

Calibre 25mm - seconde à 6H - mécanique - balancier annulaire**Oscillateur**

Fréquence, période, amplitude stationnaire

$$f := 14400 \cdot h^{-1} \quad f = 4 \text{ Hz} \quad T_0 := \frac{1}{f} \quad T_0 = 0.25 \text{ s} \quad \omega_0 := 2 \cdot \pi \cdot f \quad \theta_0 := 270 \cdot \text{deg} \quad (\text{choix})$$

Balancier annulaire Angle de levée $\lambda_b := 51 \cdot \text{deg}$

$$\text{serge} \quad D_{s_int} := 8.62 \cdot \text{mm} \quad D_{s_ext} := 9.5 \cdot \text{mm} \quad h_s := 0.44 \cdot \text{mm}$$

$$\rho_b := 8.7 \cdot 10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad M_b := 59.5 \cdot \text{mg} \quad (\text{valeur mesurée})$$

$$M_{\text{serge}} := \frac{\pi \cdot \rho_b}{4} \cdot (D_{s_ext}^2 - D_{s_int}^2) \cdot h_s \quad M_{\text{serge}} = 47.941 \text{ mg}$$

$$J_{\text{serge}} := \frac{1}{8} \cdot M_{\text{serge}} \cdot (D_{s_ext}^2 + D_{s_int}^2) \quad J_{\text{serge}} = 9.861 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

$$J_b := 1.1 \cdot J_{\text{serge}} \quad J_b = 10.847 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

$$\text{Autre approche en partant de } M_b \quad M_{\text{serge}} := \frac{M_b}{1.2} \quad M_{\text{serge}} = 49.583 \text{ mg}$$

$$J_{\text{serge}} := \frac{1}{8} \cdot M_{\text{serge}} \cdot (D_{s_ext}^2 + D_{s_int}^2) \quad J_{\text{serge}} = 10.199 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

$$J_b := J_{\text{serge}} \quad J_b = 10.199 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Valeur NIHS} \quad J_b := 10 \cdot \text{mg} \cdot \text{cm}^2$$

$$\text{Pivotage} \quad D_{\text{pivot}_b} := 0.066 \cdot \text{mm} \quad D_{\text{appui}} := 0.036 \cdot \text{mm} \quad (\text{voir relevé de calibre})$$

$$\text{Pare-choc} \quad D_{t_p_b} := 0.07 \cdot \text{mm} \quad L_{\text{palier_sup}_b} := 0.051 \cdot \text{mm} \quad L_{\text{palier_inf}_b} := 0.07 \cdot \text{mm}$$

Paramètres de frottements

Fichiers Excel

$$\text{Spiral} \quad C := \omega_0^2 \cdot J_b \quad C = 6.317 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m} \quad e_{sp} := 0.03 \cdot \text{mm}$$

$$e_{sp} := 0.03 \cdot \text{mm} \quad h_{sp} := 0.15 \cdot \text{mm} \quad d_{\text{piton}} := 5.1 \cdot \text{mm} \quad d2_{sp} := 4.52 \cdot \text{mm} \quad d1_{sp} := 1.10 \cdot \text{mm}$$

$$p_{sp} := 0.135 \cdot \text{mm} \quad n_{sp} := \frac{d2_{sp} - d1_{sp}}{2 \cdot p_{sp}} \quad n_{sp} = 12.667$$

$$L_{sp} := \pi \cdot \frac{n_{sp}}{2} \cdot (d2_{sp} + d1_{sp}) \quad L_{sp} = 11.182 \text{ cm}$$

$$\text{Numéro du spiral} \quad K := C \cdot (d2_{sp}^2 - d1_{sp}^2) \quad K = 1.214 \text{ dyne} \cdot \text{cm}^3 \quad N_s := 1.18$$

Goupilles de raquette

$$\text{position:} \quad R_{\text{goupille}} := 2.475 \cdot \text{mm} \quad \text{diamètre:} \quad d_{\text{goupille}} := 0.10 \cdot \text{mm}$$

Assortiment

Distance des centres balancier - ancre	$b := 2.85 \cdot mm$
Distance des centres ancre - roue d'échappement	$a := 2.50 \cdot mm$
Diamètre de la cheville	$d_{cheville} := 0.32 \cdot mm$
Distance axe de balancier - centre de courbure de la cheville	$\rho_3 := 0.57 \cdot mm$

Ancre $J_a := \frac{J_b}{100}$ $J_a = 0.1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$ (estimation !)

Angle de repos $\varepsilon := 3 \cdot \text{deg}$

Angles d'impulsion partagée

entrée	palette	$\Delta\psi_{ep} := 6 \cdot \text{deg}$		
	roue	$\Delta\psi_{ed} := 2.5 \cdot \text{deg}$	$\Delta\psi_{ie} := \Delta\psi_{ep} + \Delta\psi_{ed}$	$\Delta\psi_{ie} = 8.5 \cdot \text{deg}$
sortie	palette	$\Delta\psi_{sp} := 6 \cdot \text{deg}$		
	roue	$\Delta\psi_{sd} := 2.5 \cdot \text{deg}$	$\Delta\psi_{is} := \Delta\psi_{sp} + \Delta\psi_{sd}$	$\Delta\psi_{is} = 8.5 \cdot \text{deg}$

Angles de tirage

entrée	$\beta_{te} := 21.38 \cdot \text{deg}$	$\beta_e := \beta_{te} - \varepsilon$	$\beta_e = 18.38 \cdot \text{deg}$
sortie	$\beta_{ts} := 18.53 \cdot \text{deg}$	$\beta_s := \beta_{ts} + \varepsilon$	$\beta_s = 21.53 \cdot \text{deg}$

Chemin perdu $\Delta\psi_{cp} := 0.5 \cdot \text{deg}$

Angle de levée de l'ancre $\lambda_a := \varepsilon + \Delta\psi_{ie} + \Delta\psi_{cp}$ $\lambda_a = 12 \cdot \text{deg}$

Distance axe de l'ancre - centre de courbure de la cheville en position de repos

$$\rho_2 := \sin\left(\frac{\lambda_b}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\lambda_a}{2}\right)^{-1} \cdot \rho_3 \quad \rho_2 = 2.348 \text{ mm} \quad \rho_2 \cdot \cos\left(\frac{\lambda_a}{2}\right) + \rho_3 \cdot \cos\left(\frac{\lambda_b}{2}\right) = 2.849 \text{ mm}$$

Roue d'échappement

$z_e := 20$ $\alpha_0 := 36 \cdot \text{deg}$ $\alpha'_0 := 27 \cdot \text{deg}$ $R_d := \frac{4.265}{2} \cdot \text{mm}$ $R_d = 2.1325 \text{ mm}$

Angles d'impulsion partagée

palette	$\Delta\alpha_p := 5 \cdot \text{deg}$	dent	$\Delta\alpha_d := 2.5 \cdot \text{deg}$
---------	--	------	--

Chute $\Delta\alpha_{ch} := 1.5 \cdot \text{deg}$ $\alpha_{recul} := 0.31 \cdot \text{deg}$ mesuré:

$$\gamma' := \arctan\left(\frac{R_d \cdot \sin(\alpha_0 - \Delta\alpha_p)}{a - R_d \cdot \cos(\alpha_0 - \Delta\alpha_p)}\right) \quad \gamma' = 58.536 \cdot \text{deg} \quad R_B := \frac{R_d \cdot \sin(\alpha_0 - \Delta\alpha_p)}{\sin(\gamma')} \quad R_B = 1.288 \text{ mm}$$

$$\alpha' := \arctan\left(\frac{R_B \cdot \sin(\gamma' + \Delta\psi_{ed})}{a - R_B \cdot \cos(\gamma' + \Delta\psi_{ed})}\right) \quad \alpha' = 30.98 \cdot \text{deg} \quad R_{re_ext} := \frac{R_B \cdot \sin(\gamma' + \Delta\psi_{ed})}{\sin(\alpha')} \quad R_{re_ext} = 2.189 \text{ mm}$$

mesuré:

$$R_{re_ext} = 2.189 \text{ mm} \quad R_{fond_dent} := 1.7 \cdot \text{mm} \quad R_{re_m} := \frac{R_{re_ext} + R_{fond_dent}}{2} \quad R_{re_ext} := 2.185 \cdot \text{mm}$$

$$R_{re_m} = 1.944 \text{ mm} \quad R_{re_int} := 0.19 \cdot \text{mm} \quad \text{épaisseur}_{re} := 0.12 \cdot \text{mm}$$

$$\rho_a := 7.85 \cdot 10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad M_{re} := \pi \cdot \rho_a \cdot (R_{re_m}^2 - R_{re_int}^2) \cdot \text{épaisseur}_{re} \quad J_{re} := \frac{1}{2} \cdot M_{re} \cdot (R_{re_m}^2 + R_{re_int}^2)$$

$$M_{re} = 11.081 \text{ mg} \quad J_{re} = 0.211 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{approx})$$

Angle parcouru par la roue $\Delta\alpha_p + \Delta\alpha_d + \Delta\alpha_{ch} = 9 \cdot \text{deg}$ vérification $\frac{360 \cdot \text{deg}}{2 \cdot z_e} = 9 \cdot \text{deg}$

Pignon d'échappement $z_6 := 8$ $\text{mod} := 0.076 \cdot \text{mm}$ $D_{pe_p} := z_6 \cdot \text{mod}$ $D_{pe_p} = 0.608 \text{ mm}$ $h_{pe} := 1.18 \cdot \text{mm}$

$$M_{pe} := \frac{\pi \cdot \rho_a}{4} \cdot D_{pe_p}^2 \cdot h_{pe} \quad M_{pe} = 2.689 \text{ mg} \quad J_{pe} := \frac{1}{8} \cdot M_{pe} \cdot D_{pe_p}^2 \quad J_{pe} = 1.243 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Moment d'inertie sur l'axe de la roue d'échappement: $J_r := (J_{re} + J_{pe}) \cdot 1.1$ $J_r = 0.234 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Rouage**Roue de seconde**

$$z_5 := 96 \quad \text{mod} := 0.076 \cdot \text{mm} \quad D_{rs_p} := z_5 \cdot \text{mod} \quad D_{rs_p} = 7.296 \text{ mm}$$

$$\rho_l := 8.47 \cdot 10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad \text{ép}_{rs} := 0.20 \cdot \text{mm} \quad D_{rs_int} := 6.5 \cdot \text{mm}$$

$$M_{rs} := \frac{\pi \cdot \rho_l}{4} \cdot (D_{rs_p}^2 - D_{rs_int}^2) \cdot \text{ép}_{rs} \quad M_{rs} = 14.611 \text{ mg} \quad J_{rs} := \frac{1}{8} \cdot M_{rs} \cdot (D_{rs_p}^2 + D_{rs_int}^2) \quad J_{rs} = 1.744 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Pignon de seconde

$$z_4 := 9 \quad \text{mod} := 0.103 \cdot \text{mm} \quad D_{ps_p} := z_4 \cdot \text{mod} \quad D_{ps_p} = 0.927 \text{ mm}$$

$$h_{ps} := 0.7 \cdot \text{mm}$$

$$M_{ps} := \frac{\pi \cdot \rho_a}{4} \cdot D_{ps_p}^2 \cdot h_{ps} \quad M_{ps} = 3.709 \text{ mg} \quad J_{ps} := \frac{1}{8} \cdot M_{ps} \cdot D_{ps_p}^2 \quad J_{ps} = 3.984 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Moment d'inertie sur l'axe de la roue de seconde:

$$J_3 := (J_{rs} + J_{ps}) \cdot 1.1$$

$$J_3 = 1.923 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Roue de moyenne

$$z_3 := 72 \quad \text{mod} := 0.103 \cdot \text{mm} \quad D_{rm_p} := z_3 \cdot \text{mod} \quad D_{rm_p} = 7.416 \text{ mm}$$

$$\text{ép}_{rm} := 0.20 \cdot \text{mm} \quad D_{rm_int} := 5.86 \cdot \text{mm}$$

$$M_{rm} := \frac{\pi \cdot \rho_l}{4} \cdot (D_{rm_p}^2 - D_{rm_int}^2) \cdot \text{ép}_{rm} \quad M_{rm} = 27.484 \text{ mg} \quad J_{rm} := \frac{1}{8} \cdot M_{rm} \cdot (D_{rm_p}^2 + D_{rm_int}^2) \quad J_{rm} = 3.069 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Pignon de moyenne

$$z_2 := 10 \quad \text{mod} := 0.120 \cdot \text{mm} \quad D_{pm_p} := z_2 \cdot \text{mod} \quad D_{pm_p} = 1.2 \text{ mm}$$

$$h_{pm} := 0.50 \cdot \text{mm}$$

$$M_{pm} := \frac{\pi \cdot \rho_a}{4} \cdot D_{pm_p}^2 \cdot h_{pm} \quad M_{pm} = 4.439 \text{ mg} \quad J_{pm} := \frac{1}{8} \cdot M_{pm} \cdot D_{pm_p}^2 \quad J_{pm} = 7.99 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Moment d'inertie sur l'axe de la roue de moyenne:

$$J_2 := (J_{rm} + J_{pm}) \cdot 1.1$$

$$J_2 = 3.385 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Roue de centre

$$z_1 := 75 \quad \text{mod} := 0.120 \cdot \text{mm} \quad D_{rc_p} := z_1 \cdot \text{mod} \quad D_{rc_p} = 9 \text{ mm}$$

$$\text{ép}_{rc} := 0.20 \cdot \text{mm} \quad D_{rc_int} := 7 \cdot \text{mm}$$

$$M_{rc} := \frac{\pi \cdot \rho_l}{4} \cdot (D_{rc_p}^2 - D_{rc_int}^2) \cdot \text{ép}_{rc} \quad M_{rc} = 42.575 \text{ mg} \quad J_{rc} := \frac{1}{8} \cdot M_{rc} \cdot (D_{rc_p}^2 + D_{rc_int}^2) \quad J_{rc} = 6.918 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Pignon de centre

$$z_0 := 14 \quad \text{mod} := 0.14 \cdot \text{mm} \quad D_{pc_p} := z_0 \cdot \text{mod} \quad D_{pc_p} = 1.96 \text{ mm}$$

$$h_{pc} := 1.05 \cdot \text{mm}$$

$$M_{pc} := \frac{\pi \cdot \rho_a}{4} \cdot D_{pc_p}^2 \cdot h_{pc} \quad M_{pc} = 24.869 \text{ mg} \quad J_{pc} := \frac{1}{8} \cdot M_{pc} \cdot D_{pc_p}^2 \quad J_{pc} = 0.119 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Moment d'inertie sur l'axe de la roue de moyenne:

$$J_1 := (J_{rc} + J_{pc}) \cdot 1.1$$

$$J_1 = 7.742 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Rapports d'engrenages

$$\rho_1 := \frac{z_1 \cdot z_3 \cdot z_5}{z_2 \cdot z_4 \cdot z_6} \quad \rho_1 = 720 \quad \rho_2 := \frac{z_3 \cdot z_5}{z_4 \cdot z_6} \quad \rho_2 = 96 \quad \rho_3 := \frac{z_5}{z_6} \quad \rho_3 = 12$$

Inertie du rouage

$$J_r = 0.234 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

$$J_{rouage} := J_r + \sum_{i=1}^3 [J_i \cdot (\rho_i)^{-2}] \quad J_{rouage} = 0.2477 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Organe moteur

Barillet $z_b := 80$ $\text{mod} := 0.14 \cdot \text{mm}$ $D_{\text{bar}_p} := z_b \cdot \text{mod}$ $D_{\text{bar}_p} = 11.2 \text{ mm}$

$$D_{t_ext} := 10.8 \cdot \text{mm} \quad D_{t_int} := 10.293 \cdot \text{mm} \quad h_{t_int} := 1.20 \cdot \text{mm}$$

$$D_{\text{bonde}} := 2.30 \cdot \text{mm} \quad r_{\text{bonde}} := 0.5 \cdot D_{\text{bonde}}$$

Ressort $e_{rb} := 0.11 \cdot \text{mm}$ $h_r := 1.15 \cdot \text{mm}$ $L_{rb} := 430 \cdot \text{mm}$ $\sigma_{\text{max}} := 3400 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$

$$N_b := \frac{1}{e_{rb}} \cdot \left[\sqrt{r_{\text{bonde}}^2 + \frac{L_{rb} \cdot e_{rb}}{\pi}} + \sqrt{\left(\frac{D_{t_int}}{2}\right)^2 - \frac{L_{rb} \cdot e_{rb}}{\pi} - \frac{D_{t_int}}{2} - r_{\text{bonde}}} \right] \quad N_b = 10.286$$

$$C_B := \frac{e_{rb}^2 \cdot h_r \cdot \sigma_{\text{max}}}{6} \quad C_B = 7.885 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Valeurs mesurées: $M_{025} := 0.742 \cdot \text{kgf} \cdot \text{mm}$ $M_{025} = 7.277 \text{ N} \cdot \text{mm}$

$$M_{\text{max}} := 0.637 \cdot \text{kgf} \cdot \text{mm} \quad M_{\text{max}} = 6.247 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Vitesse de rotation du barillet

$$\rho_0 := \frac{z_b \cdot z_1 \cdot z_3 \cdot z_5}{z_0 \cdot z_2 \cdot z_4 \cdot z_6} \quad \rho_0 = 4.114 \times 10^3 \quad \omega_b := 2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{z_e \cdot \rho_0} \quad \omega_b = 3.054 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$