

Calibre 11 $\frac{1}{2}$ " - seconde au centre - automatique - balancier à vis**Oscillateur**

Fréquence, période, amplitude stationnaire

$$f := 9000 \cdot h^{-1} \quad f = 2.5 \text{ Hz} \quad T_0 := \frac{1}{f} \quad T_0 = 0.4 \text{ s} \quad \omega_0 := 2 \cdot \pi \cdot f \quad \theta_0 := 270 \cdot \text{deg} \quad (\text{choix})$$

Balancier à vis

Angle de levée

$$\lambda_b := 48 \cdot \text{deg}$$

$$\text{serge} \quad D_{s_int} := 8.7 \cdot \text{mm} \quad D_{s_ext} := 9.5 \cdot \text{mm} \quad h_s := 0.65 \cdot \text{mm}$$

$$\text{vis} \quad d_{vis} := 0.56 \cdot \text{mm} \quad h_{vis} := 0.525 \cdot \text{mm} \quad nb_{vis} := 16$$

$$\rho_b := 8.7 \cdot 10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad M_b := 109.6 \cdot \text{mg} \quad (\text{valeur mesurée})$$

$$M_{serge} := \frac{\pi \cdot \rho_b}{4} \cdot (D_{s_ext}^2 - D_{s_int}^2) \cdot h_s \quad M_{serge} = 64.667 \text{ mg}$$

$$M_{vis} := \frac{1}{4} \cdot \rho_b \cdot \pi \cdot d_{vis}^2 \cdot h_{vis} \quad M_{vis} = 1.125 \text{ mg} \quad (M_{serge} + nb_{vis} \cdot M_{vis}) \cdot 1.2 = 99.2 \text{ mg}$$

$$J_{serge} := \frac{1}{8} \cdot M_{serge} \cdot (D_{s_ext}^2 + D_{s_int}^2) \quad J_{serge} = 13.414 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

$$J_{vis} := \frac{M_{vis}}{12} \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot d_{vis}^2 + h_{vis}^2 \right) + M_{vis} \cdot \left(\frac{D_{s_ext}}{2} + \frac{h_{vis}}{2} \right)^2 \quad J_{vis} = 0.283 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

$$J_b := 1.1 \cdot (J_{serge} + nb_{vis} \cdot J_{vis}) \quad J_b = 19.738 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

$$\text{Autre approche en partant de } M_b \quad M_{serge} := \frac{M_b}{1.2} - nb_{vis} \cdot M_{vis} \quad M_{serge} = 73.334 \text{ mg}$$

$$J_{serge} := \frac{1}{8} \cdot M_{serge} \cdot (D_{s_ext}^2 + D_{s_int}^2) \quad J_{serge} = 15.211 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

$$J_b := (J_{serge} + nb_{vis} \cdot J_{vis}) \quad J_b = 19.741 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Valeur adoptée} \quad J_b := 20 \cdot \text{mg} \cdot \text{cm}^2$$

Paramètres de frottements

$$f_b := 0.005 \quad \eta_b := 0.002 \quad \kappa_b := 0.0002 \quad (\text{choix})$$

$$\text{Spiral} \quad C := \omega_0^2 \cdot J_b \quad C = 4.935 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$h_{sp} := 0.15 \cdot \text{mm} \quad d_{2sp} := 5.4 \cdot \text{mm} \quad d_{1sp} := 1.4 \cdot \text{mm} \quad n_{sp} := 14$$

$$L_{sp} := \pi \cdot \frac{n_{sp}}{2} \cdot (d_{2sp} + d_{1sp}) \quad L_{sp} = 14.954 \text{ cm}$$

$$\text{Numéro du spiral} \quad K := C \cdot (d_{2sp}^2 - d_{1sp}^2) \quad K = 1.342 \text{ dyne} \cdot \text{cm}^3 \quad N_s := 1.50$$

Goupille de raquette interne

$$\text{position:} \quad R_{goupille} := 1.3 \cdot \text{mm} \quad \text{diamètre:} \quad d_{goupille} := 0.1 \cdot \text{mm}$$

Assortiment

Distance des centres balancier - ancre

$$b := 3.40 \cdot \text{mm}$$

Distance des centres ancre - roue d'échappement

$$a := 3.15 \cdot \text{mm}$$

Diamètre de la cheville

$$d_{\text{cheville}} := 0.40 \cdot \text{mm}$$

Distance axe de balancier - centre de courbure de la cheville

$$\rho_3 := 0.71 \cdot \text{mm}$$

Ancre $J_a := \frac{J_b}{100}$ $J_a = 0.2 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$ (estimation !)

Angle de repos $\varepsilon := 2.5 \cdot \text{deg}$

Angles d'impulsion partagée

entrée	palette	$\Delta\psi_{ep} := 6 \cdot \text{deg}$		
	roue	$\Delta\psi_{ed} := 3 \cdot \text{deg}$	$\Delta\psi_{ie} := \Delta\psi_{ep} + \Delta\psi_{ed}$	$\Delta\psi_{ie} = 9 \text{ deg}$
sortie	palette	$\Delta\psi_{sp} := 7.512 \cdot \text{deg}$	(Calculée à partir des valeurs imposées par la palette d'entrée)	
	roue	$\Delta\psi_{sd} := 1.488 \cdot \text{deg}$	$\Delta\psi_{is} := \Delta\psi_{sp} + \Delta\psi_{sd}$	$\Delta\psi_{is} = 9 \text{ deg}$

Angles de tirage

entrée	$\beta_{te} := 15 \cdot \text{deg}$	$\beta_e := \beta_{te} - \varepsilon$
sortie	$\beta_{ts} := 13 \cdot \text{deg}$	$\beta_s := \beta_{ts} + \varepsilon$

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

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

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

$$\rho_2 := \sin\left(\frac{\lambda_b}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\lambda_a}{2}\right)^{-1} \cdot \rho_3 \quad \rho_2 = 2.763 \text{ mm} \quad \rho_2 \cdot \cos\left(\frac{\lambda_a}{2}\right) + \rho_3 \cdot \cos\left(\frac{\lambda_b}{2}\right) = 3.396 \text{ mm}$$

Roue d'échappement $z_e := 15$ $\alpha_0 := 30 \cdot \text{deg}$ $R_d := a \cdot \cos(\alpha_0)$ $R_d = 2.728 \text{ mm}$

Angles d'impulsion partagée palette $\Delta\alpha_p := 6.5 \cdot \text{deg}$ dent $\Delta\alpha_d := 4 \cdot \text{deg}$

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

$$\gamma' := \arctan\left(\frac{R_d \cdot \sin(\alpha_0 - \Delta\alpha_p)}{a - R_d \cdot \cos(\alpha_0 - \Delta\alpha_p)}\right) \quad \gamma' = 59.207 \text{ deg} \quad R_B := \frac{R_d \cdot \sin(\alpha_0 - \Delta\alpha_p)}{\sin(\gamma')} \quad R_B = 1.266 \text{ mm}$$

$$\alpha' := \arctan\left(\frac{R_B \cdot \sin(\gamma' + \Delta\psi_{ed})}{a - R_B \cdot \cos(\gamma' + \Delta\psi_{ed})}\right) \quad \alpha' = 23.637 \text{ deg} \quad R_{re_ext} := \frac{R_B \cdot \sin(\gamma' + \Delta\psi_{ed})}{\sin(\alpha')}$$

$$R_{re_ext} = 2.794 \text{ mm} \quad R_{fond_dent} := 0.76 \cdot R_d \quad R_{fond_dent} = 2.073 \text{ mm} \quad R_{re_m} := \frac{R_{re_ext} + R_{fond_dent}}{2}$$

$$R_{re_m} = 2.434 \text{ mm} \quad R_{re_int} := 0.7 \cdot R_d \quad R_{re_int} = 1.91 \text{ mm} \quad \text{épaisseur}_{re} := 0.2 \cdot \text{mm}$$

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

$$M_{re} = 11.225 \text{ mg} \quad J_{re} = 0.537 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{approx})$$

Angle parcouru par la roue $\Delta\alpha_p + \Delta\alpha_d + \Delta\alpha_{ch} = 12 \text{ deg}$ vérification $\frac{360 \cdot \text{deg}}{2 \cdot z_e} = 12 \text{ deg}$

Pignon d'échappement $z_6 := 7$ $\text{mod} := 0.087 \cdot \text{mm}$ $D_{pe_p} := z_6 \cdot \text{mod}$ $D_{pe_p} = 0.609 \text{ mm}$ $h_{pe} := 1.5 \cdot \text{mm}$

$$M_{pe} := \frac{\pi \cdot \rho_a}{4} \cdot D_{pe_p}^2 \cdot h_{pe} \quad M_{pe} = 3.43 \text{ mg} \quad J_{pe} := \frac{1}{8} \cdot M_{pe} \cdot D_{pe_p}^2 \quad J_{pe} = 1.59 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Moment d'inertie sur l'axe de la roue d'échappement: $J_r := (J_{re} + J_{pe}) \cdot 1.1$ $J_r = 0.593 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Rouage

Roue de seconde $z_5 := 70$ $\text{mod} := 0.087 \cdot \text{mm}$ $D_{rs_p} := z_5 \cdot \text{mod}$ $D_{rs_p} = 6.09 \text{ mm}$
 $\rho_l := 8.47 \cdot 10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ $\text{ép}_{rs} := 0.15 \cdot \text{mm}$ $D_{rs_int} := 0.85 \cdot D_{rs_p}$ $D_{rs_int} = 5.176 \text{ mm}$
 $M_{rs} := \frac{\pi \cdot \rho_l}{4} \cdot (D_{rs_p}^2 - D_{rs_int}^2) \cdot \text{ép}_{rs}$ $M_{rs} = 10.27 \text{ mg}$ $J_{rs} := \frac{1}{8} \cdot M_{rs} \cdot (D_{rs_p}^2 + D_{rs_int}^2)$ $J_{rs} = 0.82 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Pignon de seconde $z_4 := 8$ $\text{mod} := 0.11 \cdot \text{mm}$ $D_{ps_p} := z_4 \cdot \text{mod}$ $D_{ps_p} = 0.88 \text{ mm}$
 $h_{ps} := 1.0 \cdot \text{mm}$
 $M_{ps} := \frac{\pi \cdot \rho_a}{4} \cdot D_{ps_p}^2 \cdot h_{ps}$ $M_{ps} = 4.774 \text{ mg}$ $J_{ps} := \frac{1}{8} \cdot M_{ps} \cdot D_{ps_p}^2$ $J_{ps} = 4.622 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Moment d'inertie sur l'axe de la roue de seconde: $J_3 := (J_{rs} + J_{ps}) \cdot 1.1$ $J_3 = 0.907 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Roue de moyenne $z_3 := 60$ $\text{mod} := 0.11 \cdot \text{mm}$ $D_{rm_p} := z_3 \cdot \text{mod}$ $D_{rm_p} = 6.6 \text{ mm}$
 $\text{ép}_{rm} := 0.15 \cdot \text{mm}$ $D_{rm_int} := 0.85 \cdot D_{rm_p}$ $D_{rm_int} = 5.61 \text{ mm}$
 $M_{rm} := \frac{\pi \cdot \rho_l}{4} \cdot (D_{rm_p}^2 - D_{rm_int}^2) \cdot \text{ép}_{rm}$ $M_{rm} = 12.062 \text{ mg}$ $J_{rm} := \frac{M_{rm}}{8} \cdot (D_{rm_p}^2 + D_{rm_int}^2)$ $J_{rm} = 1.131 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Pignon de moyenne $z_2 := 8$ $\text{mod} := 0.105 \cdot \text{mm}$ $D_{pm_p} := z_2 \cdot \text{mod}$ $D_{pm_p} = 0.84 \text{ mm}$
 $h_{pm} := 1.7 \cdot \text{mm}$
 $M_{pm} := \frac{\pi \cdot \rho_a}{4} \cdot D_{pm_p}^2 \cdot h_{pm}$ $M_{pm} = 7.395 \text{ mg}$ $J_{pm} := \frac{1}{8} \cdot M_{pm} \cdot D_{pm_p}^2$ $J_{pm} = 6.523 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Moment d'inertie sur l'axe de la roue de moyenne: $J_2 := (J_{rm} + J_{pm}) \cdot 1.1$ $J_2 = 1.252 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Roue de centre $z_1 := 64$ $\text{mod} := 0.105 \cdot \text{mm}$ $D_{rc_p} := z_1 \cdot \text{mod}$ $D_{rc_p} = 6.72 \text{ mm}$
 $\text{ép}_{rc} := 0.15 \cdot \text{mm}$ $D_{rc_int} := 0.85 \cdot D_{rc_p}$ $D_{rc_int} = 5.712 \text{ mm}$
 $M_{rc} := \frac{\pi \cdot \rho_l}{4} \cdot (D_{rc_p}^2 - D_{rc_int}^2) \cdot \text{ép}_{rc}$ $M_{rc} = 12.504 \text{ mg}$ $J_{rc} := \frac{1}{8} \cdot M_{rc} \cdot (D_{rc_p}^2 + D_{rc_int}^2)$ $J_{rc} = 1.216 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Pignon de centre $z_0 := 10$ $\text{mod} := 0.16 \cdot \text{mm}$ $D_{pc_p} := z_0 \cdot \text{mod}$ $D_{pc_p} = 1.6 \text{ mm}$
 $h_{pc} := 0.85 \cdot \text{mm}$
 $M_{pc} := \frac{\pi \cdot \rho_a}{4} \cdot D_{pc_p}^2 \cdot h_{pc}$ $M_{pc} = 13.416 \text{ mg}$ $J_{pc} := \frac{1}{8} \cdot M_{pc} \cdot D_{pc_p}^2$ $J_{pc} = 0.043 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Moment d'inertie sur l'axe de la roue de moyenne: $J_1 := (J_{rc} + J_{pc}) \cdot 1.1$ $J_1 = 1.385 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Rapports d'engrenages

$\rho_1 := \frac{z_1 \cdot z_3 \cdot z_5}{z_2 \cdot z_4 \cdot z_6}$ $\rho_1 = 600$ $\rho_2 := \frac{z_3 \cdot z_5}{z_4 \cdot z_6}$ $\rho_2 = 75$ $\rho_3 := \frac{z_5}{z_6}$ $\rho_3 = 10$

Inertie du rouage $J_r = 0.5925 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$ $J_{rouage} := J_r + \sum_{i=1}^3 [J_i \cdot (\rho_i)^{-2}]$ $J_{rouage} = 0.6018 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$

Organe moteur

Barillet $z_b := 73$ $\text{mod} := 0.16 \cdot \text{mm}$ $D_{\text{bar}_p} := z_b \cdot \text{mod}$ $D_{\text{bar}_p} = 11.68 \text{ mm}$

$D_{t_ext} := 11.3 \cdot \text{mm}$ $D_{t_int} := 10.8 \cdot \text{mm}$ $h_{t_int} := 1.39 \cdot \text{mm}$

$D_{\text{bonde}} := 3.35 \cdot \text{mm}$ $r_b := 0.5 \cdot D_{\text{bonde}}$

Ressort $e_{rb} := 0.11 \cdot \text{mm}$ $h_r := 1.38 \cdot \text{mm}$ $L_{rb} := 310 \cdot \text{mm}$ $\sigma_{\text{max}} := 3600 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$

$$N_b := \frac{1}{e_{rb}} \cdot \left[\sqrt{r_b^2 + \frac{L_{rb} \cdot e_{rb}}{\pi}} + \sqrt{\left(\frac{D_{t_int}}{2}\right)^2 - \frac{L_{rb} \cdot e_{rb}}{\pi} - \frac{D_{t_int}}{2} - r_b} \right] \quad N_b = 8.177$$

$$C_B := \frac{e_{rb}^2 \cdot h_r \cdot \sigma_{\text{max}}}{6} \quad C_B = 10.019 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Valeurs mesurées: **Armage max** $M_{\text{max}} := 1.264 \cdot \text{kgf} \cdot \text{mm}$ $M_{\text{max}} = 12.396 \text{ N} \cdot \text{mm}$

Après 6.5 tours de désarmage $M_{\text{max}} := 0.980 \cdot \text{kgf} \cdot \text{mm}$ $M_{\text{max}} = 9.611 \text{ N} \cdot \text{mm}$

Vitesse de rotation du barillet

$$\rho_0 := \frac{z_b \cdot z_1 \cdot z_3 \cdot z_5}{z_0 \cdot z_2 \cdot z_4 \cdot z_6} \quad \rho_0 = 4.38 \times 10^3$$

$$\omega_b := 2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{z_e \cdot \rho_0} \quad \omega_b = 2.391 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$