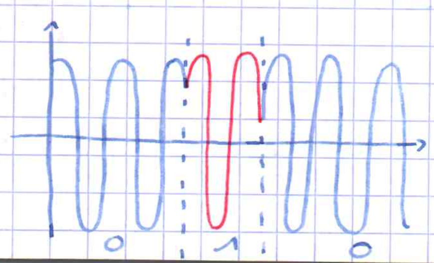
→ si $b = 0$: $f = f_p + F_1$
→ si $b = 1$: $f = f_p + F_2$

→ $f = f_p + F_1 + b(F_2 - F_1)$

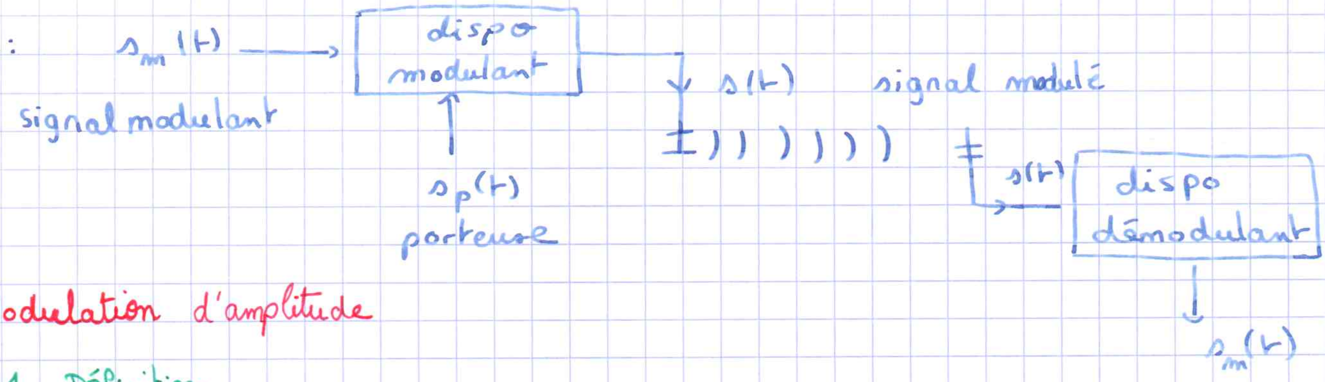


(γ) Si $b = 0$: $\varphi_p = 0$
Si $b = 1$: $\varphi_p = \pi$ } $\varphi_p = b.\pi$

↳ signal modulé : $s(t) = A_p \cos(2\pi f_p t + b\pi)$



Bilan :

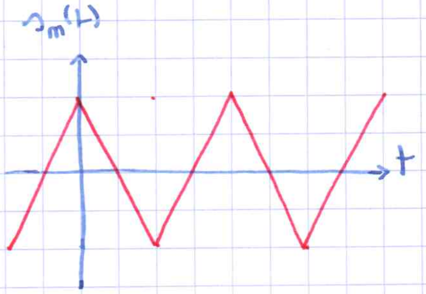


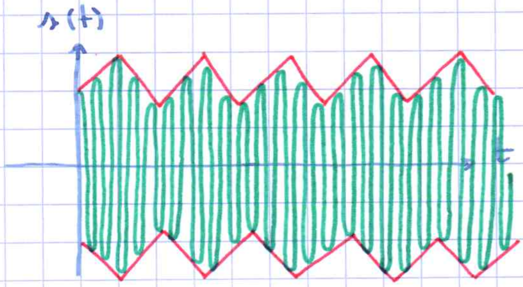
II – Modulation d'amplitude

1. Définition

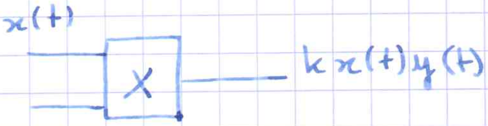
Principe : multiplier la porteuse $s_p(t)$ par 1 signal "amplitude" $A(t)$, fonction affine de $s_m(t)$.

$$s(t) = A_0 \left(1 + K s_m(t)\right) \times \cos(\omega_p t + \varphi_p)$$





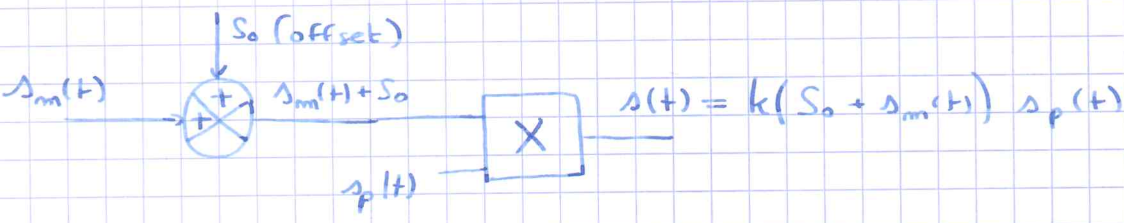
2. Réalisation pratique : multiplicateur analogique



$k = 0{,}1\ V^{-1}$

Schéma bloc fonctionnel de la modulation d'amplitude

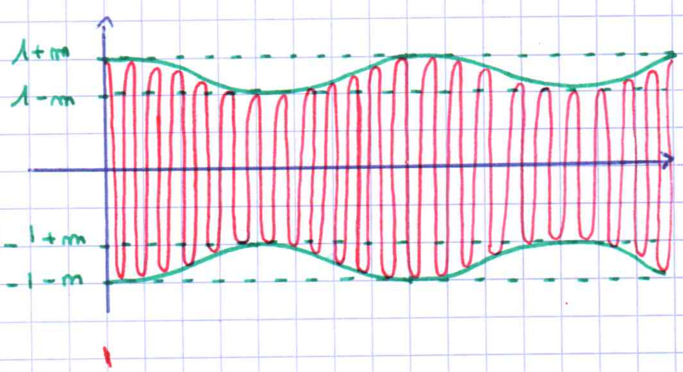
Hyp : $s_m(t) = S_m \cos(\omega_m t)$ et $s_p(t) = S_p \cos(\omega_p t)$



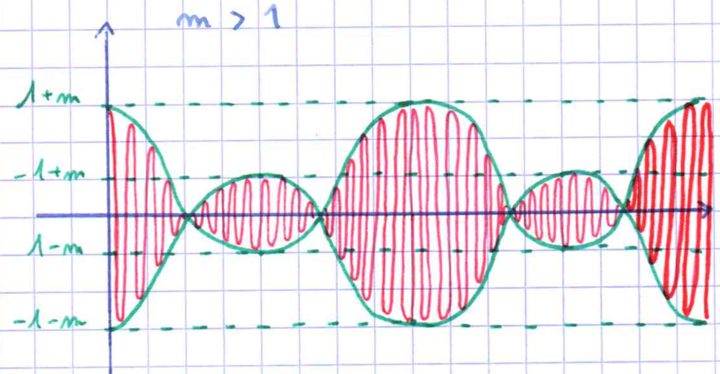
$$s(t) = k(S_0 + S_m \cos \omega_m t) \cdot S_p \cos(\omega_p t)$$

$$= k S_0 S_p (1 + m \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_p t) \qquad m = \frac{S_m}{S_0} \text{ taux de modulation}$$

$m < 1$



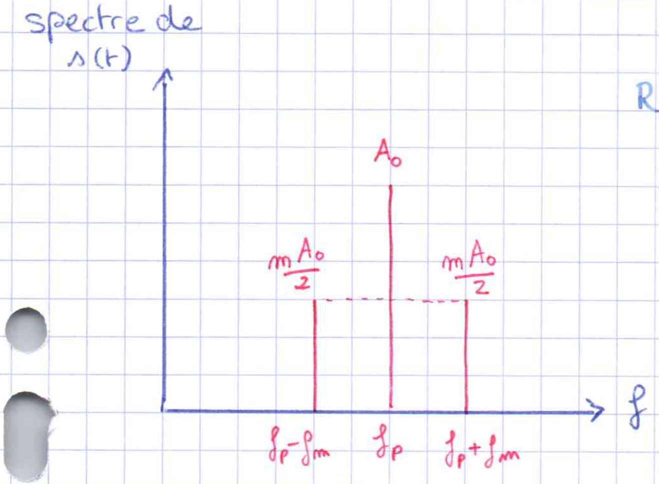
$m > 1$



3. Spectre du signal modulé. Conséquence pratique

$$s(t) = A_0 \cos \omega_p t + m A_0 \underbrace{\cos \omega_m t . \cos \omega_p t}_{\frac{1}{2}\left(\cos(\omega_p+\omega_m)t + \cos(\omega_p-\omega_m)t\right)}$$

$$s(t) = A_0 \left[\cos \omega_p t + \frac{m}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t \right]$$



Rem : la porteuse (ne contient pas d'info) a l'ampl. la + élevée

$\Rightarrow$ transporte l'essentiel de la puissance émise

<u>Idée</u> modulat° sans porteuse

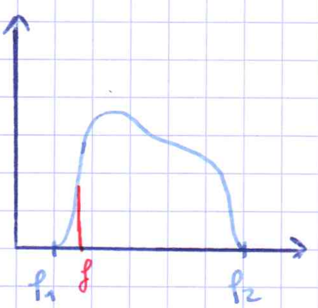
$\rightarrow$ on coupe l'offset $S_0 = 0$

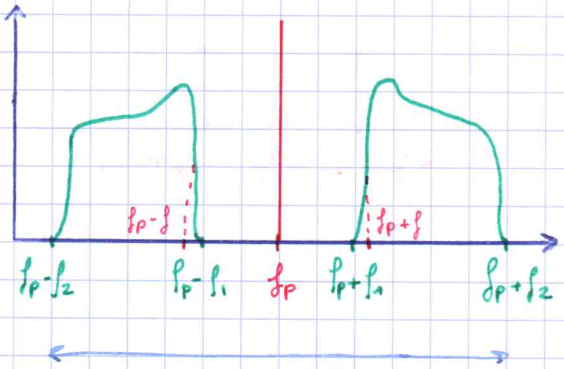
$s(t) = k S_m S_p \cos \omega_m t \cos \omega_p t$

$\hookrightarrow f_p - f_m$

$\hookrightarrow f_p + f_m$

En pratique : signal modulant polychromatique





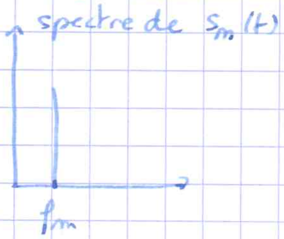
$\Delta f = 2 f_2$

$\Rightarrow$ l'écart entre 2 porteuses + proches voisines doivent être > à 9 kHz

III - Démodulation d'amplitude

1 - Nécessité d'opération non linéaire

démod



Comme f_m est absente du spectre de $s(t)$

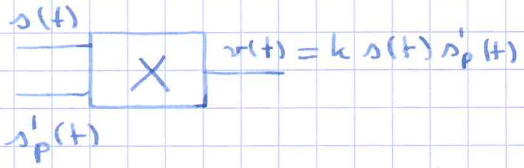
$\Downarrow$

Opé NL pour le faire apparaître

2 - Démodulation par détection synchrone

Etape 1 : Opé NL : Multiplication du signal modulé $s(t)$ par un signal "jumeau" $s'_p(t)$ de la porteuse $s'_p(t) = A'_p \cos(\omega_p t + \phi)$

porteuse reconstituée ou oscillateur — même ω_p que la porteuse

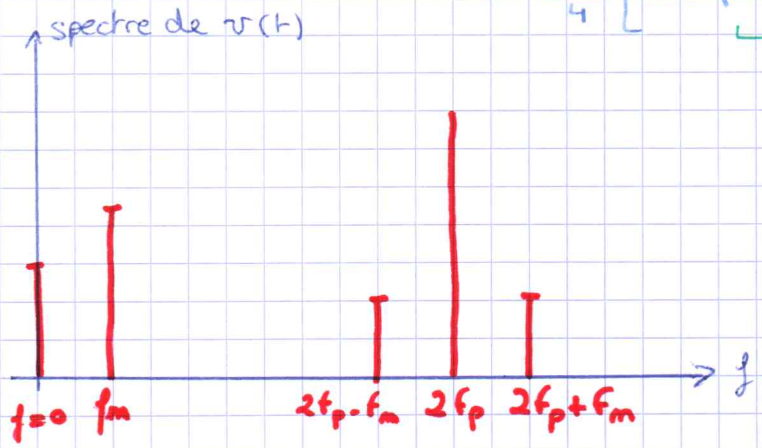


$$v(t) = k A_0 A'_p \left[\cos(\omega_p t) + \frac{m}{2}\cos(\omega_p - \omega_m)t + \frac{m}{2}\cos(\omega_p + \omega_m)t\right]\cos(\omega_p t + \phi)$$

$$v(t) = \frac{V_0}{2}\left[\cos(2\omega_p t + \phi) + \cos\phi\right] + \frac{mV_0}{4}\left[\cos((2\omega_p - \omega_m)t + \phi) + \cos(\omega_m t + \phi)\right] + \frac{mV_0}{4}\left[\cos((2\omega_p + \omega_m)t + \phi) + \cos(\omega_m t - \phi)\right]$$

$$v(t) = \underbrace{\frac{V_0}{2}\cos\phi}_{0} + \underbrace{\frac{mV_0}{2}\cos\phi \cdot \cos(\omega_m t)}_{f_m} + \overbrace{\frac{V_0}{2}\cos(2\omega_p t + \phi)}^{2f_p} + \frac{mV_0}{4}\left[\underbrace{\cos((2\omega_p - \omega_m)t + \phi)}_{2f_p - f_m} + \underbrace{\cos((2\omega_p + \omega_m)t + \phi)}_{2f_p + f_m}\right]$$

f :



Etape 2 : Linéaire : filtrage

- passe bas : f_{cb} tq $f_m \lesssim f_{cb} \ll 2f_p$
- passe-haut : f_{ch} tq $f_{ch} \ll f_m$

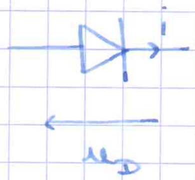
On récupère

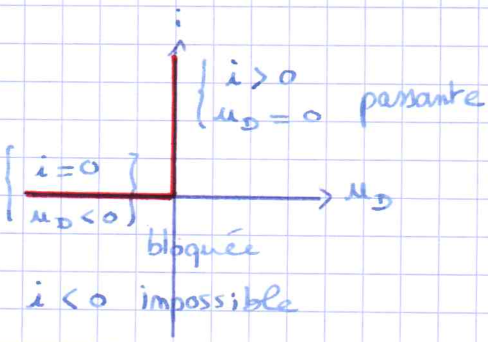
$$s_d(t) = \frac{mV_0}{2}\cos\phi\cos(\omega_m t)$$
$$= \frac{k^2}{2}A'_p S_p S_m \cos\phi \cos(\omega_m t)$$

$\Rightarrow$ il faut $|\phi| \ll \frac{\pi}{2}$ asservissem^t de $s'_p(t)$ en fréq. et en phase / à la porteuse

3. Démodulation d'amplitude par détection de crête / d'enveloppe

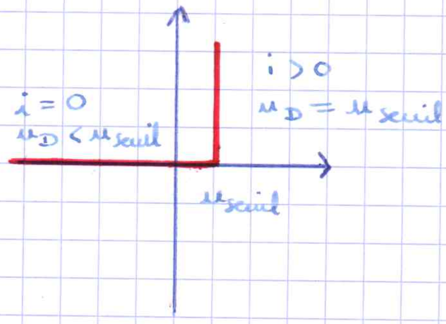
① Diode idéale



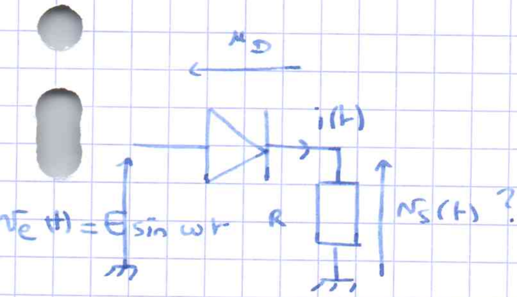


unidirectionnel

② Diode avec seuil



$u_{seuil} \sim 0{,}6V - 0{,}7V$



* diode idéale :

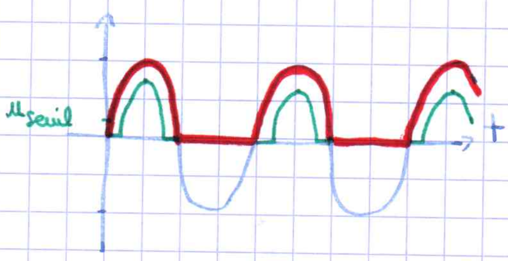
→ lorsque $v_e(t) > 0$, D passante

⇒ $v_s(t) = v_e > 0$

⇒ $i > 0$: OK (cohérent)

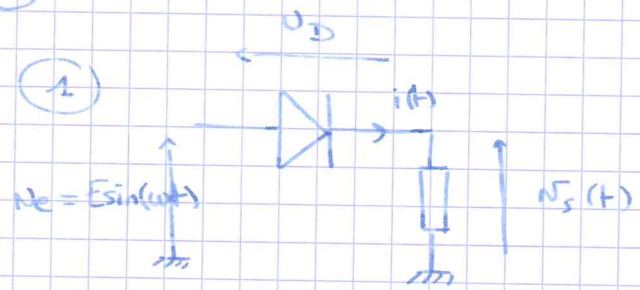
→ $v_e < 0$ or $v_s \geq 0$ ($i \geq 0$)

⇒ $u_D = v_e - v_s < 0$ ⇒ bloquée ⟺ $i = 0$



redresseur monoalternance

Exercice 1 TD : ①



③ Diode idéale

(i) $v_e > 0$ → $\underline{H_1}$: D. bloquée : $i = 0 \iff v_s = 0$

⇒ $u_D = v_e > 0$ impossible

→ $\underline{H_2}$: D. passante : $i > 0 \iff v_s = Ri > 0$ et $v_e = v_s > 0$

⇒ cohérent

(ii) $v_e < 0$ → $\underline{H_1}$: D. passante : $i > 0 \Rightarrow v_s > 0$ donc $v_e - v_s = u_D < 0$

⇒ diode bloquée, absurde

→ $\underline{H_2}$: D. bloquée : $i = 0 \Rightarrow v_s = 0$, $u_D = v_e < 0$ cohérent.

ccl :

↳ redressement monoalternance parfait

② Avec seuil V_{seuil} :

(i) $v_e > V_{seuil}$ → $\underline{H_1}$: D. bloquée : $i = 0 \Rightarrow v_s = 0$ donc u_D

donc $u_D = v_e > V_{seuil}$ impossible

→ $\underline{H_2}$: D. passante : $i > 0$ donc $v_s = Ri > 0$ donc $u_D = v_e - v_s = V_{seuil}$

$\Rightarrow v_e > V_{seuil}$, cohérent

. CCl : $v_e > V_{seuil} \Leftrightarrow$ D. passante

(ii) $v_e < V_{seuil}$ → $\underline{H_1}$: D. bloquée : $i = 0 \Rightarrow v_s = 0$

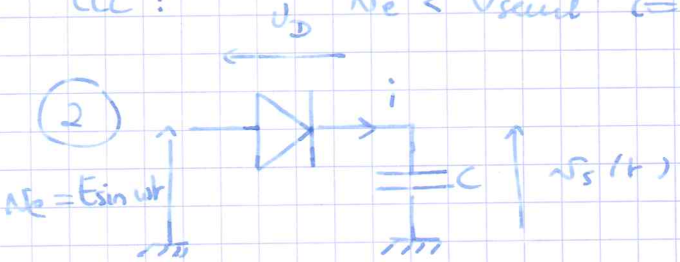
donc $u_D = v_e < V_{seuil}$ cohérent

→ $\underline{H_2}$: D. passante . $i > 0$ donc $v_s > 0$

donc $u_D = v_e - v_s = V_{seuil} \Rightarrow v_e > V_{seuil}$ absurde

CCl : $v_e < V_{seuil} \Leftrightarrow$ D. bloquée

(2)



Hyp : $v_s(0) = 0$

① Diode idéale : $t = 0^+$ $\left(0 < t < \frac{T}{4}\right)$

→ $\underline{H_1}$: D. bloquée $i(0^+) = 0$; $i(t) = C\dfrac{dv_s}{dt}$

i.e. $\dfrac{dv_s(0^+)}{dt} = 0 \Rightarrow v_s(0^+) = cste = 0$

$\Rightarrow u_D(0^+) = v_e(0^+) - v_s(0^+) > 0$ impossible, Hyp fausse

→ $\underline{H_2}$: D. passante : $i > 0$ et $v_e = v_s > 0$ et $i = C\dfrac{dv_s}{dt} > 0$

↳ cohérent $= C\dfrac{dv_e}{dt} > 0$

D. passante tant que v_s, i.e. v_e ↗

* $t > \frac{T}{4}$: H_1 → $\underline{H_1}$: D. passante

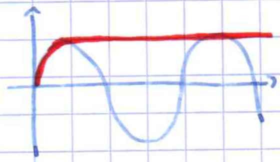
$v_e = v_s$ et $i = \dfrac{C\,dv_s}{dt} > 0$

⇓ absurde

$i = C\dfrac{dv_e}{dt} < 0$

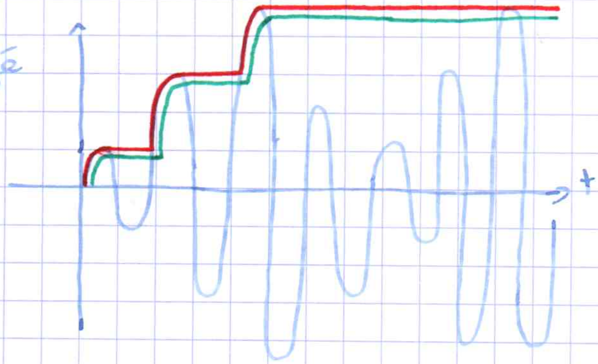
→ $\underline{H_2}$: D. bloquée : $i = 0$ i.e. $v_s\left(t > \frac{T}{4}\right) = cste = E$

$u_D = v_e - v_s < 0$: OK

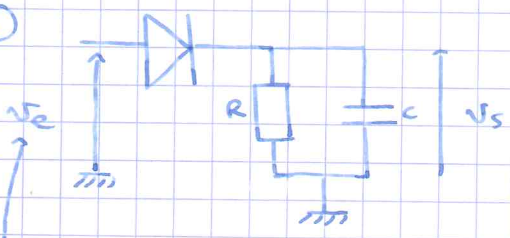


③

T=0
C déchargé



④



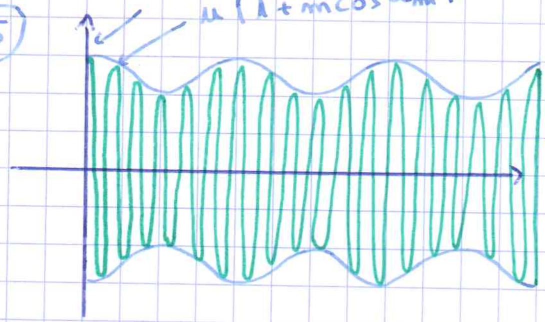
modulé en ampl.

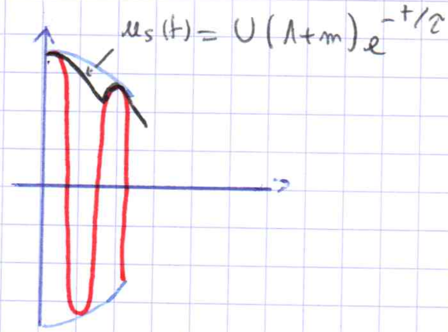
Lorsque D bloquée, décharge de C à travers R.

$(\tau = RC)$

Quasi pas de décharge sur T_p si $RC \gg T_p$
i.e. $RC \gg \frac{1}{\omega_p}$

⑤





AN : $\omega_m T_p \ll 1$ et $T_p \ll \tau$

2e crête détectée si $u_s(T_p) \leq U(1+m\cos\omega_m T_p)$

$$U(1+m)e^{-T_p/\tau} \leq U(1+m\cos\omega_m T_p)$$

$$U(1+m)\left(1-\frac{T_p}{\tau}\right) \leq U\left(1+m\left(1-\frac{\omega_m^2 T_p^2}{2}\right)\right)$$

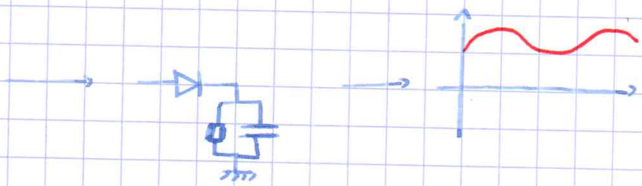
$$+(1+m)\left(\frac{T_p}{\tau}\right) \geq +\frac{m\,\omega_m^2 T_p^2}{2}$$

$$\tau \leq \frac{2(1+m)}{m\,\omega_m^2 T_p} = \frac{1+m}{\pi m}\,\frac{\omega_p}{\omega_m^2}$$

$$\tau \lesssim \underbrace{\left(\frac{\omega_p}{\omega_m}\right)}_{\gg 1} \times \frac{1}{\omega_m}$$

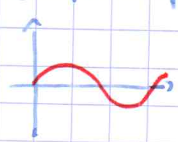
⑥ Si $t \ll \frac{1}{\omega_m}$: inutilement exigeant

Bilan : signal modulé en amp.



$$\frac{1}{\omega_p} \ll \tau \lesssim \left(\frac{\omega_p}{\omega_m}\right) \times \frac{1}{\omega_m}$$

↓ filtre passe haut



Pb : surmodulation ($m > 1$) $\rightarrow$ marche pas

$\hookrightarrow$ réservé au cas $m < 1$.