Perturbations thermiques du système balancier - spiral

Balancier bimétallique à vis à serge coupée - Maximum de sensibilité

Référence :D:\Résonateur (TE)\Data\Coef_thermiques.mcd(R)

Chronomètre - Balancier bimétallique à vis à serge coupée

Référence :D:\Résonateur (TE)\Data\Chronomètre.mcd(R)

$T_0 = 0.4\,s \qquad f = 2.5\,Hz \qquad \omega_0 := 2\cdot\pi\cdot f \qquad \Theta := 30 \qquad \Theta_{ambiante} := 20$

Coefficients de dilatation et constantes élastiques

$\alpha_1 := \alpha_{acier} \qquad \alpha_1 = 1.15\times 10^{-5} \qquad \alpha_2 := \alpha_{laiton} \qquad \alpha_2 = 1.85\times 10^{-5} \qquad \gamma_{acier} = -2.4\times 10^{-4}$

$E_1 := E_{acier} \qquad E_1 = 2.1\times 10^{11}\,Pa \qquad E_2 := E_{laiton} \qquad E_2 = 1\times 10^{11}\,Pa$

Epaisseur des bilames pour une compensation optimale

$e_1 := 0.245\cdot mm \qquad e_2 := e_1\cdot\sqrt{E_1\cdot E_2^{-1}} \qquad e_2 = 0.355\,mm \qquad e_s := e_1 + e_2 \qquad e_s = 0.60004\,mm$

$D_{s\_ext} = 19.2\,mm \qquad R_0 = 9.245\,mm \qquad h_s = 1.2\,mm \qquad \rho_1 := 7.8\cdot 10^3\cdot kg\cdot m^{-3} \qquad \rho_2 := 8.7\cdot 10^3\cdot kg\cdot m^{-3}$

$$M_{serge} := \pi\cdot\rho_1\cdot h_s\cdot\left[R_0^2 - (R_0 - e_1)^2\right] + \pi\cdot\rho_2\cdot h_s\cdot\left[(R_0 + e_2)^2 - R_0^2\right] \qquad M_{serge} = 350.9\,mg$$

$$J_{serge} := \frac{1}{2}\cdot M_1\cdot\left[R_0^2 + (R_0 - e_1)^2\right] + \frac{1}{2}\cdot M_2\cdot\left[(R_0 + e_2)^2 + R_0^2\right] \qquad J_{serge} = 304.3\,mg\cdot cm^2$$

$$M_{vis} := \frac{1}{4}\cdot\rho_{lt}\cdot\pi\cdot d_{vis}^2\cdot h_{vis}$$

$$J_{vis} := \frac{M_{vis}}{12}\cdot\left(\frac{3}{4}\cdot d_{vis}^2 + h_{vis}^2\right) + M_{vis}\cdot\left(\frac{D_{s\_ext}}{2} + \frac{h_{vis}}{2}\right)^2 \qquad M_{vis} = 9.839\,mg \qquad J_{vis} = 10.054\,mg\cdot cm^2$$

$M_b := 1.2\cdot\left(M_{serge} + nb_{vis}\cdot M_{vis}\right) \qquad M_b = 657.2\,mg$

$J_b := 1.1\cdot\left(J_{serge} + nb_{vis}\cdot J_{vis}\right) \qquad J_b = 555.9\,mg\cdot cm^2$ Valeur adoptée $\boxed{J_b := 550\cdot mg\cdot cm^2}$

Rayon de courbure et coefficient de dilatation de la soudure en fonction de la température

$$D := 4\cdot E_1\cdot E_2\cdot e_1\cdot e_2\cdot e_s^2 + \left(E_2\cdot e_2^2 - E_1\cdot e_1^2\right)^2 \qquad \mathrm{m} := \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2\cdot R_0}$$

$$M := (\alpha_2 - \alpha_1)\cdot(E_2\cdot e_2 - E_1\cdot e_1) - \mathrm{m}\cdot\left(E_2\cdot e_2^2 + E_1\cdot e_1^2\right) \qquad \mathrm{m} = 3.786\times 10^{-4}\,m^{-1}$$

$$N := \frac{3}{2}\cdot(\alpha_2 - \alpha_1)\cdot\left(E_2\cdot e_2^2 + E_1\cdot e_1^2\right) - 2\cdot\mathrm{m}\cdot\left(E_2\cdot e_2^3 - E_1\cdot e_1^3\right) \qquad D = 2.631\times 10^9\,m^4\,Pa^2$$

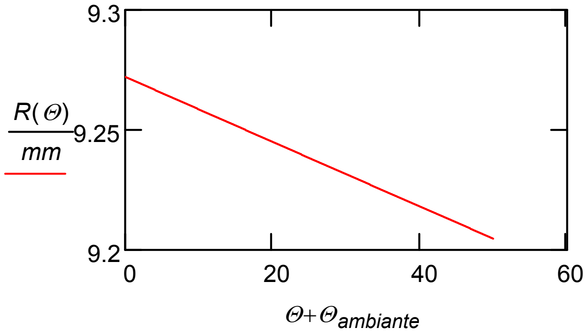
$$y(\Theta) := \frac{2\cdot N\cdot(E_2\cdot e_2 + E_1\cdot e_1) - 3\cdot M\cdot\left(E_2\cdot e_2^2 - E_1\cdot e_1^2\right)}{D}\cdot\Theta \qquad y(\Theta) = 0.523\,m^{-1}$$

$$z(\Theta) := \frac{2\cdot M\cdot\left(E_2\cdot e_2^3 + E_1\cdot e_1^3\right) - N\cdot\left(E_2\cdot e_2^2 - E_1\cdot e_1^2\right)}{D}\cdot\Theta \qquad z(\Theta) = -2.09\times 10^{-5}$$

$$x(\Theta) := y(\Theta) - \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2\cdot R_0}\cdot\Theta \qquad g(\Theta) := z(\Theta) + \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2}\cdot\Theta \qquad x(\Theta) = 0.474\,m^{-1}$$

$$R(\Theta) := \left(x(\Theta) + \frac{1}{R_0}\right)^{-1} \qquad R(\Theta) = 9.20465\,mm \qquad \frac{g(\Theta)}{\Theta} = 1.43 \times 10^{-5}$$

$\Theta := -20, -19.9 .. 30$



Formules approchées

$\Theta := 30$

$$y_a(\Theta) := 6\cdot(\alpha_2 - \alpha_1)\cdot\frac{E_1\cdot E_2\cdot e_1\cdot e_2\cdot e_s}{4\cdot E_1\cdot E_2\cdot e_1\cdot e_2\cdot e_s^2 + \left(E_2\cdot e_2^2 - E_1\cdot e_1^2\right)^2}\cdot\Theta \qquad y_a(\Theta) = 0.52497\,m^{-1}$$

$$z_a(\Theta) := \frac{1}{2}\cdot(\alpha_2 - \alpha_1)\cdot\frac{E_2^2\cdot e_2^4 - E_1^2\cdot e_1^4 + 4\cdot E_1\cdot E_2\cdot e_1\cdot e_2\cdot e_s\cdot(e_1 - e_2)}{4\cdot E_1\cdot E_2\cdot e_1\cdot e_2\cdot e_s^2 + \left(E_2\cdot e_2^2 - E_1\cdot e_1^2\right)^2}\cdot\Theta \qquad z_a(\Theta) = -1.926 \times 10^{-5}$$

$$x_a(\Theta) := y_a(\Theta) - \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2\cdot R_0}\cdot\Theta \qquad g_a(\Theta) := z_a(\Theta) + \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2}\cdot\Theta \qquad x_a(\Theta) = 0.476\,m^{-1}$$

$$R_a(\Theta) := \left(x_a(\Theta) + \frac{1}{R_0}\right)^{-1} \qquad R_a(\Theta) = 9.20447\,mm \qquad \frac{g_a(\Theta)}{\Theta} = 1.436 \times 10^{-5}$$

Formule de Villarceau

$$\frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2\cdot R_0}\cdot\Theta = 0.049\,m^{-1} \qquad y_a(\Theta) = 0.52497\,m^{-1} \qquad x_v(\Theta) := y_a(\Theta)$$

$$R_v(\Theta) := \left(x_v(\Theta) + \frac{1}{R_0}\right)^{-1} \qquad R_v(\Theta) = 9.20035\,mm$$

$\Theta := -20, -19.9 .. 30$