

Estimation des pertes Cuivre dans un bobinage

Determination de la résistance.

1. Fil émaillé :

Données physiques sur les matériaux

Données géométriques sur le bobinage :

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

$$\sigma_{\text{Cu}_20} := 5.917 \cdot 10^7 \cdot \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}}$$

$$\epsilon_0 := \frac{1}{36 \cdot \pi \cdot 10^9}$$

Nombre de couches de bobinage :

$$N_c := 4$$

Infos sur le tore :

$$\Delta T := 0$$

$$\beta := 0.004$$

Hauteur du tore :

$$H_{\text{tore}} := 15.24 \cdot \text{mm}$$

$$\sigma_{\text{Cu}_20}^{-1} = 1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$x := 1..20$$

$$\sigma_{\text{Cu}} := \sigma_{\text{Cu}_20} \cdot (1 - \beta \cdot \Delta T)$$

Rayon interieur du tore :

$$r_{\text{int}} := 14.351 \cdot \text{mm}$$

Fréquence de fonctionnement :

Rayon exterieur du tore :

$$r_{\text{ext}} := 23.368 \cdot \text{mm}$$

Données sur la nature du bobinage

$$k := 1..80$$

$$f_0 := 10$$

$$f_k := f_0 \cdot \left(1 + \frac{k}{10}\right) \cdot \text{Hz}$$

$$\omega_k := 2 \cdot \pi \cdot f_k$$

Nombre de spires

$$Ns := (2 \ 6 \ 8 \ 16)^T$$

$$N_{\text{cond}} := 3$$

$$\text{Sign} := (1 \ 1 \ 1 \ -1)^T$$

Nombre de brins de Litz par fil

$$Nb := (1 \ 1 \ 1 \ 1)^T$$

Diamètre du fil de Litz utilisé :

$$\phi_{\text{Litz}} := 3.2 \cdot \text{mm}$$

Diamètre d'un brin équivalent :

$$\phi_{\text{Brin}} := 2.17 \cdot \text{mm}$$

Diamètre d'un fil émaillé :

$$\phi_{\text{émaillé}} := \phi_{\text{Brin}}$$

Diamètre total d'un fil émaillé :

$$\phi_{\text{émaillé_tot}} := \phi_{\text{Litz}}$$

Diam := for $i \in 1.. \text{length}(Ns)$
 | temp_i ← ϕ_{Litz} if $Nb_i > 1$
 | temp_i ← $\phi_{\text{émaillé_tot}}$ otherwise
 | temp

$\phi :=$ for $i \in 1.. \text{length}(Ns)$
 | temp_i ← ϕ_{Brin} if $Nb_i > 1$
 | temp_i ← $\phi_{\text{émaillé}}$ otherwise
 | temp

$$\text{Diam}^T = (3.2 \ 3.2 \ 3.2 \ 3.2) \text{mm}$$

$$\phi^T = (2.17 \ 2.17 \ 2.17 \ 2.17) \text{mm}$$

Etape 1 : Transformation des fils de Litz en plaques de Dowell

Longueur moyenne d'une couche de bobinage :

Hauteur de la fenêtre de bobinage:

$$l := \begin{cases} \text{for } i \in 1..3 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow 2 \cdot \pi \cdot \left[r_{\text{int}} - \left(\sum_{k=i}^3 \text{Diam}_k \right) + \left(\frac{1}{2} \text{Diam} \right)_i \right] \\ \text{for } i \in 4 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow 2 \cdot \pi \cdot \left[r_{\text{ext}} + \left[\sum_{k=4}^i \left(\frac{1}{2} \text{Diam} \right)_k \right] \right] \end{cases}$$

$$H_{\text{fen}} := \begin{cases} \text{for } i \in 1..3 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow H_{\text{tore}} + 2 \cdot i \cdot \phi_{\text{Litz}} \\ \text{for } i \in 4 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow H_{\text{tore}} + 2 \cdot \phi_{\text{Litz}} \end{cases}$$

$$H_{\text{fen}}^T = (21.64 \ 28.04 \ 34.44 \ 21.64) \text{ mm}$$

$$l^T = (39.905 \ 60.011 \ 80.117 \ 156.879) \text{ mm}$$

Determination des grandeurs a (coté carré), b (écart 2 plaques) et c (écart entre 2 plaques de 2 couches)

$$a := \frac{\phi \cdot \sqrt{\pi}}{2}$$

$$a^T = (1.923 \ 1.923 \ 1.923 \ 1.923) \text{ mm}$$

épaisseur d'une plaque de Dowell (<=> 1couche de brins)

Hauteur équivalente aux conducteurs carrés réunis :

$$h_c := \overrightarrow{(\sqrt{Nb} \cdot a)}$$

$$h_c^T = (1.923 \ 1.923 \ 1.923 \ 1.923) \text{ mm}$$

Etape 2 : Adaptation de la conductivité électrique des plaques

$$\sigma_{\text{Dowell}} := \overrightarrow{\left(\frac{Ns \cdot N_{\text{cond}} \cdot \sigma_{\text{Cu}} \cdot \sqrt{\pi \cdot Nb \cdot \phi}}{2 \cdot l} \right)}$$

$$\sigma_{\text{Dowell}}^T = \begin{pmatrix} 1.711 \times 10^7 & 3.413 \times 10^7 & 3.409 \times 10^7 & 3.482 \times 10^7 \end{pmatrix} \frac{\text{s}^3 \text{A}^2}{\text{kg m}^3}$$

Valeur de l'épaisseur de pénétration en fonction de la fréquence et de la conductivité

$$\delta(\omega) := \left(\sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma_{\text{Dowell}}}} \right)$$

$$\delta(\omega_{40})^T = (0.385 \ 0.272 \ 0.273 \ 0.27) \text{ mm}$$

Etape 4 : corrélation entre champ et géométrie

$$I_{\text{ref}} := 50\sqrt{2} \cdot A$$

$$I := (I_{\text{ref}} \ I_{\text{ref}} \ I_{\text{ref}} \ I_{\text{ref}})^T$$

Rapport entre les champs propres, de proximité et champ crée par enroulement

Champ propre : Hs

Champ de proximité : Hp

$$H_{\text{propre}} := \begin{array}{|l} \text{for } i \in 2.. \text{length}(\text{Ns}) \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\text{Sign}_i \cdot \text{Ns}_i \cdot I_i}{l_i} + \sum_{k=2}^i \text{Sign}_{k-1} \cdot \text{Ns}_{k-1} \cdot I_{k-1} \cdot \left(\frac{1}{l_i} - \frac{1}{l_{i-1}} \right) \right] \\ \quad \text{temp}_1 \leftarrow \frac{\text{Ns}_1 \cdot I_1}{2 \cdot l_1} \\ \quad \text{temp} \end{array}$$

$$H_{\text{prox}} := \begin{array}{|l} \text{for } i \in 2.. \text{length}(\text{Ns}) \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\text{Sign}_i \cdot \text{Ns}_i \cdot I_i}{l_i} + \sum_{k=2}^i \text{Sign}_{k-1} \cdot \text{Ns}_{k-1} \cdot I_{k-1} \cdot \left(\frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_{i-1}} \right) \right] \\ \quad \text{temp}_1 \leftarrow \frac{\text{Ns}_1 \cdot I_1}{2 \cdot l_1} \\ \quad \text{temp} \end{array}$$

$$H_{\text{propre}}^T = \begin{pmatrix} 1.772 \times 10^3 & 2.941 \times 10^3 & 2.348 \times 10^3 & -7.061 \times 10^3 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$H_{\text{prox}}^T = \begin{pmatrix} 1.772 \times 10^3 & 6.485 \times 10^3 & 1.177 \times 10^4 & 7.061 \times 10^3 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$(H_{\text{propre}} + H_{\text{prox}})^T = \begin{pmatrix} 3.544 \times 10^3 & 9.426 \times 10^3 & 1.412 \times 10^4 & -9.095 \times 10^{-13} \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$(H_{\text{propre}} - H_{\text{prox}})^T = \begin{pmatrix} 0 & -3.544 \times 10^3 & -9.426 \times 10^3 & -1.412 \times 10^4 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Etape 5 : Puissance active et réactive pour une plaque

$$P(\omega) := \left[\frac{H_{\text{fen}} \cdot l}{\sigma_{\text{Dowell}} \cdot \sqrt{Nb} \cdot a} \cdot \left[\left(H_{\text{propre}} \right)^2 \cdot \frac{a}{\delta(\omega)} \cdot \frac{\sinh\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right) + \sin\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right)}{\cosh\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right) - \cos\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right)} + \left(\frac{Nb-1}{3} \cdot H_{\text{propre}}^2 + Nb \cdot H_{\text{prox}}^2 \right) \cdot \frac{a}{\delta(\omega)} \cdot \frac{\sinh\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right) - \sin\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right)}{\cosh\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right) + \cos\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right)} \right] \right]$$

$$Pt(\omega) := \left(\sum_{i=1}^{N_c} P(\omega)_i \right)$$

Calcul de la puissance dissipée dans les conducteurs horizontaux

$$Nt_{\text{spire}} := (16 \ 16)^T$$

$$Nbrin := (1 \ 1)^T$$

$$\phi_{\text{brin}} := (2.17 \ 2.17)^T \cdot \text{mm}$$

$$R_{\text{int}} := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot l_1$$

$$R_{\text{ext}} := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot l_3$$

$$a := \frac{\phi_{\text{brin}} \cdot \sqrt{\pi}}{2}$$

$$R_{\text{int}} = 6.351 \text{mm}$$

$$R_{\text{ext}} = 12.751 \text{mm}$$

$$a = \begin{pmatrix} 1.923 \\ 1.923 \end{pmatrix} \text{mm}$$

$$\sigma_{\text{Dowell_vert}}(r) := \frac{Nt_{\text{spire}} \cdot N_{\text{cond}} \cdot \sigma_{\text{Cu}} \cdot \sqrt{\pi} \cdot Nbrin \cdot \phi_{\text{brin}}}{4 \cdot \pi \cdot r}$$

$$\delta(\omega, r) := \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma_{\text{Dowell_vert}}(r)}}$$

$$\sigma_{\text{Dowell_vert}}(\text{Rint}) = \begin{pmatrix} 1.369 \times 10^8 \\ 1.369 \times 10^8 \end{pmatrix} \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}}$$

$$\delta_{\text{prime}} := (1 \ -1)^T$$

$$\text{I} := (\text{Iref} \ \text{Iref})^T$$

Rapport entre les champs propres, de proximité et champ crée par enroulement

Champ propre : Hs

$$\text{H}_{\text{propre}}(r) := \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..2 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow \frac{\delta_{\text{prime}_i} \cdot \text{Nt_spire}_i \cdot \text{I}_i}{4 \cdot \pi \cdot r} \\ \text{temp} \end{array}$$

$$\text{H}_{\text{propre}}\left(\frac{\text{Rint} + \text{Rext}}{2}\right) = \begin{pmatrix} 9.426 \times 10^3 \\ -9.426 \times 10^3 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$\text{H}_{\text{propre}}(\text{Rint}) = \begin{pmatrix} 1.418 \times 10^4 \\ -1.418 \times 10^4 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Champ de proximité : Hp

$$\text{H}_{\text{prox}}(r) := \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..2 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow \frac{\delta_{\text{prime}_i} \cdot \text{Nt_spire}_i \cdot \text{I}_i}{4 \cdot \pi \cdot r} \\ \text{temp} \end{array}$$

$$\text{H}_{\text{prox}}\left(\frac{\text{Rint} + \text{Rext}}{2}\right) = \begin{pmatrix} 9.426 \times 10^3 \\ -9.426 \times 10^3 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$\text{H}_{\text{prox}}(\text{Rint}) = \begin{pmatrix} 1.418 \times 10^4 \\ -1.418 \times 10^4 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$\text{H}_{\text{fen}}(r) := 2 \cdot \pi \cdot r$$

Etape 5 : Puissance active et réactive pour une plaque

$$P(\omega, r) := \left[\frac{H_{fen}(r)}{\sigma_{Dowell_vert}(r) \cdot \sqrt{Nbrin} \cdot \delta(\omega, r)} \cdot \left[\left(H_{propre}(r) \right)^2 \cdot \frac{\sinh\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right) + \sin\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right)}{\cosh\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right) - \cos\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right)} + \left(\frac{Nbrin - 1}{3} \cdot H_{propre}(r)^2 + Nbrin \cdot H_{prox}(r)^2 \right) \cdot \frac{\sinh\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right) - \sin\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right)}{\cosh\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right) + \cos\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right)} \right] \right]$$

$$P1(\omega) := \int_{Rint}^{Rext} P(\omega, r)_1 \, dr$$

$$P2(\omega) := \int_{Rint}^{Rext} P(\omega, r)_2 \, dr$$

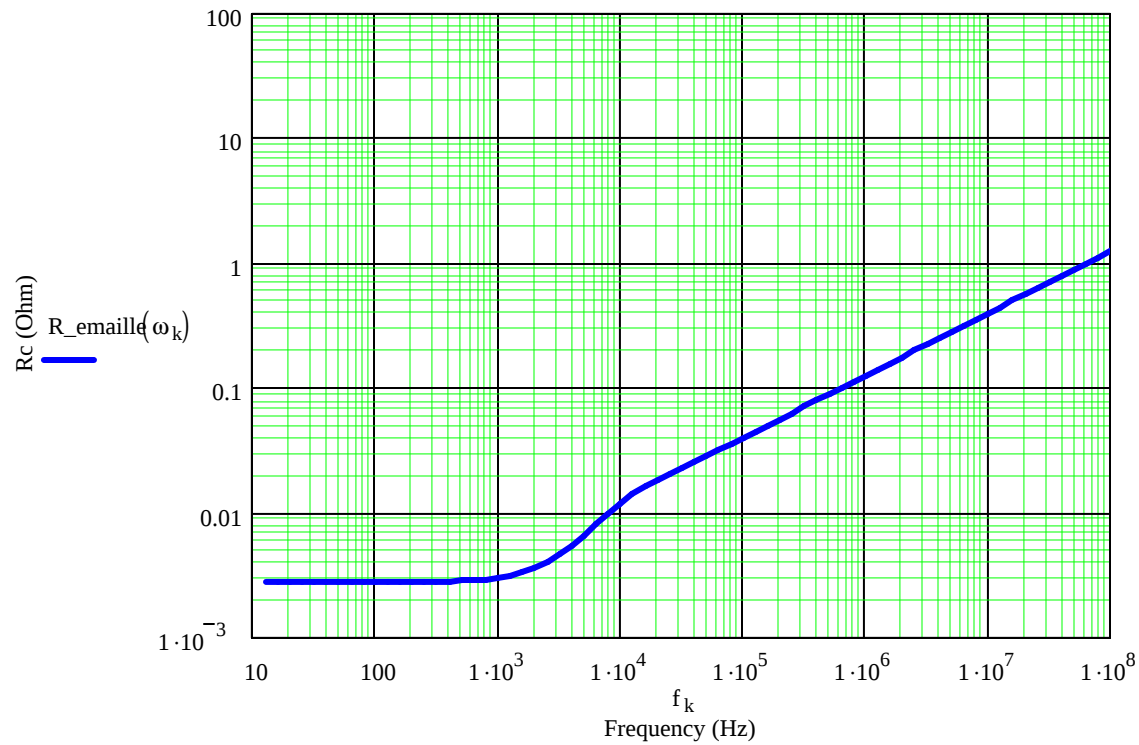
$$P1(\omega_1) = 0.39W$$

$$Pt(\omega_{40}) = 88.734W$$

$$P_hor(\omega) := 2 \cdot P1(\omega)$$

$$Pfinal1(\omega) := Pt(\omega) + P_hor(\omega)$$

$$R_emaille(\omega) := 2 \cdot \frac{Pfinal1(\omega)}{Iref^2}$$



$$R_{\text{emaillé}}(\omega_1) = 2.763 \times 10^{-3} \Omega$$

Vérification:

Valeur de R en continue:

$$H_{\text{fen}} := 15.29 \text{ mm}$$

$$l_{\text{spire}} := 2 \cdot (H_{\text{fen}} + R_{\text{ext}} - R_{\text{int}}) \cdot 25$$

$$R_{\text{con}} := \frac{l_{\text{spire}}}{\sigma_{\text{Cu}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_{\text{brin}}}{2} \right)^2 \cdot N_{\text{brin}}}$$

$$l_{\text{spire}} = 1.085 \text{ m}$$

$$R_{\text{con}} = 2.478 \times 10^{-3} \Omega$$

2. Fil de Litz :

Données sur la nature du bobinage

Nombre de spires

$$N_s := (2 \ 6 \ 8 \ 16)^T$$

$$N_{\text{cond}} := 3$$

$$\text{Sign} := (1 \ 1 \ 1 \ -1)^T$$

Nombre de brins de Litz par fil

$$N_b := (60 \ 60 \ 60 \ 60)^T$$

Diamètre du fil de Litz utilisé :

$$\phi_{\text{Litz}} := 3.2 \cdot \text{mm}$$

Diamètre d'un brin :

$$\phi_{\text{Brin}} := 0.28 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Diam} := \begin{array}{|l} \text{for } i \in 1.. \text{length}(N_s) \\ \quad \begin{array}{|l} \text{temp}_i \leftarrow \phi_{\text{Litz}} \text{ if } N_{b_i} > 1 \\ \text{temp}_i \leftarrow \phi_{\text{émaillé_tot}} \text{ otherwise} \end{array} \\ \text{temp} \end{array}$$

$$\phi := \begin{array}{|l} \text{for } i \in 1.. \text{length}(N_s) \\ \quad \begin{array}{|l} \text{temp}_i \leftarrow \phi_{\text{Brin}} \text{ if } N_{b_i} > 1 \\ \text{temp}_i \leftarrow \phi_{\text{émaillé}} \text{ otherwise} \end{array} \\ \text{temp} \end{array}$$

$$\text{Diam}^T = (3.2 \ 3.2 \ 3.2 \ 3.2) \text{mm}$$

$$\phi^T = (0.28 \ 0.28 \ 0.28 \ 0.28) \text{mm}$$

Etape 1 : Transformation des fils de Litz en plaques de Dowell

Longueur moyenne d'une couche de bobinage :

Hauteur de la fenêtre de bobinage:

$$l := \begin{cases} \text{for } i \in 1..3 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow 2 \cdot \pi \cdot \left[r_{\text{int}} - \left(\sum_{k=i}^3 \text{Diam}_k \right) + \left(\frac{1}{2} \text{Diam} \right)_i \right] \\ \text{for } i \in 4 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow 2 \cdot \pi \cdot \left[r_{\text{ext}} + \left[\sum_{k=4}^i \left(\frac{1}{2} \text{Diam} \right)_k \right] \right] \end{cases}$$

$$H_{\text{fen}} := \begin{cases} \text{for } i \in 1..3 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow H_{\text{tore}} + 2 \cdot i \cdot \phi_{\text{Litz}} \\ \text{for } i \in 4 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow H_{\text{tore}} + 2 \cdot \phi_{\text{Litz}} \end{cases}$$

$$H_{\text{fen}}^T = (21.64 \ 28.04 \ 34.44 \ 21.64) \text{ mm}$$

$$l^T = (39.905 \ 60.011 \ 80.117 \ 156.879) \text{ mm}$$

$$a := \frac{\phi \cdot \sqrt{\pi}}{2}$$

$$a^T = (0.248 \ 0.248 \ 0.248 \ 0.248) \text{ mm}$$

Hauteur équivalente aux conducteurs carrés réunis :

$$h_c := \overrightarrow{(\sqrt{Nb} \cdot a)}$$

$$h_c^T = (1.922 \ 1.922 \ 1.922 \ 1.922) \text{ mm}$$

Etape 2 : Adaptation de la conductivité électrique des plaques

$$\sigma_{\text{Dowell}} := \overrightarrow{\left(\frac{Ns \cdot N_{\text{cond}} \cdot \sigma_{\text{Cu}} \cdot \sqrt{\pi \cdot Nb} \cdot \phi}{2 \cdot l} \right)}$$

$$\sigma_{\text{Dowell}}^T = \begin{pmatrix} 1.71 \times 10^7 & 3.411 \times 10^7 & 3.407 \times 10^7 & 3.48 \times 10^7 \end{pmatrix} \frac{\text{s}^3 \text{A}^2}{\text{kg m}^3}$$

Valeur de l'épaisseur de pénétration en fonction de la fréquence et de la conductivité

$$\delta(\omega) := \left(\sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma_{\text{Dowell}}}} \right)$$

$$\delta(\omega_{40})^T = (0.385 \ 0.272 \ 0.273 \ 0.27) \text{ mm}$$

$$I_{\text{ref}} := 50 \cdot \sqrt{2} \cdot A$$

$$I := (I_{\text{ref}} \ I_{\text{ref}} \ I_{\text{ref}} \ I_{\text{ref}})^T$$

Rapport entre les champs propres, de proximité et champ crée par enroulement

Champ de proximité : Hp

Champ propre : Hs

$$H_{\text{prox}} := \begin{array}{l} \text{for } i \in 2.. \text{length}(\text{Ns}) \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\text{Sign}_i \cdot \text{Ns}_i \cdot I_i}{l_i} + \sum_{k=2}^i \text{Sign}_{k-1} \cdot \text{Ns}_{k-1} \cdot I_{k-1} \cdot \left(\frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_{i-1}} \right) \right] \\ \quad \text{temp}_1 \leftarrow \frac{\text{Ns}_1 \cdot I_1}{2 \cdot l_1} \\ \text{temp} \end{array}$$

$$H_{\text{propre}} := \begin{array}{l} \text{for } i \in 2.. \text{length}(\text{Ns}) \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\text{Sign}_i \cdot \text{Ns}_i \cdot I_i}{l_i} + \sum_{k=2}^i \text{Sign}_{k-1} \cdot \text{Ns}_{k-1} \cdot I_{k-1} \cdot \left(\frac{1}{l_i} - \frac{1}{l_{i-1}} \right) \right] \\ \quad \text{temp}_1 \leftarrow \frac{\text{Ns}_1 \cdot I_1}{2 \cdot l_1} \\ \text{temp} \end{array}$$

$$H_{\text{propre}}^T = \begin{pmatrix} 1.772 \times 10^3 & 2.941 \times 10^3 & 2.348 \times 10^3 & -7.061 \times 10^3 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$H_{\text{prox}}^T = \begin{pmatrix} 1.772 \times 10^3 & 6.485 \times 10^3 & 1.177 \times 10^4 & 7.061 \times 10^3 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$(H_{\text{propre}} + H_{\text{prox}})^T = \begin{pmatrix} 3.544 \times 10^3 & 9.426 \times 10^3 & 1.412 \times 10^4 & -9.095 \times 10^{-13} \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$(H_{\text{propre}} - H_{\text{prox}})^T = \begin{pmatrix} 0 & -3.544 \times 10^3 & -9.426 \times 10^3 & -1.412 \times 10^4 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Etape 5 : Puissance active et réactive pour une plaque

$$P(\omega) := \left[\frac{H_{\text{fen}} \cdot l}{\sigma_{\text{Dowell}} \cdot \sqrt{Nb} \cdot a} \cdot \left[\left(H_{\text{propre}} \right)^2 \cdot \frac{a}{\delta(\omega)} \cdot \frac{\sinh\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right) + \sin\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right)}{\cosh\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right) - \cos\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right)} + \left(\frac{Nb-1}{3} \cdot H_{\text{propre}}^2 + Nb \cdot H_{\text{prox}}^2 \right) \cdot \left(\frac{a}{\delta(\omega)} \cdot \frac{\sinh\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right) - \sin\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right)}{\cosh\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right) + \cos\left(\frac{a}{\delta(\omega)}\right)} \right) \right] \right]$$

$$P_t(\omega) := \left(\sum_{i=1}^{N_c} P(\omega)_i \right)$$

Calcul de la puissance dissipée dans les conducteurs horizontaux

$$N_{\text{t_spire}} := (16 \ 16)^T$$

$$N_{\text{brin}} := (60 \ 60)^T$$

$$\phi_{\text{brin}} := (0.28 \ 0.28)^T \cdot \text{mm}$$

$$R_{\text{int}} := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot l_1$$

$$R_{\text{ext}} := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot l_3$$

$$\sigma_{\text{Dowell_vert}}(r) := \frac{N_{\text{t_spire}} \cdot N_{\text{cond}} \cdot \sigma_{\text{Cu}} \cdot \sqrt{\pi} \cdot N_{\text{brin}} \cdot \phi_{\text{brin}}}{4 \cdot \pi \cdot r}$$

$$a := \frac{\phi_{\text{brin}} \cdot \sqrt{\pi}}{2}$$

$$a = \begin{pmatrix} 0.248 \\ 0.248 \end{pmatrix} \text{mm}$$

$$\sigma_{\text{Dowell_vert}}(R_{\text{int}}) = \begin{pmatrix} 1.368 \times 10^8 \\ 1.368 \times 10^8 \end{pmatrix} \frac{\text{s}^3 \text{A}^2}{\text{kg m}^3}$$

$$R_{int} = 6.351 \text{ mm}$$

$$\delta(\omega, r) := \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma_{\text{Dowell_vert}}(r)}}$$

$$R_{ext} = 12.751 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{prime}} := (1 \quad -1)^T$$

$$I := (I_{ref} \quad I_{ref})^T$$

Rapport entre les champs propres, de proximité et champ crée par enroulement

Champ de proximité : Hp

Champ propre : Hs

$$H_{\text{prox}}(r) := \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..2 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow \frac{\delta_{\text{prime}_i} \cdot Nt_spire_i \cdot I_i}{4 \cdot \pi \cdot r} \\ \text{temp} \end{array}$$

$$H_{\text{propre}}(r) := \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..2 \\ \quad \text{temp}_i \leftarrow \frac{\delta_{\text{prime}_i} \cdot Nt_spire_i \cdot I_i}{4 \cdot \pi \cdot r} \\ \text{temp} \end{array}$$

$$H_{\text{prox}}\left(\frac{R_{int} + R_{ext}}{2}\right) = \begin{pmatrix} 9.426 \times 10^3 \\ -9.426 \times 10^3 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$H_{\text{propre}}\left(\frac{R_{int} + R_{ext}}{2}\right) = \begin{pmatrix} 9.426 \times 10^3 \\ -9.426 \times 10^3 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$H_{\text{propre}}(R_{int})^T = \begin{pmatrix} 1.418 \times 10^4 & -1.418 \times 10^4 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$H_{\text{fen}}(r) := 2 \cdot \pi \cdot r$$

$$H_{\text{prox}}(R_{int})^T = \begin{pmatrix} 1.418 \times 10^4 & -1.418 \times 10^4 \end{pmatrix} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Etape 5 : Puissance active et réactive pour une plaque

$$P(\omega, r) := \left[\frac{H_{\text{fen}}(r)}{\sigma_{\text{Dowell_vert}}(r) \cdot \sqrt{N_{\text{brin}}} \cdot \delta(\omega, r)} \cdot \left[\left[\left(H_{\text{propre}}(r) \right)^2 \cdot \frac{\sinh\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right) + \sin\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right)}{\cosh\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right) - \cos\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right)} + \left(\frac{N_{\text{brin}} - 1}{3} \cdot H_{\text{propre}}(r)^2 + N_{\text{brin}} \cdot H_{\text{prox}}(r)^2 \right) \cdot \frac{\sinh\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right) - \sin\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right)}{\cosh\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right) + \cos\left(\frac{a}{\delta(\omega, r)}\right)} \right] \right] \right]$$

$$P1(\omega) := \int_{R_{\text{int}}}^{R_{\text{ext}}} P(\omega, r)_1 \, dr$$

$$P2(\omega) := \int_{R_{\text{int}}}^{R_{\text{ext}}} P(\omega, r)_2 \, dr$$

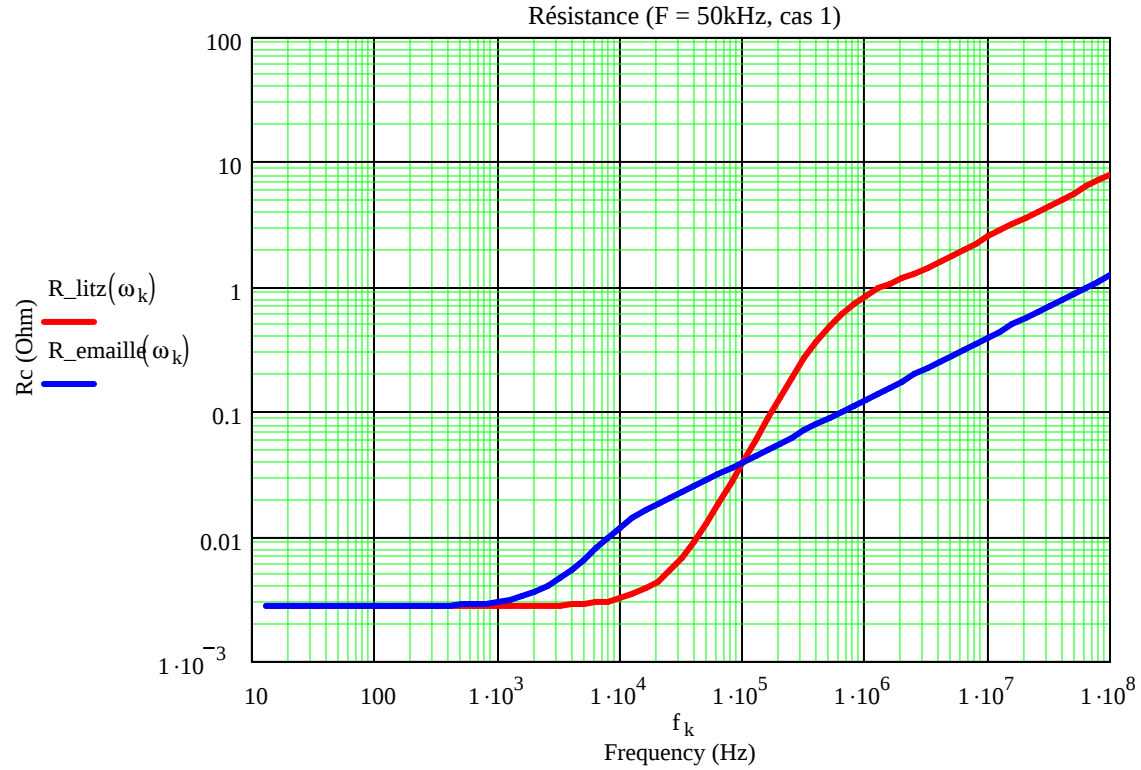
$$P_{\text{hor}}(\omega) := 2 \cdot P1(\omega)$$

$$P_{\text{final}}(\omega) := P_{\text{t}}(\omega) + P_{\text{hor}}(\omega)$$

$$R_{\text{litz}}(\omega) := 2 \cdot \frac{P_{\text{final}}(\omega)}{I_{\text{ref}}^2}$$

$$R_{\text{litz}}(\omega_1) = 2.766 \times 10^{-3} \, \Omega$$

$$P1(\omega_1) = 0.39 \text{ W}$$



$$P_{\text{final1}}(\omega_{40}) = 97.857W$$

$$P_{\text{final}}(\omega_{40}) = 100.515W$$

$$R_{\text{emaill}}(\omega_{40}) = 0.039\Omega$$

$$R_{\text{litz}}(\omega_{40}) = 0.04\Omega$$