

Self à fer à circuit magnétique fermé

1) Définition

Il s'agit des selfs que l'on peut obtenir en bobinant un fil gainé d'isolant sur un mandrin lui aussi isolant et en disposant une carcasse en matériau magnétique pour refermer le flux.

Pour ce type de bobine la forme a peu d'influence sur les performances; par contre, le dimensionnement et le choix des matériaux sont primordiaux.

Toutes ces selfs peuvent peu ou prou se ramener à ça :

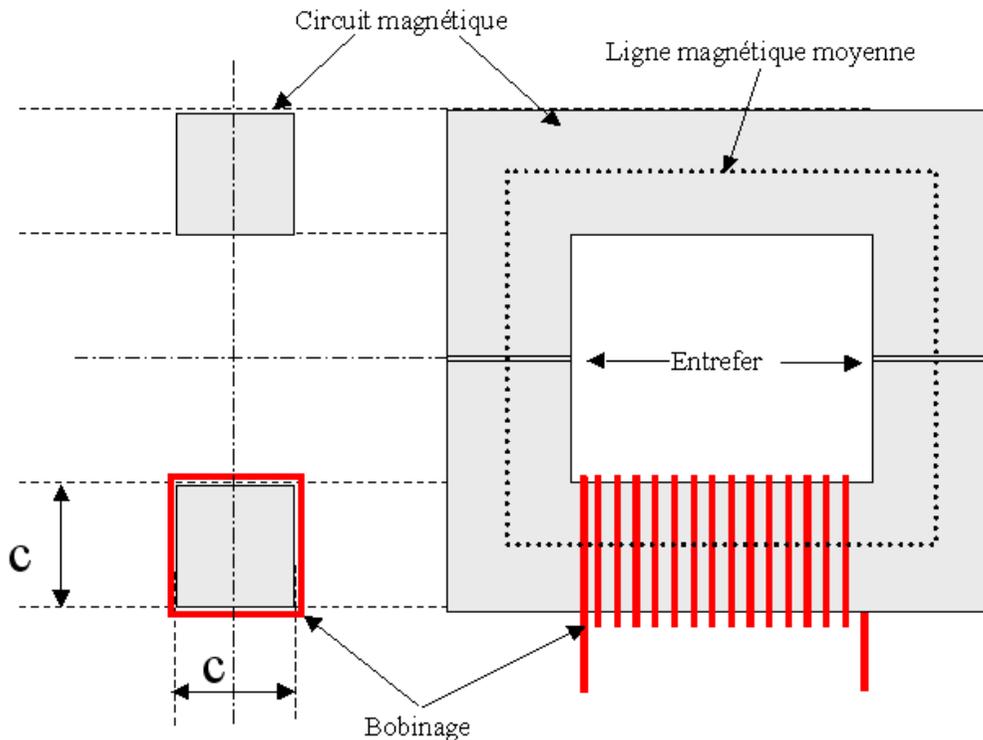


Fig 1

Formules utilisées :

1) Flux magnétique en webers pour une bobine de L henrys parcourue par I ampères:

$$\phi = L \cdot I$$

2) Flux magnétique en webers pour une bobine de N spires, sous une induction de B teslas et de noyau de section S:

$$\phi = N \cdot B \cdot S$$

3) Perméabilité relative équivalente μ_e d'un circuit magnétique fermé de ligne magnétique moyenne L_{mm} , avec un entrefer e_e et constitué d'un matériau de perméabilité relative μ_f

3-1 Formule exacte

$$\mu_e = \frac{1}{\frac{1}{\mu_f e} + \frac{e_e}{L_{mm}}}$$

3-2 Formule approchée :

$$\mu_e \sim \frac{L_{mm}}{e_e}$$

Nota: la perméabilité magnétique absolue μ se mesure en henrys/m. Dans nos calculs, sauf indication contraire nous utiliserons la perméabilité relative μ_r , rapport de la perméabilité absolue à celle du vide $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

4) Inductance en henrys d'une self de N spires bobinée sur un noyau fermé de section S, de ligne magnétique moyenne L_{mm} et de perméabilité équivalente μ_e :

$$L = \mu_0 \cdot \mu_e \cdot \frac{S \cdot N^2}{L_{mm}} \quad \text{Avec } \mu_0 \text{ perméabilité du vide (et de l'air)} \\ \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

2) Données physiques

Nota: le logiciel utilisé pour ce document utilise le point décimal au lieu de la virgule .

Pour éviter les erreurs, on ne travaillera qu'en unités SI, c'est à dire que les longueurs sont en mètres, les selfs en henrys, les masses en kg et les inductions en teslas.

J'ai besoin de connaître la puissance admissible en régime permanent du HP associé, son impédance nominale et sa puissance crête.

Je dois aussi choisir un cuivre pour mon fil. Si je choisis un cuivre à 99,9 %, j'ai la nuance ISO CU_ETP qui convient. La présence ou non d'oxygène n'a aucune importance.

Sa résistivité(ρ_{cu}) à 20°C est :

$$\rho_{cu} := 1.7241 \cdot 10^{-8} \quad (\Omega m) \quad \text{Son coefficient de température}(k_{tcu} \text{ est de:} \quad k_{tcu} := 3.9 \cdot 10^{-3} \quad (/^{\circ}C) \quad \text{Densité}(D_{cu}) \quad D_{cu} := 8890 \quad \text{kg/m}^3$$

Pour avoir des températures raisonnables on prendra une densité de courant (δ_{cu}) de 5 A/mm² , ce qui est une valeur raisonnable . Si on arrive à une résistance trop forte on pourra la réduire . En SI , ça donne :

$$\delta_{cu} := 5 \cdot 10^6 \quad (A/m^2)$$

Pour ces selfs, la méthode est totalement différente des selfs à air: nous avons en fait deux éléments à dimensionner :

Le diamètre du fil, pour passer le courant efficace et le circuit magnétique pour "passer" le flux. Le diamètre du fil dépend du courant efficace via une contrainte thermique alors que le noyau magnétique dépend de l'induction maximale, donc du courant crête instantané.

3) Procédure de dimensionnement :

- A) On définit le courant crête max, ce qui est la valeur pour lequel on ne veut pas que la self sature.
- B) Ce courant, ainsi que la valeur de la self permet de calculer le flux magnétique maximum.
- C) On calcule bien sûr le diamètre du fil pour un échauffement correct.
- D) Selon la fréquence d'utilisation de la self, on choisit le matériau magnétique. En gros, tôle fer/silicium pour la BF, ferrite pour les plus hautes fréquences. (le 3C 90 convient très bien)
- E) On "choisit" dans un catalogue constructeur un circuit magnétique. Les dimensions sont à peu près normalisées. Comme le calcul est itératif, ce premier choix n'est pas fondamental, mais avec un peu d'habitude, on tombe sur le bon du premier coup.
- F) On calcule avec le flux max et les caractéristiques du noyau le **nombre de spires minimal** pour "passer" le flux.
- G) On calcule avec les caractéristiques du noyau, l'entrefer à disposer pour obtenir la valeur de self souhaitée.
- H) Si on arrive à un entrefer négatif, on retourne à E en prenant la taille de circuit supérieure. S'il est trop grand (> à 10% de la ligne magnétique) , on retourne à E en prenant la valeur inférieure.

J) On vérifie enfin que le bobinage rentre bien dans le circuit .

Si on n'arrive pas à un compromis satisfaisant, ça veut dire que le couple valeur/courant n'est pas réalisable dans cette techno et qu'il faut se tourner vers d'autres structures, selfs à air on à noyau magnétique ouvert (barreau)

Un exemple

Données de départ : $P_{hp} := 80$ (W) $P_{hp_crete} := 400$ (W) $Z_{hp} := 8$ (Ω) $L_s := 5 \cdot 10^{-3}$ (5 mH)

Etape A : Courant crête que devra supporter la self sans saturer : $I_{hp_crete} := \sqrt{\frac{P_{hp_crete}}{Z_{hp}}}$ $I_{hp_crete} = 7.1$ (A)

Etape B : Flux max de la self : $\Phi_m := L_s \cdot I_{hp_crete}$ **(Formule 1)** $\Phi_m = 3.536 \times 10^{-2}$ (35 mWb)

Etape C : Section du fil : Courant thermique : $I_{th} := \sqrt{\frac{P_{hp}}{Z_{hp}}}$ $I_{th} = 3.162$ Section fil : $S_{fil} := \frac{I_{th}}{\delta_{cu}}$ $S_{fil} = 6.325 \times 10^{-7}$

Diamètre : $Diamètre := 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{fil}}{\pi}}$ $Diamètre = 8.974 \times 10^{-4}$ (0,9 mm)

Etape D : Choix du matériau magnétique :

Pour des raisons de commodité, en prendra pour cet exemple de la tôle au silicium archi classique. Toutefois, vu les fréquences à traiter, il faudra prendre une épaisseur de tôle plus faible que la tôle dite "50 Hz"

Il existe des matériaux plus performants qui permettraient d'obtenir de meilleures caractéristiques (nanocristallins ou Fe/Ni,) mais ils sont plus coûteux.

Pour ce Fe/Si, pas très performant, on essaiera d'éviter les zones trop saturées en limitant l'induction maxi à 1 T

Donc :

Selfs à circuit magnétique fermé et noyau magnétique

$B_{fe} := 1$ (Teslas)

Etape E : On choisit un format de circuit magnétique

section 1 cm² et de 20 cm de ligne magnétique moyenne :

$$A_e := 0.0001$$

$$L_{mm} := 0.2$$

Etape F : Le nombre de spires minimal devra être :

$$N_s := \frac{\Phi_m}{B_{fe} \cdot A_e}$$

(Formule 2)

$$N_s = 3.536 \times 10^2$$

354 spires

Etape G : On calcule maintenant la perméabilité effective dont on a besoin pour avoir la bonne valeur de self :

$$\mu_r := \frac{L_s \cdot L_{mm}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot A_e \cdot N_s^2} \quad \text{(Formule 4)} \quad \mu_r = 6.366 \times 10^1$$

Ce qui permet de calculer l'entrefer (Formule 3-2):

$$e_e := \frac{L_{mm}}{\mu_r}$$

$$e_e = 3.142 \times 10^{-3}$$

Donc 1,6 mm par côté

Etape H : En principe maintenant on devrait regarder si c'est meilleur avec la taille de circuit supérieure ou inférieure, et vérifier aussi que le bobinage rentre dans la fenêtre de 4cm x 4 mais vous avez compris le principe .

De même, si on veut favoriser une caractéristique particulière (masse, encombrement ,résistance, coût, distorsion ..) on peut faire un autre choix de matériau ou de format.

Caractéristiques principales :

Section bobinage : $S_b := N_s \cdot \text{Diamètre}^2$

Dimension fenêtre : 4 x 4 cm $L_1 := 0.04$

Epaisseur bobinage : $E_b := \frac{S_b}{4 \cdot L_1}$ $E_b = 1.779 \times 10^{-3}$

Spire moyenne $S_m := 4 \cdot (\sqrt{A_e} + E_b)$

Longueur de fil : $Long := S_m \cdot N_s$ $Long = 16.7$ (m)

Masse de cuivre: $P_s := S_{fil} \cdot Long \cdot D_{cu}$ $P_s = 0.094$ (kg)

Résistance : $R_s := \rho_{cu} \cdot \frac{Long}{S_{fil}}$ $R_s = 0.454$ (Ω)

Masse de Fer $M_{fe} := 2 \cdot A_e \cdot 0.1 \cdot 7600$ $M_{fe} = 1.52 \times 10^{-1}$ (152 g)

Masse totale : $P_s + M_{fe} = 0.246$ (246 g)

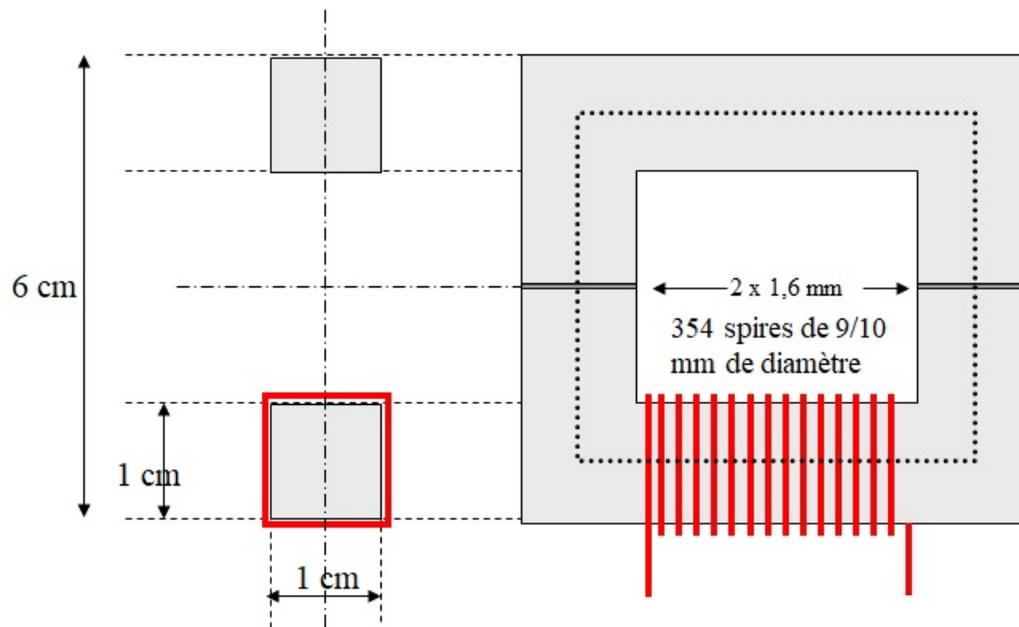


Fig 2

5) Discussion

Avantages :

Ces selfs ont pour avantage principal d'utiliser peu de cuivre pour réaliser une inductance donnée. Donc c'est celles qui donneront la résistance série la plus faible.

Elles ont également un circuit magnétique fermé, donc un flux de fuite faible, ce qui donnera peu de couplage avec les autres composants.

Par contre, elles devront être réalisées avec soin et le choix des matériaux n'est pas neutre dans le résultat.

On utilisera des circuits en tôle fer/silicium uniquement pour les très basses fréquences, sinon il faut passer au fer/cobalt ou au fer/nickel (cher)

Pour les fréquences plus élevées, la ferrite s'impose, avec l'inconvénient d'une induction utilisable plus basse et d'un coût non négligeable.

Il existe des profils et assemblages normalisés.

En ferrite, la meilleure géométrie est celle du pot fermé, mais c'est assez cher.

Il faut bobiner en utilisant toute la longueur du circuit et si possible recouvrir les entrefers.

A cause de la présence du circuit magnétique, il faudra s'assurer d'un entrefer suffisant pour que les non linéarités du matériau soient ramenées à des valeurs négligeables.

On essaiera d'évaluer quantitativement la distorsion introduite par ces phénomènes.

Inconvénients :

Le principal est que le dimensionnement se fait par itérations et dépend des circuits magnétiques disponibles

6) Estimation de la distorsion d'une telle self :

Les matières constituant le circuit magnétique sont non linéaires et les selfs qui les utilisent et sont souvent rejetées par les puristes au nom des distorsions introduites.

Pour avoir un avis sur le sujet, il faut savoir de quoi on parle et surtout de **combien**.

Je vous propose donc ce calcul, dans le cas de la self que nous avons dimensionnée. A cause de la forme des non linéarités, le calcul exact est très ardu.

Par contre, en faisant quelques approximations, on peut avoir un bon ordre de grandeur.

Dans le cas du fer/silicium utilisé plus haut, la courbe qui représente l'induction en fonction du champ appliqué a l'allure suivante : (Fig 3)

Fig 3

■ Cycle d'hystérésis : exemple FeSi NO M330-35A

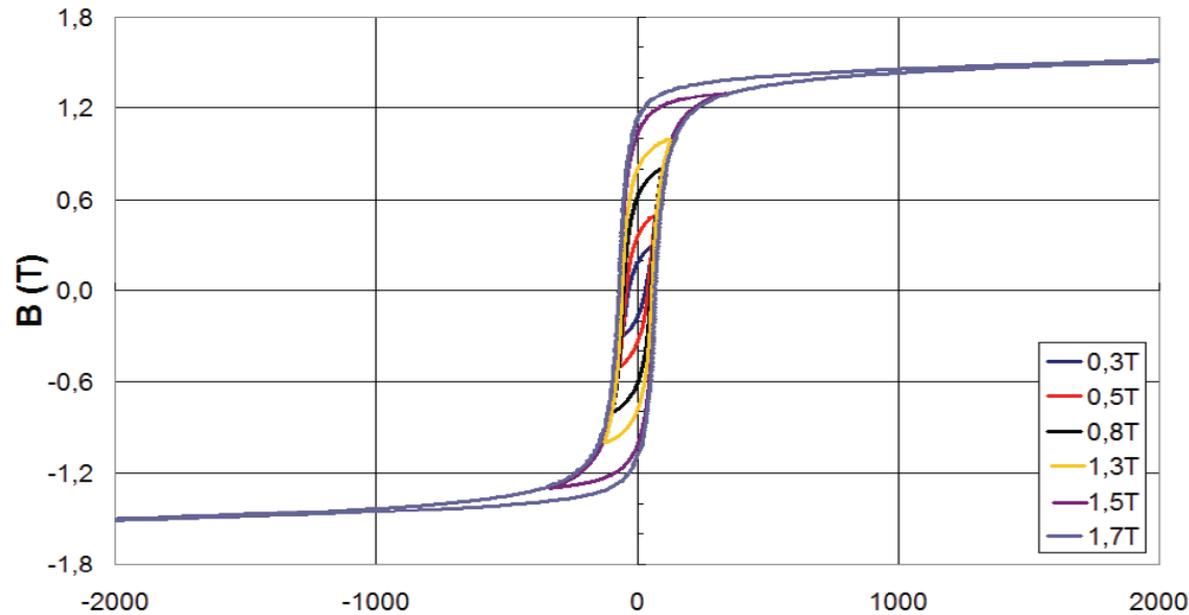
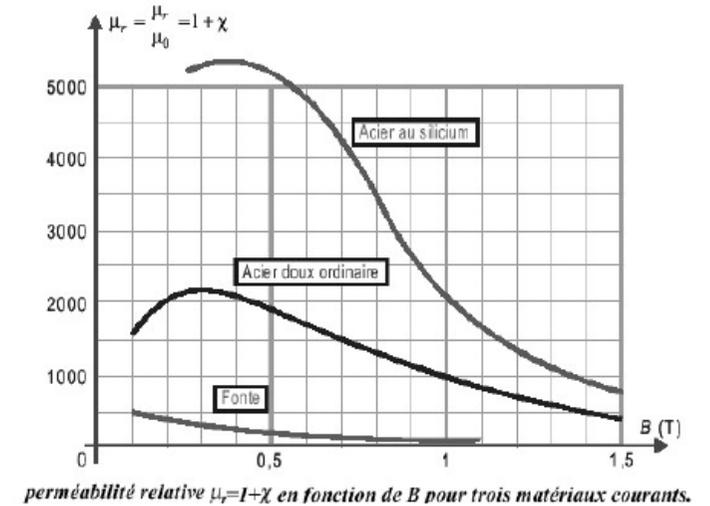


Fig 4



La grandeur qui nous intéresse parce qu'elle intervient dans la valeur de la self est la perméabilité (incrémentale) qui est la dérivée, c'est à dire sur le graphe de la fig 3 la pente de la courbe. On extrapole pour avoir le cycle à 1 T, qui n'a pas été tracé (manque de pot !)
Le calcul donne la courbe de la fig 4 (celle du haut pour le fer/Si)

On va se simplifier la vie en disant que la perméabilité est constante et égale à 5500 de 0 à 0,5 T et ensuite qu'elle décroît linéairement pour atteindre 2000 à 1 T, notre valeur max . D'où :

- Perméabilité max du fer silicium $\mu_{fmax} := 5500$ (de 0 à 0.5 T)
- Perméabilité min du fer silicium $\mu_{fmin} := 2000$ (à 1 T)

Mais ce qui compte pour nous est la perméabilité totale du circuit magnétique, entrefer compris, qui se calcule comme suit :

$$\text{Perméabilité max du circuit : } \mu_{\text{rmax}} := \frac{1}{\frac{1}{\mu_{\text{femax}}} + \frac{ee}{L_{\text{mm}}}} \quad \text{Perméabilité min du circuit : } \mu_{\text{rmin}} := \frac{1}{\frac{1}{\mu_{\text{femin}}} + \frac{ee}{L_{\text{mm}}}} \quad (\text{Formule 3-1})$$

(ee est l'épaisseur de l'entrefer et Lmm la longueur moyenne du circuit magnétique)

On peut maintenant calculer la variation de la self de 0 à 10 A :

$$100 \cdot \left[\left(\frac{\mu_{\text{rmin}}}{\mu_{\text{rmax}}} \right) - 1 \right] = -1.963 \quad \%$$

Maintenant, la question est de savoir quelle influence aura une self qui varie de 1,27% sur le signal. On va encore se simplifier la vie en appliquant un courant sinus à notre self et en calculant la tension qui en résulte. On prendra une période à 100 Hz avec une amplitude de 10 A. Ensuite, il suffira de faire la FFT de cette tension pour calculer la distorsion.

$$F_r := 100$$

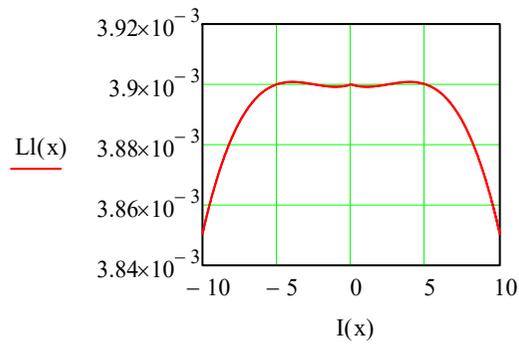
On va définir notre courant avec 1024 points, ce qui est largement suffisant :

$$I(x) := 10 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{1024}\right) \quad \text{Temps}(x) := \frac{x}{1024 \cdot F_r} \quad x := 0, 1 \dots 1023$$

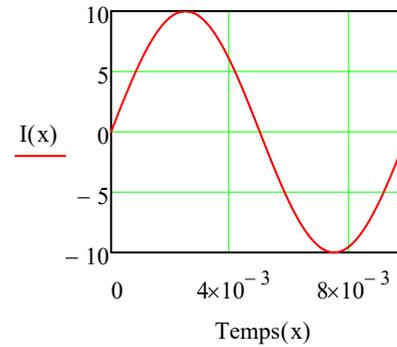
Encore pour se simplifier la vie, il est judicieux de représenter la valeur de la self en fonction du courant par une approximation polynomiale

$$\text{Une approximation du 3ème degré est suffisante, voici l'allure : } L1(x) := -0.00000013208 \cdot (|I(x)|)^3 + 0.0000009906 \cdot I(x)^2 - 0.000001651 \cdot |I(x)| + 0.0039$$

Selfs à circuit magnétique fermé et noyau magnétique



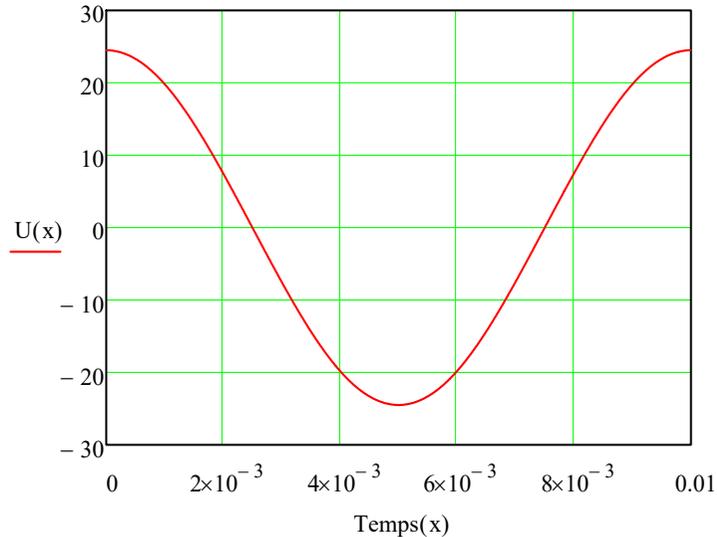
Allure du courant :



La tension est égale à $L \frac{dI}{dt}$, soit :

$$U(x) := 1024 \cdot Fr \cdot L(x) \cdot \left[\frac{d}{dx} \left(10 \cdot \sin \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{1024} \right) \right) \right]$$

Ce qui donne :



Maintenant, on calcule la FFT :

$$U_{u_x} := U(x)$$

$$FT := 2 \cdot FFT(U_u)$$

Le fondamental a pour valeur :

$$Fond := FT_1$$

$$Fond = 24.475 \text{ V}$$

On en profite vérifier le calcul en appliquant la loi d'Ohm :

$$U_f := L_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot Fr \cdot 10 \quad U_f = 31.416 \text{ V}$$

L'écart est dû à la baisse de valeur avec le courant

Le contenu harmonique est la somme quadratique des modules de toutes les autres fréquences :

$$Harm := \sqrt{\sum_{n=2}^{512} (|FT_n|)^2}$$

$$Harm = 0.0587 \text{ V}$$

D'où la distorsion harmonique totale :
$$\text{DHT} := \frac{100 \cdot \text{Harm}}{\text{Fond}} \quad \text{DHT} = 0.24 \%$$

Conclusion : pour une self dimensionnée pour 80 W permanents, on a à une puissance crête instantanée de 400 W une distorsion harmonique totale de 0,24%

Discussion:

Cette valeur de 0,24 % peut être réduite de plusieurs manières:

D'abord en choisissant une géométrie moins optimale (circuit plus gros, plus de spires, ce qui devrait permettre de gagner un rapport 2
Mais surtout en choisissant des matériaux magnétiques un peu plus performants, notamment les fer/nickel qui ont des perméabilités à peu près 10 fois supérieures. Par exemple le Supermalloy de Magnetics ou l'Ultraperm F de Vac. Ceci devrait permettre de diviser la distorsion par 5, environ.

Références :

"Soft magnetic materials		
The Vacuumschmelze handbook"	Vacuumschmelze GmbH	Hanau 1978
"Magnetic powder cores"	Arnold magnetics LTD	2009
"Produkt Katalog "	Kaschke components GmbH	Göttingen 2009
"Soft ferrites & accessories"	Ferroxcube International	2004