



HAL
open science

Conception d'une interface d'électronique de puissance pour Pile à Combustible

Bang Viet Dang

► **To cite this version:**

Bang Viet Dang. Conception d'une interface d'électronique de puissance pour Pile à Combustible. Autre. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006. Français. NNT: . tel-00140765

HAL Id: tel-00140765

<https://theses.hal.science/tel-00140765>

Submitted on 10 Apr 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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 extérieur du tore :

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

Données sur la nature du bobinage

$$k := 1..80$$

$$f_0 := 10$$

$$f_k := f_0 \cdot 10^{\frac{k}{10}} \cdot \text{Hz}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

Longueur moyenne d'une couche de bobinage :

Hauteur de la fenêtre de bobinage:

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

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

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

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

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

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

$$\sigma_{\text{Dowell}}^T = \left(1.711 \times 10^7 \quad 3.413 \times 10^7 \quad 3.409 \times 10^7 \quad 3.482 \times 10^7 \right) \frac{\text{s}^3 \text{A}^2}{\text{kg m}^3}$$

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

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

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

Etape 4 : corrélation entre champ et géométrie

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

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

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

Champ propre : Hs

Champ de proximité : Hp

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

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

$$H_{\text{propre}}^T = \left(1.772 \times 10^3 \quad 2.941 \times 10^3 \quad 2.348 \times 10^3 \quad -7.061 \times 10^3 \right) \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

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

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

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

Etape 5 : Puissance active et réactive pour une plaque

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

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

Calcul de la puissance dissipée dans les conducteurs horizontaux

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

$$N_{\text{brin}} := (1 \ 1)^T$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Champ propre : Hs

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

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

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

Champ de proximité : Hp

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

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

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

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

Etape 5 : Puissance active et réactive pour une plaque

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

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

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

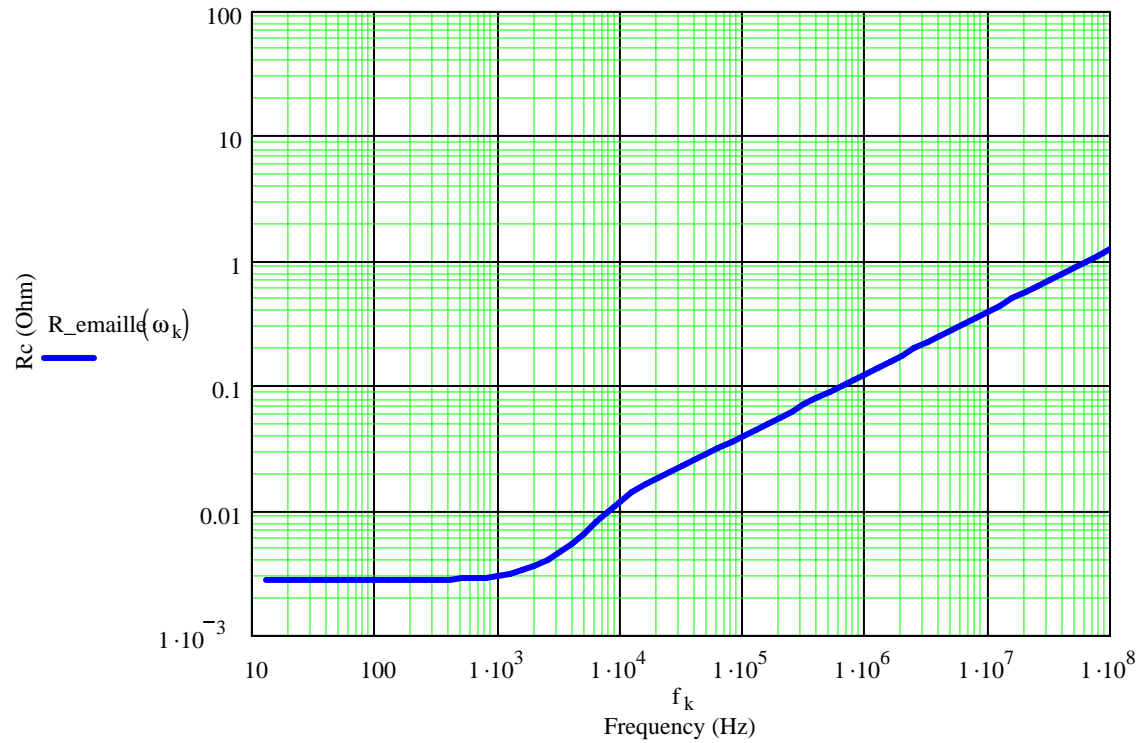
$$P1(\omega_1) = 0.39W$$

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

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

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

$$R_emaild(\omega) := 2 \cdot \frac{Pfinal(\omega)}{Iref^2}$$



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

Vérification:

Valeur de R en continu:

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

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

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

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

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

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 :

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

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

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

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

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

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

Longueur moyenne d'une couche de bobinage :

Hauteur de la fenêtre de bobinage:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\sigma_{\text{Dowell}}^T = \left(1.71 \times 10^7 \quad 3.411 \times 10^7 \quad 3.407 \times 10^7 \quad 3.48 \times 10^7 \right) \frac{\text{s}^3 \text{A}^2}{\text{kg m}^3}$$

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

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

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

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

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

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

Champ de proximité : Hp

Champ propre : Hs

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

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

$$H_{\text{propre}}^T = \left(1.772 \times 10^3 \quad 2.941 \times 10^3 \quad 2.348 \times 10^3 \quad -7.061 \times 10^3 \right) \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

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

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

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

Etape 5 : Puissance active et réactive pour une plaque

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

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

Calcul de la puissance dissipée dans les conducteurs horizontaux

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

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

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

$$Rint := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot l_1$$

$$Rext := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot l_3$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Champ de proximité : H_p

Champ propre : H_s

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

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

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

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

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

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

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

Etape 5 : Puissance active et réactive pour une plaque

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

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

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

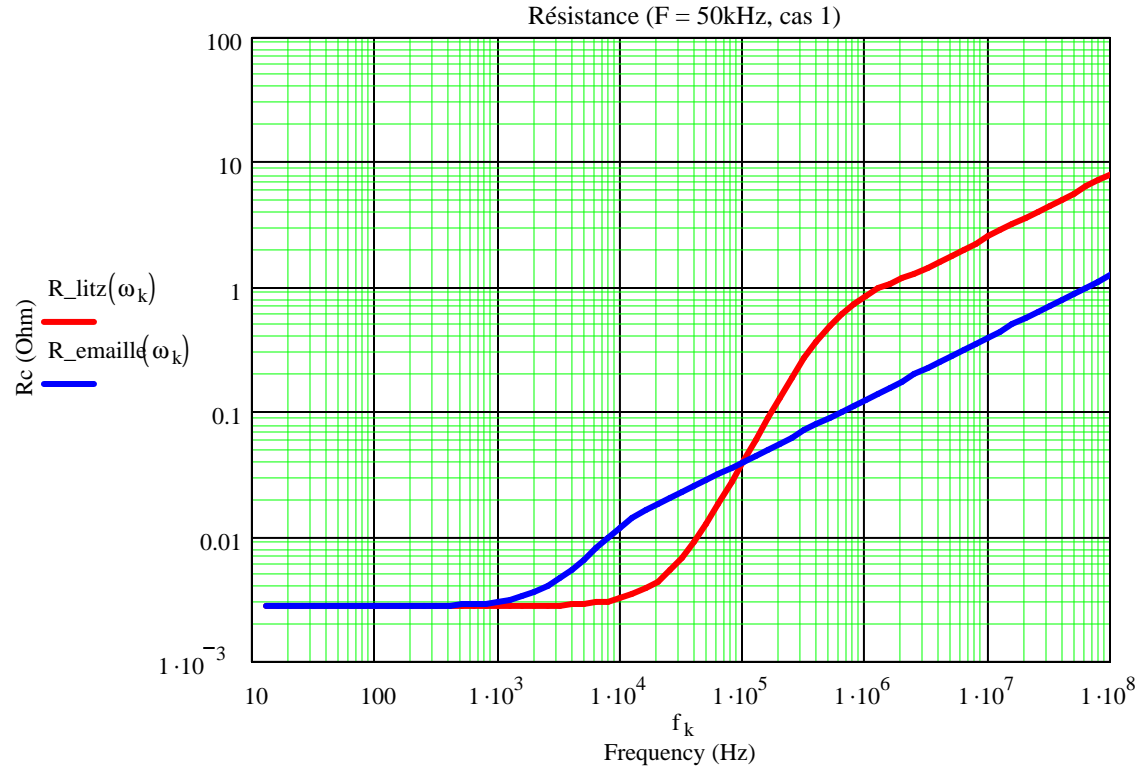
$$P_hor(\omega) := 2 \cdot P1(\omega)$$

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

$$R_litz(\omega) := 2 \cdot \frac{Pfinal(\omega)}{Iref^2}$$

$$R_litz(\omega_1) = 2.766 \times 10^{-3} \Omega$$

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



$P_{final}(\omega_{40}) = 97.857W$
 $P_{final}(\omega_{40}) = 100.515W$
 $R_{emaille}(\omega_{40}) = 0.039\Omega$
 $R_{litz}(\omega_{40}) = 0.04\Omega$