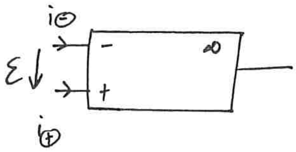
PCSI 23-24

1

DS n° 4

I Filtrage de signaux non sinusoïdaux

1. ALI idéal : $i_\oplus = 0$; $i_\ominus = 0$



Fonct^t linéaire : $\varepsilon = V_\oplus - V_\ominus = 0$

2. Un ALI est alimenté par une alimentation stationnaire symétrique stabilisée ($-15V$; $0V$; $+15V$ = 3 bornes).

3. Fil : $V_\oplus = 0$

Millman à l'entrée inverseuse : $V_\ominus \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{\underline{Z}_{éq}}\right) = \frac{\underline{u}_e}{R_1} + \frac{\underline{u}_s}{\underline{Z}_{éq}}$

avec $\underline{Z}_{éq} = R_2 // \underline{Z}_C = \frac{R_2}{1 + jR_2C\omega}$

D'où, avec $V_\oplus = V_\ominus = 0 \Rightarrow \frac{\underline{u}_s}{\underline{u}_e} = \underline{H}_1 = -\frac{\underline{Z}_{éq}}{R_1}$

$$\boxed{\underline{H}_1 = -\frac{R_2/R_1}{1 + jR_2C\omega}}$$

C'est un filtre passe-bas d'ordre 1

La forme canonique est $\underline{H} = \frac{H_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}$ donc $\boxed{H_0 = -R_2/R_1 \quad \omega_c = \frac{1}{R_2C}}$

4. En BF : $\underline{H}_1 \sim H_0$

donc $G_{dB,BF} = 20\log|H_0| = 20\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$

En HF : $\underline{H}_1 \sim \frac{H_0}{j\,\omega/\omega_c}$ donc $G_{dB,HF} = 20\log|H_0| + 20\log\left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)$

La pente est de $-20\,dB/dec$

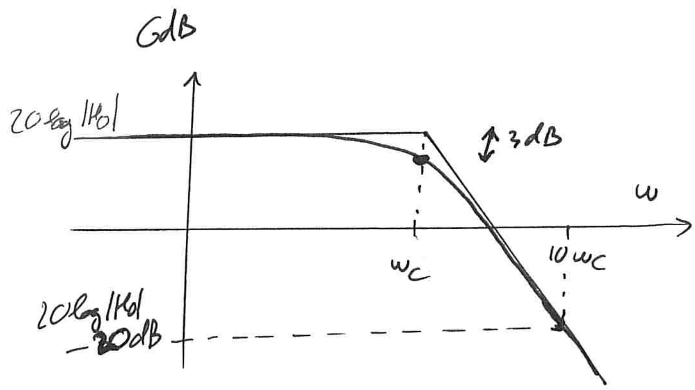
L'intersection des asymptotes se produit pour $\omega = \omega_c$ et donc

$$\boxed{I\left(\omega_c, 20\log|H_0|\right)}$$

5. $G_{dB} = 20\log\frac{|H_0|}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}}$

donc $G_{dB}(\omega_c) = 20\log\frac{|H_0|}{\sqrt{2}}$

$= 20\log|H_0| - 3dB$



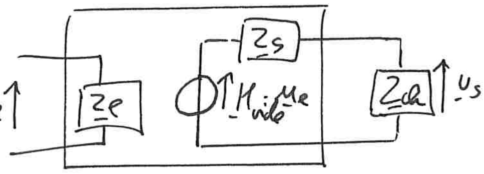
6. $\underline{Z}e = \dfrac{\underline{u}e}{\underline{i}e}$ à vide.

Loi des mailles à l'entrée : $\underline{u}_e - R_1 \underline{i}e - \varepsilon = 0$

Or $\varepsilon = 0$ donc $\dfrac{\underline{u}e}{\underline{i}e} = \boxed{\underline{Z}e_1 = R_1}$

7. L'ajout de $\underline{Z}ch$ à la sortie du filtre ne modifie pas les équations précédentes donc $\underline{u}_s$ est indépendante de $\underline{Z}ch$.

Or, ds le modèle du quadripôle :



on a : $\underline{u}_s = \underline{H}_{vide} \underline{u}_e \times \dfrac{\underline{Z}ch}{\underline{Z}_s + \underline{Z}ch}$

Cette expression dépend de $\underline{Z}ch$ sauf si $\underline{Z}_s = 0$.

D'où $\boxed{\underline{Z}_s = 0}$

8 On lit aux BF : $20 \log |H_0| = 6\,dB$ donc $\boxed{|H_0| = 10^{\frac{6}{20}} = 2}$

Le croisement des asymptotes se produit pour $\boxed{f_c = 500\,Hz.}$

c'est également la fréquence pour laquelle : $G_{dB} = 6 - 3 = 3\,dB$

9. $R_2/R_1 = 2$ et $R_2 = \dfrac{1}{2\pi f_c \cdot C}$ donc $\boxed{R_2 = 678\,\Omega}$ et $\boxed{R_1 = 339\,\Omega}$

10. On retrouve : $i_+ = i_- = 0$ et $\varepsilon = V_{\oplus} - V_{\ominus} = 0$

<u>Millman à l'entrée ⊖</u> : $V_{\ominus}(\underline{Y}_3 + \underline{Y}_5) = V_A \cdot \underline{Y}_3 + \underline{u}_s \cdot \underline{Y}_5$

<u>Millman en A</u> : $V_A(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_4) = \underline{u}e \cdot \underline{Y}_1 + V_{\ominus} \cdot \underline{Y}_3 + \underline{u}_s \cdot \underline{Y}_4$

D'où, avec $V_{\ominus} = 0$: $-\underline{u}_s \cdot \dfrac{\underline{Y}_5}{\underline{Y}_3}(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_4) = \underline{u}e\, \underline{Y}_1 + \underline{u}_s\, \underline{Y}_4$.

Soit $\underline{u}_s \left[\dfrac{\underline{Y}_5(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_4)}{\underline{Y}_3} + \underline{Y}_4\right] = -\underline{u}e \cdot \underline{Y}_1$

Final^t on obtient bien : $\underline{H}_2 = \dfrac{\underline{u}_s}{\underline{u}e} = \dfrac{-\underline{Y}_1 \cdot \underline{Y}_3}{\underline{Y}_5(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_4) + \underline{Y}_3 \underline{Y}_4}$

11. On a : $\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \dfrac{1}{R}$, $\underline{Y}_3 = \underline{Y}_4 = jC\omega$ et $\underline{Y}_5 = \dfrac{1}{10R}$.

$$\underline{H}_2 = \frac{-jC\omega/R}{\frac{1}{10R}\left(\frac{2}{R} + 2jC\omega\right) - C^2\omega^2} = \frac{-1}{\frac{1}{5} + jRC\omega + \frac{1}{5jRC\omega}} = \frac{-5}{1 + j5RC\omega + \frac{1}{jRC\omega}}$$

L'identification donne : $\begin{cases} H_0' = -5 \\ \dfrac{Q}{\omega_0} = 5RC \\ Q\omega_0 = \dfrac{1}{RC} \end{cases} \Rightarrow \boxed{\begin{cases} H_0' = -5 \\ Q = \sqrt{5} \\ \omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{5}RC} \end{cases}}$

12. BF : $\underline{H_2} \sim \dfrac{H_0' \cdot \omega}{-jQ\omega_0}$ donc $\underline{\underline{G_{dB,BF} = 20\log\dfrac{|H_0'|}{Q\omega_0} + 20\log\omega}}$

(pente de $+20$ dB/dec)

HF : $\underline{H_2} \sim \dfrac{H_0' \cdot \omega_0}{jQ\omega}$ donc $\underline{\underline{G_{dB,HF} = 20\log\dfrac{|H_0'|\omega_0}{Q} - 20\log\omega}}$

(pente de -20 dB dec^{-1})

L'intersection se produit quand $\dfrac{|H_0'|}{Q\omega_0}\omega = \dfrac{|H_0'|\omega_0}{Q\omega}$

donc pour $\omega = \omega_0$ et $G_{dB,HF}(\omega_0) = G_{dB,BF}(\omega_0) = 20\log\dfrac{|H_0'|}{Q}$

D'où $\boxed{I\left(\omega_0, 20\log\dfrac{|H_0'|}{Q}\right)}$

13. $\boxed{G_{dB} = 20\log\dfrac{|H_0'|}{\sqrt{1+Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}}$ et $\boxed{G_{dB}(\omega_0) = 20\log|H_0'|}$

14. On lit : $I(500\ \text{Hz}, -14\ \text{dB})$ en traçant les 2 asymptotes

On a également $G_{dB}(500\ \text{Hz}) = 6$ dB.

D'où $\boxed{|H_0'| = 10^{\frac{6}{20}} = 2}$ et $\dfrac{|H_0'|}{Q} = 10^{-\frac{14}{20}} = 0{,}2$

Donc $\boxed{Q = 10}$

15. C'est le m̂ type de montage que le filtre n°1 avec

$\underline{Z_1} = R + (9R \,/\!/\, \underline{Z_C})$ et $\underline{Z_2} = 10R$

Donc $\underline{H_3} = -\dfrac{\underline{Z_2}}{\underline{Z_1}} = \dfrac{-10R}{R + \dfrac{9R}{1+j9RC\omega}} = \dfrac{-10R(1+j9RC\omega)}{R + j9RC\omega + 9R}$

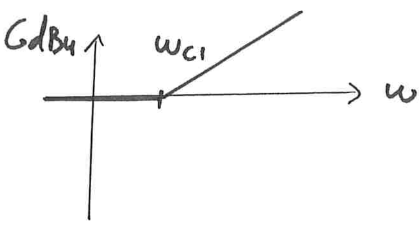
$= -\dfrac{1+j9RC\omega}{1+j\frac{9}{10}RC\omega} \Rightarrow \boxed{\begin{array}{l} \omega_{c1} = \dfrac{1}{9RC} \\ \omega_{c2} = \dfrac{10}{9RC} = 10\,\omega_{c1} \end{array}}$

16. $\underline{H}_3 = \underline{H}_4 \times \underline{H}_5$ donc $GdB_3 = GdB_4 + GdB_5$

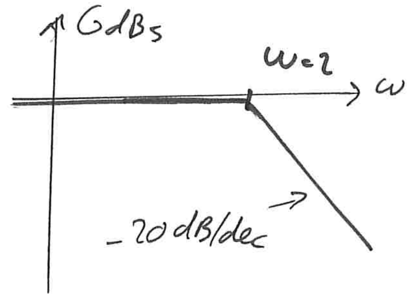
Or $GdB_4 = 20 \log \sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_{c1}}\right)^2}$ $\xrightarrow{BF}$ $GdB_{,BF} = 0\,dB$

$\xrightarrow{HF}$ $GdB_{,HF} = 20 \log \frac{\omega}{\omega_{c1}}$

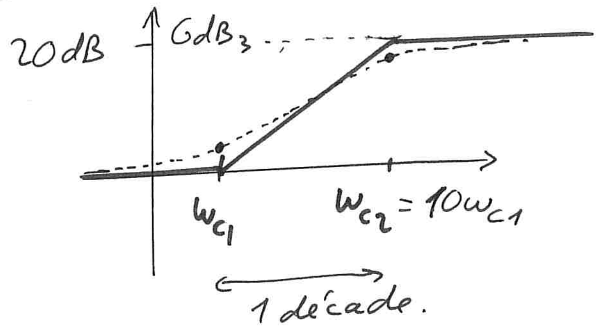
(pente $+20\,dB/dec$)



Et GdB_5 = passe bas d'ordre 1 :



La somme de ces 2 diagrammes :



$GdB(\omega_{c1}) = 3\,dB$

$GdB(\omega_{c2}) = 17\,dB$

17. On lit $GdB_4 = 3\,dB$ pour $f_{c1} = 500\,Hz$ et $GdB_4 = 17\,dB$ pour $f_{c2} = 5\,kHz$:

$$\boxed{f_{c1} = 500\,Hz \; ; \; f_{c2} = 5000\,Hz}$$

18. Le théorème de Parseval donne $U_{eff}^2 = U_0^2 + \sum \left(\frac{U_k}{\sqrt{2}}\right)^2$

Or ici $U_0 = U_k = 5\,V$

D'où : $U_{eff}^2 = 5^2 + 3 \times \left(\frac{5}{\sqrt{2}}\right)^2 = 5^2\left(1+\frac{3}{2}\right) \Rightarrow \boxed{U_{eff} = 7{,}9\,V}$

Les harmoniques sont de moyenne nulle donc $\boxed{U_0 = 5\,V}$

(il ne reste que la composante continue).

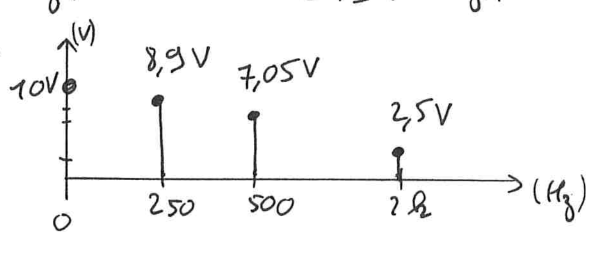
19. Filtre n°1 : $GdB_{,BF} = 6\,dB$ donc $|\underline{H}_{BF}| = 2$

$GdB\,(250\,Hz) = 5\,dB$ donc $|\underline{H}\,(250\,Hz)| = 10^{5/20} = 1{,}78$.

$GdB\,(500\,Hz) = 3\,dB$ donc $|\underline{H}\,(500\,Hz)| = 10^{3/20} = 1{,}41$

$GdB\,(2\,kHz) = -6\,dB$ donc $|\underline{H}\,(2\,kHz)| = 10^{-6/20} = 0{,}50$

D'où le spectre de sortie :



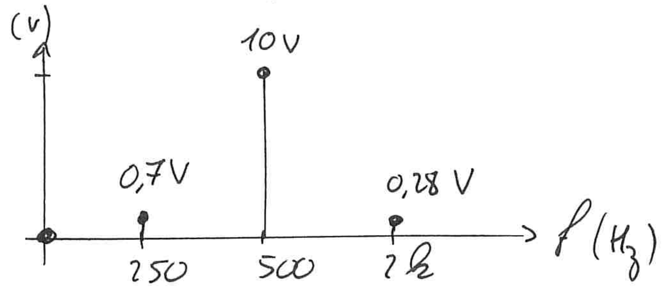
20. Filtre 2 : . $G_{dB,BF} = -\infty \rightarrow |\underline{H}_{BF}| = 0$

. $G_{dB}(250\,Hz) = -17\,dB \rightarrow |\underline{H}(250\,Hz)| = 0{,}14$

. $G_{dB}(500\,Hz) = 6\,dB \rightarrow |\underline{H}(500\,Hz)| = 2{,}0$

. $G_{dB}(2\,kHz) = -25\,dB \rightarrow |\underline{H}(2\,kHz)| = 0{,}056$.

D'où le spectre de sortie :



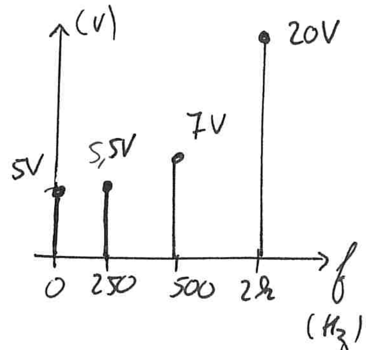
Le signal de sortie est quasiment sinusoïdal à 500 Hz.

21. Filtre 3 : $G_{dB,BF} = 0\,dB \rightarrow |\underline{H}_{BF}| = 1$

$G_{dB}(250\,Hz) = 1\,dB \rightarrow |\underline{H}(250\,Hz)| = 1{,}1$

$G_{dB}(500\,Hz) = 3\,dB \rightarrow |\underline{H}(500\,Hz)| = 1{,}4$

$G_{dB}(2\,kHz) = 12\,dB \rightarrow |\underline{H}(2\,kHz)| = 4{,}0$



22. Pour que le spot repasse sur la même trace à chaque balayage de l'écran, il faut que la période de balayage | d'affichage soit un multiple de la période du signal.

$$\boxed{T_{affichage} = n\,T_{signal}.}$$

Le seuil de déclenchement est fixé par le bouton 'Trigger' ('gâchette' in G.B.)

23. $T_e = 2\,ms \Rightarrow \boxed{f_e = 500\,Hz}$

$$\boxed{\langle u_e \rangle = \frac{1}{2}(u_{Max} + u_{min}) = 1{,}5\,V}$$

$$\boxed{u_{em} = \frac{1}{2}(u_{Max} - u_{min}) = 2{,}5\,V}$$

⚠ Ne pas confondre les 2 formules.

24. $T_s = 2\,ms \Rightarrow \boxed{f_s = 500\,Hz}$ $\boxed{\langle u_s \rangle = 0}$ $\boxed{u_{sm} = 4{,}0\,V}$

25. Le signal d'entrée comporte une composante continue qui est coupée, un fondamental d'amplitude $\frac{8E}{\pi^2} = 20\,V$ et des harmoniques d'amplitude $\frac{8E}{\pi^2} \times \frac{1}{9}$ à $3f_e$

$\frac{8E}{\pi^2} \times \frac{1}{25}$ à $5f_e$ ... négligeable

Comme seul le fondamental est transmis, il s'agit du filtre n°2 (passe bande à $f_0 = 500\,Hz$).

On obtient bien une amplitude de sortie de :

$$\frac{8E}{\pi^2} \times 10^{\frac{6}{20}} = 4{,}0\,V$$

[La phase n'est pas étudié mais $H_0' < 0$ donc à la résonance on a : $\arg(\underline{H}) = \pi$. On observe bien que u_e et u_s sont en opposition de phase.]

25. <u>entrée</u> : $f_e = 167\,Hz$ $\langle u_e \rangle = 1{,}5\,V$ et $u_{em} = 2{,}5\,V$

<u>sortie</u> : $\underline{f_S = 500\,Hz = 3f_e}$ $\langle u_S \rangle = 0$ et $u_{Sm} \simeq 0{,}4\,V$.

Il s'agit du filtre n°2 (passe-bande) qui coupe la composante continue et le fondamental mais amplifie l'harmonique de rang 3. Les harmoniques suivantes sont coupées également.

On a bien : $u_{Sm} = \frac{8E}{\pi^2} \times \frac{1}{9} \times 10^{\frac{6}{20}} = 0{,}44\,V$

[Pour le fondamental on a : $|\underline{H}(167\,Hz)| = 10^{-\frac{24}{20}} = 0{,}063$ donc son amplitude en sortie est $\frac{8E}{\pi^2} \times 0{,}063 = 0{,}13\,V$. ce qui explique les légères variations de u_s].

27. <u>entrée</u> : carré à 1 kHz d'amplitude 2,5 V

<u>sortie</u> : triangle à 1 kHz d'amplitude 2,2 V.

Il y a intégration du signal d'entrée.

C'est le filtre n°1 qui est intégrateur pour des signaux dont le fondamental et les harmoniques sont sur la pente à $-20\,dB/dec$. ($G_{dB_1}(1\,kHz) = -1\,dB \Rightarrow |\underline{H}| = 0{,}9$ et $u_{sm} \simeq 2{,}2\,V$)

<u>R</u> : le filtre passe-bande se comporte également en intégrateur pour $f \geq 1\,kHz$ mais le gain est alors bcp plus faible ($G_{dB} \sim -17\,dB$) et le signal de sortie aurait une amplitude bcp + faible.

[R_{bis} : Sur l'asymptote HF du filtre 1, $\arg(\underline{H}) \simeq \frac{\pi}{2}$ donc u_S est en <u>quadrature avance</u> / u_e.]

II. Trajectoire des plombs d'une cartouche

1. Syst : un plomb Réf : terrestre considéré galiléen

Forces : $m\vec{g}$ $\vec{F}_D = -\frac{1}{2}\rho_{air} S C_D v \vec{v}$.

PFD : $\boxed{m\frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} - \frac{1}{2}\rho_{air} S C_D v \vec{v}}$

A. Trajectoire gravitaire.

2. $\|m\vec{g}\| \gg \|\vec{F}_D\| \Leftrightarrow mg \gg \frac{1}{2}\rho_{air} S C_D v^2$

Donc il faudrait : $v \ll \sqrt{\frac{2mg}{\rho_{air}\pi R^2 C_D}} = v_\infty$

A l'instant initial cela donne $\boxed{v_0 \ll v_\infty.}$

3. C'est une chute libre !

$m\vec{a} = m\vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \vec{g} \Rightarrow \vec{v} = \vec{g}t + \vec{v}_0 \Rightarrow \vec{OM} = \frac{1}{2}\vec{g}\frac{t^2}{2} + \vec{v}_0 t$

Soit : $\begin{cases} x(t) = V_0\cos\theta_0 . t \\ z(t) = -\frac{1}{2}g t^2 + V_0\sin\theta_0 t \end{cases} \Rightarrow \boxed{z = -\frac{1}{2}g\frac{x^2}{V_0^2\cos^2\theta_0} + \tan\theta_0 . x}$

c'est une parabole indépendante de m. (H)

4. Lorsque $x = x_m$ on a $z = 0$

donc $x\left(\tan\theta_0 - \frac{g x}{2V_0^2\cos^2\theta_0}\right) = 0 \Rightarrow \boxed{x_m = \frac{2\sin\theta_0\cos\theta_0 . V_0^2}{g}}$ (H)

5. Lorsque $z = H_m$ on a $\dot{z} = 0$

donc $t_{sommet} = \frac{V_0\sin\theta_0}{g}$ et $\boxed{H_m = \frac{V_0^2\sin^2\theta_0}{2g}}$ (H)

6. x_m est maximal si $\frac{dx_m}{d\theta_0} = 0$ donc si $\frac{d\left(\sin 2\theta_0 \frac{V_0^2}{g}\right)}{d\theta_0} = 0$

soit $2\cos(2\theta_0)\frac{V_0^2}{g} = 0 \Rightarrow 2\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ donc $\boxed{\theta_0 = \frac{\pi}{4}\text{ rad.}}$

On a alors $\boxed{x_{m,max} = \frac{V_0^2}{g}.}$

7. AN : $\boxed{x_m = 14,7\text{ km} \quad , \quad H_m = 3,7\text{ km} \quad v_\infty = 33\text{ m s}^{-1}}$

Ces valeurs sont aberrantes. C'est logique car l'hypothèse $v_\infty \gg v_0$ est fausse : c'est même l'inverse ($v_0 \gg v_\infty$).

B. Trajectoire de Tartaglia

8. Pour qu'une trajectoire soit rectiligne il faut que l'accélération soit selon $e_{x'}$. Or le poids est selon $-\vec{e_z} \neq \vec{e_{x'}}$. Dans cette phase, on a donc $\|m\vec{g}\| \ll \|\vec{F_D}\|$.

On peut également reprendre la valeur de v_∞ (pour les plomb n°1) et constater que $v_\infty \ll v_0$ donc $mg \ll \frac{1}{2}\rho_{air} S C_D v_0^2$.

9. On a alors : $m\vec{a} = -\frac{1}{2}\rho_{air} S . C_D v \vec{v}$

Selon $\vec{e}_{x'}$: $m\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2}\rho_{air} S C_D v . \frac{dx'}{dt}$

En divisant de part et d'autre par $\frac{dx'}{dt}$ et en simplifiant par dt : $\frac{dv}{dx'} = -\rho_{air}\frac{S.C_D}{2m} v. = -\frac{g}{v_\infty^2} . v$ car $v_\infty^2 = \frac{2mg}{\rho_{air} S . C_D}$.

10. $v = A e^{-x'/D}$. Or les CI imposent $v(x'=0) = V_0$ donc

$A = V_0 \Rightarrow \boxed{v(x') = V_0 \, e^{-x'/D}}$ évolution exponentielle de la vitesse

D = distance caractéristique d'évolution de v. (on vérifie l'(H)!)

[En quelques D, v devient très faible ... et le modèle qui impose $v \gg v_\infty$, n'est alors plus valable.]

11. Pour $x' = d$, on a $v = 10\, v_\infty$ donc :

$V_0 e^{-d/D} = 10\, v_\infty \Rightarrow \boxed{d = D . \ln\left(\frac{V_0}{10 V_\infty}\right)}$

Pour un plomb n°1 : $v_{\infty_1} = 33\ m.s^{-1} \Rightarrow D_1 = 111\ m$ et $d_1 = 15{,}7\ m$.

— — — 12 : $v_{\infty_{12}} = 18\ m.s^{-1} \Rightarrow D_{12} = 36\ m$ et $d_{12} = 26{,}9\ m$.

[Ce résultat est surprenant car en désaccord avec les courbes données sur la dernière figure : on obtient ici d décroissant avec m ... ??]

12. $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m v^2$ donc $\mathcal{E}_c(d) = \frac{1}{2} m (10 v_\infty)^2$

AN: $\boxed{\begin{array}{l} \mathcal{E}_{c,1}(d_1) = 20{,}7 \text{ J.} \\ \mathcal{E}_{c,12}(d_{12}) = 0{,}2 \text{ J.} \end{array}}$ Dans la phase rectiligne, $\mathcal{E}_c$ dépend fortement de la masse.

En cas d'agglutination, le bloc de plomb aura une masse très supérieure à celle d'un unique plomb et donc une énergie cinétique très élevée. Ce projectile est alors beaucoup plus dangereux.

13. Lorsque $\vec{v} = \vec{v}_{lim}$ on a $\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{0}$. Le PFD donne alors:

$$m\vec{a} = \vec{0} = m\vec{g} - \frac{1}{2}\rho_{air} S C_D v_{lim} \cdot \vec{v}_{lim}$$

On en déduit que v_{lim} est colinéaire à $\vec{g}$ et après projection selon $\vec{e_z}$: $v_{lim}^2 = \frac{2mg}{\rho_{air} S C_D} = v_\infty^2$

D'où $\boxed{\vec{v}_{lim} = -v_\infty \cdot \vec{e_z}}$ (car $\vec{g}$ est selon $-\vec{e_z}$)

14. On voit que dans cette phase, le plomb tombe vertical^t, comme s'il avait été arrêté par un mur!

15. AN: $\boxed{x_{M,1} = 266 \text{ m} \quad \text{et} \quad x_{M,12} = 107 \text{ m}}$

diamètre = 4 mm

La règle énoncée dans l'article donne $X_{M,1} = 100 \times 4 = 400$ m

et $X_{M,12} = 100 \times 1{,}25 = 125$ m.

Les ordres de grandeur correspondent.

16. Pour un plomb n°1 : $\log((v_0/v_{\infty,1})^2) = 2{,}1 \Rightarrow \boxed{\theta_{opt,1} = 17°}$

——— — ——— 12 : $\log((v_0/v_{\infty,12})^2) = 2{,}65 \Rightarrow \boxed{\theta_{opt,2} = 16°.}$

On remarque que θ_{opt} est peu sensible à la masse des plombs.

17. Par lecture : $\boxed{\begin{array}{l} X_{M,1} \simeq 330 \text{ m} \\ X_{M,12} \simeq 170 \text{ m} \end{array}}$ Ces valeurs sont un peu plus élevées que celles de la q.15 mais plus proches de celle de la formule du doc. 1.

III Ping-pong PCSI 1.

On constate que la distance parcourue par la balle avant le 1er rebond est $\frac{L}{2n}$.

Or le PFD selon $\vec{e_z}$ donne $\ddot{z} = -g \Rightarrow z = -g\frac{t^2}{2} + h$

car $\dot{z}(0) = 0$ et $z(0) = h$.

La balle touche la table pour la 1ère fois à l'instant $t_1 = \sqrt{\frac{2h}{g}}$!

La vitesse horizontale est constante (pas de frott^t) donc la distance parcourue est $d = V_0 t_1 = V_0\sqrt{\frac{2h}{g}}$

Il faut donc : $\boxed{V_0\sqrt{\frac{2h}{g}} = \frac{L}{2n}}$

Il faut donc faire évoluer V_0 proportionnellement à $\frac{1}{n}$ ou faire évoluer h proportionnellement à $\frac{1}{n^2}$.

A vous de jouer ! [en attendant la prise en compte des frott^t et la dissipation d'énergie lors des rebonds !].