République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou

Faculté de Génie Electrique et d'Informatique Département d'Electrotechnique



Mémoire de fin d'études



En vue de l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Option : - Machines Electriques - Réseaux Electriques

## Thème

*Etude des pertes fer dans les circuits magnétiques de transformateurs monophasés* 

Proposé et dirigé par :

M<sup>r</sup>. M.SADOK

Etudié par :

**M**<sup>elle</sup>: BOURRAI Ouerdia

M<sup>elle</sup>: SADAOUI Amel

Promotion 2011

### Remerciements

Avant tout, nous remercions le bon Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience durant toutes les années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nos vifs remerciements vont en premier lieu, à nos chers parents de nous avoir aidé pour arriver au terme de ce travail.

Comme nous tenons à exprimer tout nos reconnaissances et nos gratitudes à notre promoteur M<sup>r</sup> SADOK, de nous avoir encadré, suivi et orienté tout au long de notre travail.

Nous remercions d'avance, les membres de jury d'accepter d'examiner notre travail.

A travers ce mémoire, nous adressons nos reconnaissances à tous nos enseignants qui ont contribué à notre parcours d'études depuis la première classe du primaire jusqu'à aujourd'hui.

En fin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents à qui je dois tout, je profite de les remercier pour leurs encouragements, leurs aides, le soutien qu'ils m'ont apporté et les sacrifices qu'ils ont faits pour moi, que Dieu les protège et les entoure de sa bénédiction.

Mon très cher frère Abdel Malek à qui je souhaite le succès dans la vie. Mes adorables sœurs : Ourida et Malha à qui je tiens énormément.

Ma très chère amie et mon binôme Ouerdia et sa famille ;

Tous mes amis (es) de prés et de loin ;

Toute la promotion 2010/2011;

A ceux que j'aime et qui m'aiment.

Amel

## Dédicaces

C'est avec une grande joie et un réel plaisir que je dédie ce modeste travail, en exprimant ma profonde reconnaissance à tous mes proches tout particulièrement :

A mes très chers parents bien aimé MOHAND et DJOHRA, les meilleurs parents du monde pour leurs amour et leurs soutient;

A la mémoire de ma grande mère TASSADITE ;

Amon frère KAMEL et sa femme FATIHA et le petit MOHAND ; Amon frère DJAMEL et sa femme SALIHA et le petit Abdel KARIM ; A ma sœur ZEHOUR ;

A mes frère MADJID, NOURDINE et AREZKI;

A mes tantes et leurs enfants;

A mon binôme AMEL et toute sa famille ;

A mes amis (es);

A toute la promotion 2011;

A tous ceux que auront le plaisir de lire ce mémoire .

Ouerdia



## Sommaire

Introduction	générale	0	1

#### Chapitre I Généralités sur le magnétisme et matériaux magnétiques

I.1. Définitions	02	
I.1.1. Matériau magnétique		
I.1.2. Champ magnétique	02	
I.1.3. Induction magnétique	02	
.1.4. Moment magnétique atomique	03	
I.1.4.1. Le moment magnétique orbital	04	
I.1.4.2. Le moment magnétique de spin	04	
I.1.5. Aimantation et polarisation magnétique	05	
I.1.5.1. Aimantation	05	
I.1.5.2. La polarisation	05	
I.1.6. Susceptibilité et perméabilité magnétique	06	
I.1.6.1. Susceptibilité magnétique	06	
I.1.6.2. Perméabilité magnétique	06	
I.2. Classification des matériaux magnétiques	07	
I.2.1. Matériaux diamagnétiques	07	
I.2.2. Matériaux paramagnétiques	07	
I.2.3. Matériaux ferromagnétiques	08	
I.3. Etude des matériaux ferromagnétiques	09	
I.3.1. Domaines magnétiques	09	
I.3.2. Structures des domaines	09	
a) Energie døanisotropie	10	
b) Energie magnétostatique	10	
c) Energie døéchange	11	
d) Energie magnétostrictive	11	
I.3.3. Processus de polarisation	11	
I.3.3.1. Courbe de première aimantation	12	
a) Zone des champs faibles	12	
b) Zone des champs moyens	13	
c) Zone des champs forts	13	
I.3.3.2. Løhystérésis	14	
I.4. Classification des matériaux ferromagnétiques	14	
I.4.1. Matériaux ferromagnétiques doux	14	
I.4.2. Matériaux ferromagnétiques durs	15	
I.5. Peters magnétiques	15	

#### Chapitre II Etude des pertes fer, analyse harmonique du champ et de løinduction magnétiques

II.1. Quantification des pertes dans les matériaux magnétiques doux	16	
II.1.1. Pertes totales dans les tôles		
II.1.2. La séparation des pertes	16	
II.1.2.1. Pertes par hystérésis	16	
a) Formule de STEINMETZ	18	
b) Formule de RICHTER	19	
c) Moyens de réduction des pertes par hystérésis	19	
II.1.2.2. Pertes par courants de FOUCAULT	19	
II.1.2.2.1. Evaluation des pertes par courants de FOUCAULT	20	
II.1.2.2.2. Conséquence des courants de FOUCAULT		
et moyens utilisés pour les réduire	22	
II.1.2.3. Pertes par excès des courants induits	23	
II.1.2.3.1. Phénomènes physiques et facteur døanomalie des pertes	23	
II.1.2.3.2. Evaluation des pertes par excès des courants induits	23	
a) Modèle des domaines parallèles de PRY et BEAN	24	
b) Modèle statique de BERTTOTI	24	
II.1.3. Globalisation des pertes fer	25	
II.2. Analyse harmonique du champ et de løinduction magnétique	25	
II.2.1. Cas général	25	
II.2.2. Analyse basée sur une induction magnétique sinusoïdale	29	
II.2.3. Analyse basée sur un champ magnétique sinusoïdale	33	
II.3. Champ électrique induit et densité des pertes magnétiques	38	
II.3.1. Expression du champ électrique	38	
II.3.2. Densité de puissance active	38	
II.3.3. Densité de puissance réactive	39	
II.3.4. Expression de puissance apparente	39	
II.3.5. Formule simplifiées des pertes		
a) Cas døun champ électrique sinusoïdal à la surface	40	
b) Cas døun champ magnétique sinusoïdal à la surface	40	

#### Chapitre III Etude expérimentale des pertes fer

III.1. Circuits de caractérisation des matériaux doux	
III.1.1. Cadre à bande unique	
III.1.2. Cadre à bande unique pour mesures bidimensionnelles	

# Introduction générale

## Introduction générale

Les matériaux magnétiques sont actuellement au cò ur du développement scientifique et technologique moderne. Leur utilisation est étendue à travers les champs døapplication les plus innovateurs à savoir, løénergie électrique, løinformatique, les télécommunications ... Cela revient aux très bonnes propriétés magnétiques que possèdent ces matériaux et qui ne cessent døêtre améliorées [1].

On les trouve dans plusieurs dispositifs tels que les transformateurs et les machines tournantes, les capteurs tels que les têtes de lecture et décriture des bandes magnétiques et des disques durs etc.

Dans ce présent travail, nous présentons une étude à la fois théorique et expérimentale sur les pertes fer dans les tôles Fer Silicium à grains orientés.

Pour aboutir aux objectifs de ce travail, notre mémoire sera structuré en trois chapitres présentés comme suit :

- Le premier chapitre traite les définitions générales ainsi que les éléments de base de la physique du solide indispensables à løétude du magnétisme.
- Dans le second chapitre nous avons passé en revue les déférentes pertes dues au phénomène de magnétisation, suivies par une analyse harmonique détaillée du champ et de løinduction magnétique.
- Le dernier chapitre sera consacré à la caractérisation de tôles fer silicium composant les circuits magnétiques de transformateurs monophasés didactiques.

Nous terminerons notre étude par une conclusion générale, mettant en relief la qualité et les caractéristiques des tôles étudiées.

Chapitre I

Généralités sur le magnétisme et matériaux magnétiques

Ce premier chapitre à pour objectif de fournir les éléments de base nécessaire pour comprendre le comportement des matériaux magnétiques. Pour cela nous rappelons d'abord les lois et les propriétés principales des matériaux magnétiques. Puis nous abordons le comportement magnétique d'un matériau ferromagnétique. En suite, nous présentons les familles de ce dernier.

#### I.1. Définitions

#### I.1.1. Matériau magnétique

Un matériau magnétique est toute substance pouvant acquérir une induction magnétique quand elle est soumise à un champ électromagnétique extérieur. Cette propriété se rencontre beaucoup plus dans les matériaux ferromagnétiques.

#### I.1.2. Champ magnétique

Le champ magnétique  $\vec{H}$  est une propriété que nous pouvons mettre en évidence en plaçant en un point *P*, un matériau magnétique de masse *m* qui subit une force  $\vec{F}$  donné par la loi de Coulomb :

$$\vec{F} = \mathbf{m}.\vec{H} \tag{I.1}$$

La force  $\vec{F}$  est une mesure directe du champ magnétique  $\vec{H}$  dont l'unité est l'Ampère par mètre [A/m]. Lorsqu'un courant électrique circule dans un circuit électrique, il y a production d'un champ magnétique.

Le théorème d'ampère appliqué à une ligne de champ longueur *L* est donné par la relation suivante :

$$\oint \vec{H} \vec{dl} = \sum_{k=1}^{n} I_{\mathrm{K}} = \mathrm{n.}I \tag{I.2}$$

Où : *n* est le nombre de spires du circuit électrique parcouru par le courant *I*.

#### I.1.3. Induction magnétique

La circulation d'un courant dans un conducteur de longueur *l* permet de définir le champ d'induction  $\vec{B}$ .

Un élément de longueur dl de ce matériau subit une force  $\overrightarrow{dF}$  donnée par la relation (I.3).

$$\overrightarrow{dF} = \overrightarrow{Idl} \wedge \overrightarrow{B} \tag{I.3}$$

La force  $\overrightarrow{dF}$  est une mesure directe de l'induction magnétique  $\overrightarrow{B}$  dont l'unité est le Tesla [T].

On dit du vecteur  $\vec{B}$  qu'il est à flux conservatif, c'est-à-dire que le flux qui sort d'un pôle entre dans le pôle opposé, comme nous la montre la loi de Gauss

$$\iint_{S} \vec{B} \cdot \vec{dS} = 0 \tag{I.4}$$

La relation entre l'induction magnétique  $\vec{B}$  et le champ magnétique  $\vec{H}$  est

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{I.5}$$

Où:  $\mu$  est la perméabilité magnétique du milieu s'exprimant en [H/m].

-Pour le vide :  $\mu = \mu_0 = 4\pi . 10-7 \text{ [H/m]}$ 

-Pour un milieu ferromagnétique :  $\mu = \mu_0 \mu_r$ 

Où:  $\mu_r$  est la perméabilité magnétique du milieu, elle est sans dimension.

#### I.1.4. Moment magnétique atomique [3]

L'existence du moment magnétique atomique et déterminé par le mouvement des électrons autour du noyau. Le moment magnétique de l'atome est la somme de deux moments : le moment magnétique orbital et le moment magnétique de spin (figure I.1).



Figure I.1 : Mouvement de l'électron dans un atome

#### I.1.4.1. Le moment magnétique orbital

La rotation de l'électron autour du noyau provoque un moment magnétique orbital  $\vec{M}_{\rm L}$  défini par la relation

$$\vec{M}_{\rm L} = \frac{e}{2m_e} \vec{L}_{tot} \tag{I.6}$$

Où : e et  $m_e$  représentent respectivement la charge et la masse de l'électron qui sont égales à

$$e = 1,6.10^{-6} \text{ Cb}$$
  
 $m_e = 9,1.10^{-31} \text{ Kg}$ 

et  $\vec{L}_{tot}$  est le moment cinétique orbital de l'atome qui est la somme des moments cinétiques orbitaux de ses électrons.

$$\vec{L}_{tot} = \sum_i \vec{L}_i \tag{I.7}$$

#### I.1.4.2. Le moment magnétique de spin

La rotation de l'électron sur lui-même provoque un moment magnétique de spin  $\vec{M}_s$ , qui est défini par la relation suivante :

$$\vec{M}_{\rm S} = \frac{e}{m_e} \vec{S}_{\rm tot} \tag{1.8}$$

Avec:

$$\vec{S}_{\text{tot}} = \sum_{i} \vec{S}_{i} \tag{I.9}$$

Le moment cinétique de spin de l'atome.

- Le moment magnétique résultant est la somme des deux moments :

$$\vec{M} = \vec{M}_{\rm L} + \vec{M}_{\rm S} \tag{I.10}$$

Donc :

$$\vec{M} = \frac{e}{m_e} \left[ \vec{L}_{tot} + \frac{1}{2} \overrightarrow{S_{tot}} \right]$$
(I.11)

#### I.1.5. Aimantation et polarisation magnétique [4]

#### I.1.5.1. Aimantation

Un corps est aimanté si dans un volume donné de ce corps, la somme des moments magnétiques atomiques est différente de zéro .

L'aimantation magnétique se définit comme étant le moment magnétique ampérien par unité de volume.

Elle est donnée par la relation suivante :

$$\vec{M} = \frac{\Sigma \vec{m}_{iA}}{\nu} \tag{I.12}$$

 $\vec{m}_{iA}$  est le moment magnétique ampérien en [Am<sup>2</sup>]

 $\vec{M}$ : Aimantation en [A/m]

```
v: Volume en [m^3]
```

#### I.1.5.2. La polarisation

La polarisation se définit comme étant le moment magnétique dipolaire par unité de volume d'une substance magnétique .Elle est donnée par la relation suivante :

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{m}_{id}}{v}$$
(I.13)

 $\vec{J}$ : Polarisation en [T]

 $\vec{m}_{id}$ : Moment magnétique dipolaire en [Wb. m]

v: Volume de substance magnétique

- La polarisation et l'aimantation sont liées par la relation :

$$\vec{J} = \mu_0 \vec{M} \tag{I.14}$$

- Dans les matériaux ferromagnétiques, l'induction s'exprime par la relation suivante :

$$\vec{B} = \mu_0 \left( \vec{H} + \vec{M} \right) \tag{I.15}$$

Et aussi par :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} \tag{I.16}$$

#### I.1.6. Susceptibilité et perméabilité magnétique [4]

#### I.1.6.1. Susceptibilité magnétique

L'aimantation  $\vec{J}$  d'un corps dépend du champ magnétique  $\vec{H}$  au point où il se trouve. Le rapport entre ces deux grandeurs est appelée susceptibilité magnétique absolue. Elle renseigne sur le taux d'aimantation du matériau. La suxeptibilité magnétique absolue est souvent représenté par la lettre  $\chi$  et se mesure en Henry par mètre [H/m]

$$\boldsymbol{\chi} = \frac{J}{H} \tag{I.17}$$

La susceptibilité magnétique relative  $\chi_r$  est définie par :

$$\chi_r = \frac{M}{H} \tag{I.18}$$

#### I.1.6.2. Perméabilité magnétique

Tout corps, soumis à un champ magnétique, a tendance à s'aimanter de façon intrinsèque. Cette tendance à s'aimanter est une caractéristique des corps magnétiques. Elle caractérise la capacité du corps à canaliser un flux magnétique.

La perméabilité magnétique relative  $\mu_r$  mesure l'aptitude magnétique d'un matériau par rapport à c'elle du vide. La perméabilité relative est liée aux perméabilités absolue et du vide par la relation suivante :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{I.19}$$

#### I.2. Classification des matériaux magnétiques

Les matériaux peuvent être classés suivant leur comportement magnétique, c'est- à-dire suivant leurs susceptibilités magnétiques  $\chi_r$ .On distingue trois grande catégories.

#### I.2.1. Matériaux diamagnétiques

Ce type de magnétisme est caractérisé par une susceptibilité relative négative de faible amplitude et de l'ordre de  $10^{-5}$  à  $10^{-6}$ . Les couches sont remplies et la somme des moments cinétiques orbitaux et des moments cinétiques de spin est nulle. L'ion ne possède pas de moment magnétique. Si un champ magnétique externe est appliqué à un tel ion, il se crée un moment magnétique induit qui s'oppose au champ qui le produit sous l'action de la loi de lenz, ce qu'explique que  $\chi_r$  est négative.

Comme exemples on peut citer l'argent, l'or et le cuivre.

#### I.2.2. Matériaux paramagnétiques

Le paramagnétisme se produit dans les matériaux dont chaque molécule possède un moment magnétique. En l'absence de champ magnétique, les orientations des moments magnétiques des particules sont aléatoires et en moyenne nulle. Par contre si l'on applique un champ magnétique externe, ces derniers s'alignent avec le champ ; une aimantation apparait et est dirigée dans le sens du champ appliqué. La susceptibilité magnétique est très petite mais positive de l'ordre de  $10^{-5}$  à  $10^{-6}$ . Elle varie en raison inverse de la température, elle obéit à la loi de Curie suivante :

$$\chi_r = \frac{C}{T} \tag{I.20}$$

Avec C: Constante de curie

T: Température absolue en Kelvin [K]

Exemples de matériaux paramagnétiques : aluminium, chrome, platine.

#### I.2.3. Matériaux ferromagnétiques

Le ferromagnétisme est une propriété qu'ont certains corps de s'aimanter même à l'absence d'un champ magnétique. Lorsque le matériau est excité par un champ d'excitation $\vec{H}$ , ses moments magnétiques atomiques sont orientés dans le même sens sur des petits domaines (interaction de proche en proche entre les atomes). Donc, la valeur de leur aimantation est très grande. Même après la suppression progressive de ce champ, le matériau conserve une aimantation. Ces matériaux ont aussi une température de curie, au dessus de laquelle ils deviennent paramagnétiques donc il est caractérisé par la loi de curie comme suit :



Figure I.2 : Variation de l'aimantation en fonction de la température

Exemples des matériaux ferromagnétiques : Nickel, Cobalt.

#### I.3. Etude des matériaux ferromagnétiques [1]

#### I.3.1. Domaines magnétiques

Pour les matériaux magnétiques, l'expérience a montré que si on prend un échantillon de ce matériau, on constate qu'il est divisé en petites régions appelés domaines magnétiques élémentaires, dont les moments magnétiques sont orientés parallèlement les uns par rapport aux autres grâce aux forces d'échange, de telle sorte que chaque domaine se présente comme un petit volume aimanté à saturation. Chaque domaine est séparé d'un voisin par une zone de transition appelé « *Paroi de Bloch* » dont l'orientation des moments magnétiques passe progressivement de la direction de polarisation dans l'un des domaines, à celle régnant dans l'autre domaine.

Le moment magnétique M d'un échantillon de volume est nécessairement compris dans les limites suivantes :

 $0 \le M = \int I_S dv \le I_S v$ 



Figure I.3 : Les domaines magnétiques

#### I.3.2. Structures des domaines [3]

La structure d'un domaine magnétique est caractérisée par sa forme, ses dimensions et l'orientation de la polarisation à saturation  $I_s$ . Parmi ces structures, la seule qu'on peut réaliser et celle correspondant à un minimum d'énergie interne de l'échantillon. Cette énergie interne  $W_{in}$  associée à la structure d'un domaine comprend quatre termes :

 $W_{in} = W_{an} + W_{ms} + W_{ec} + W_{mt}$ 

 $W_{an}$  est l'énergie d'anisotropie,  $W_{ms}$  l'énergie de magnétostatique,  $W_{ec}$  l'énergie d'échange et  $W_{mt}$  l'énergie magnétostrictive.

#### a) Energie d'anisotropie [4]

Elle est due au fait que les moments magnétiques à l'intérieur des parois ne sont pas orientés selon la direction de facile aimantation et elle augmente avec l'épaisseur de la paroi de Bloch.

Cette énergie est définie par l'expression suivante :

$$W_{an} = k_0 + k_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2) + k_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2$$
(I.22)

Où:  $\alpha_1$ ;  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$  sont les cosinus directeurs, ils caractérisent la position du vecteur d'aimantation par rapport aux axes du cube.  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  Sont les constantes d'anisotropie.

#### b) Energie magnétostatique [4]

Elle résulte des interactions entre chaque moment magnétique et le champ local ou est placé ce moment. Ce champ local est la combinaison du champ crée par les atomes voisins et du champ magnétique extérieur.

Cette énergie est définie par la relation suivante :

$$W_{ms} = -\frac{1}{2} \int I. H_d dv \tag{I.23}$$

Ou  $H_d$  est le champ démagnétisant qu'on pose :

$$H_d = -\frac{1}{\mu_0} N I \tag{I.24}$$

N :Est le facteur démagnétisant.

#### c) Energie d'échange [4]

On appelle énergie d'échange, l'énergie résultant de l'interaction des moments magnétiques, elle dépend de la distance séparent ces moments ainsi que de leur orientation relative. Cette énergie passe par un minimum lorsque ces moments sont parallèles.

Cette énergie se définit par la relation suivante :

$$W_{ec} = -\frac{2m^2}{4\pi r^3 \mu_0} \cos\theta \tag{I.25}$$

Où *m* est le moment magnétique d'un atome, *r* la distance entre deux moments et  $\mu_0$  la perméabilité magnétique du vide.

#### d) Energie magnétostrictive [4]

On appelle énergie magnétostrictive, l'énergie élastique associée aux déformations et aux contraintes que les domaines exercent les uns sur les autres. Le cristal peut s'allonger ou se contracter selon la direction de la polarisation par rapport à la déformation.

#### I.3.3. Processus de polarisation [3]

Soit un monocristal de fer, dans lequel les domaines magnétiques se présente tels qu'à la figure suivante :



Figure I.4 : Représentation schématique des domaines magnétiques

Dès qu'on applique un champ H comme indiqué, l'énergie des moments magnétique est augmentée dans les domaines 2 et 3, et dans une faible mesure dans le domaine 5. Le respect de la condition de l'énergie minimum dans l'échantillon entraine alors une diminution du volume de ces moments. Dans champ H croissant, la structure des domaines prendra donc successivement les allures représentées à la figure. Finalement, un seul domaine orienté suivant H.

#### I.3.3.1. Courbe de première aimantation

Un matériau ferromagnétique est initialement démagnétisé. En lui appliquant un champ magnétique extérieur régulièrement croissant, on obtient le diagramme B(H), appelé courbe de première aimantation.



Figure I.5 : Courbe de première aimantation

#### a) Zone des champs faibles

Pour cette zone, les parois de Bloch sont légèrement déformées ce qui n'influence pas sur la situation des domaines. Un champ faible provoque une déformation réversible des parois qui se comporte comme des membranes élastiques.

#### b) Zone des champs moyens

Soumises à un champ magnétique moyen, les parois de Bloch se déplacent par une série de saut mis en évidence par l'expérience de BARKHAUSEN, qui a montré que ces domaines sont irréversibles.

#### c) Zone des champs forts

Le champ augmente, l'aimantation s'écarte de la direction facile pour s'aligner suivant la direction du champ appliqué.

#### I.3.3.2. L'hystérésis [3]

L'hystérésis est une conséquence directe de l'existence des domaines et des processus d'aimantation par déplacement et déformation des parois de Bloch. Quand il n'y a pas de domaines alors l'hystérésis n'existe plus.

#### Cycle d'hystérésis

Après avoir parcouru la courbe de première aimantation jusqu'à la saturation, on fait décroitre le champ H. On observe que la courbe obtenue ne se superpose pas à la première courbe, et bien que l'induction B diminue, elle reste supérieure aux valeurs acquises lorsque H était croissant.

Lorsque le champ magnétique est supprimé, on constate qu'une certaine induction $B_r$ , appelée induction rémanente, subsiste dans le matériau.

Si l'on inverse ensuite le sens de l'excitation magnétique, on remarque qu l'induction devient nulle pour une certain valeur de  $-H_C$  du champ magnétique appelé champ coercitif. Si l'on continue enfin à faire varier H jusqu'à  $-H_m$ , puis si l'on revient à  $+H_m$ , on obtient une courbe fermé, symétrique par rapport à l'origine, appelée cycle d'hystérésis(figure I.6).



Figure I.6 : Courbe de cycle d'hystérésis

#### I.4. Classification des matériaux ferromagnétiques [3]

D'après des observations faites sur des cycle d'hystérésis, on distingue deux classes de matériaux ferromagnétiques.

#### I.4.1. Matériaux ferromagnétiques doux

On appelle matériaux doux ceux dans lesquels le champ coercitif est faible. Pour ces matériaux, il faut que, lorsque le champ extérieur varie, aucun obstacle ne s'oppose au déplacement des parois de Bloch et à la réorientation des domaines magnétiques. En d'autres termes ces matériaux présentent peu de défauts dans leur structure cristalline. Ils sont caractérisé par une très haute perméabilité, une induction à saturation  $B_s$  élevée, un champ coercitif et des faibles pertes par hystérésis (faible surface du cycle d'hystérésis). On utilise un matériau magnétique doux lorsque celui-ci doit canaliser un flux magnétique variable à de hautes fréquences. Pour cela ces matériaux sont utilisés dans les noyaux (ou circuits magnétiques) des transformateurs et des machines tournante

#### I.4.2. Matériaux ferromagnétiques durs

On appelle matériaux magnétiques durs ceux caractérisés par un champ coercitif élevé, une induction rémanente et un large cycle d'hystérésis. Dans ces matériaux on cherche à entraver au maximum la réorientation des moments magnétiques dans les domaines de Weiss, ainsi que le déplacement des parois de Bloch. On utilise les matériaux magnétiques durs lorsque le champ et être si possible élevé, et ce même en présence de champ magnétiques extérieure parasites. Ils sont utilisés dans les aimants permanents.

#### I.5. Pertes magnétiques [3]

L'aimantation de la matière absorbe de l'énergie qui n'est que partiellement restituée au cours de la désaimantation. Cette énergie est dissipée sous forme calorifique, c'est-à-dire que le matériau s'échauffe, donc on a des pertes magnétiques.

On distingue trois types de pertes magnétiques :

- Les pertes par hystérésis ;
- Les pertes par courant induits classiques (courants de Foucault);
- Les pertes par excès des courants induits.

Chapitre II

Etudes des pertes fer, analyse harmonique du champ et de l'induction magnétique

#### II.1. Quantification des pertes dans les matériaux magnétiques doux [1]

La plupart des matériaux magnétiques doux utilisés en construction électique sont des métaux donc des conducteurs d'électricité. En régime d'induction variable, ils sont le siège de courants induits, qui provoquent des pertes d'énergie dissipée sous forme de chaleur. D'ailleurs, la qualité des tôles utilisées dans la construction électrique est mesurée par la valeur des pertes qu'elles dissipent par unité de masse (1Kg) lorsqu'elles sont soumises à une induction de travail de référence à la fréquence du réseau.

#### II.1.1. Pertes totales dans les tôles

Le cycle d'hystérésis dynamique contient toutes les informations nécessaires à une utilisation éventuelle du matériau, c'est-à-dire a la fois :

- L'induction moyenne B(H).
- Les pertes totales P<sub>t</sub>.

Ainsi, sur un cycle complet, le milieu extérieur fournit, par unité de volume de matière, le travail :

$$W = P_t = \int_{(c)} H dB \qquad [J/m^3] \qquad (II.1)$$

Ce travail représente les pertes totales volumiques par cycle . Il est converti en chaleur par les processus d'aimantation.

Pour évaluer les pertes dans un matériau magnétique, il suffit donc de déterminer son cycle d'hystérésis. Mais il faut que le cycle d'hystérésis dynamique soit déterminé dans les conditions réelles d'utilisation. Ainsi, il est évident que le cycle ne peut être parcouru que dans un seul sens, correspondant à une dégradation de l'énergie électromagnétique en chaleur.

#### II.1.2. La séparation des pertes

Pour expliquer l'allure générale des courbe  $P_t/f=f(f)$ , les techniciens ont adoptés un principe important appelé séparation des pertes.

A partir de ce principe, les pertes moyennes d'énergie par unité de volume  $P_t$ d'un matériau sont égales à la somme des pertes statique ou pertes par hystérésis d'une part, et les pertes dynamiques d'autre part :

$$P_{t} = P_{h} + P_{d} \tag{II.2}$$

Les pertes dynamiques  $P_d$  sont décomposées en pertes classiques par courant induit ou pertes par courant de FOUCAULT  $P_c$  et pertes supplémentaires  $P_s$  et on écrit :

$$P_{t} = P_{h} + P_{c} + P_{s} \tag{II.3}$$



Figure II.1 : Décomposition des pertes totales par cycle

#### II.1.2.1. Pertes par hystérésis [2]

Sous l'effet des champs d'induction et d'excitation, les forces de Laplace créent des contraintes internes au matériau qui mettent en mouvement les domaines de Weiss. Leur frottement les uns contre les autres favorisent l'échauffement du matériau, ce qu'on appelle « pertes par hystérésis »  $P_{\rm h}$ . Ces pertes correspondent au travail nécessaire pour parcourir le cycle.

Les pertes  $P_h$  sont mesurées en traçant un cycle à fréquence aussi réduite que possible (pratiquement <1Hz). Elles sont proportionnelles à l'aire du cycle d'hystérésis  $A_h$ , au volume V du matériau, et à la fréquence f du cycle.

$$P_{\rm h} = A_{\rm h} \, V f \tag{II.4}$$



Figure II.2 : Cycle d'hystérésis

#### a) Formule de STEINMETZ

Elle est donnée par la relation suivante :

$$P_{\rm h} = \eta B_{\rm m}^{\gamma} V f \tag{II.5}$$

Où :

$$P_{\rm h} = \eta \frac{B_{\rm m}^{\gamma}}{m_{\rm v}} \qquad \left[\frac{J}{Kg}\right]$$

Où:

 $\eta$  et  $\gamma$  sont des coefficients qui dépendent de la nature du matériau et qui sont généralement donné par le fabriquant, on appelle  $\eta$  le coefficient de STEINMETZ et l'exposant  $\gamma$  est pris généralement égal 1,6 pour le fer ; dans les tôles de fer au silicium moderne on prend  $\gamma$  égal à 2.

m<sub>v</sub> : Masse volumique ; V : volume de matériau et f : la fréquence du cycle.

#### b) Formule de RICHTER

L'expression de la puissance perdue est donnée par l'expression suivante :

$$P_{h} = (aB_{m} + bB_{m}^{2}) Vf \qquad [w]$$

$$P_{h} = \frac{bB_{m}^{2} + aB_{m}}{m_{v}} \qquad [\frac{J}{Kg}]$$
(II.6)

Où : a et b sont des constantes qui dépendent de la nature du matériau.

Pour les fortes valeurs de l'induction magnétique  $B_m \ge 1T$ , cette formule se réduit pratiquement à l'expression suivante :

$$P_{h} = bVfB_{m}^{2} \qquad [W] \qquad (II.7)$$

$$P_{\rm h} = \frac{bB_{\rm m}^2}{m_{\rm v}} \qquad [{\rm J/kg}]$$

En règle générale, ces pertes sont globalisées :

$$P_{h} = k_{h} f B_{m}^{2}$$
(II.8)

Où : k<sub>h</sub> est une constante d'hystérésis.

Cette dernière formule est généralement mieux adaptée que celle de STEINMETZ aux matériaux ferromagnétique.

#### c) Moyen de réduction des pertes par hystérésis

Pour rendre ces pertes aussi faible que possible, une solution est d'utiliser des matériaux présentant, pour une valeur donné de l'induction maximale  $B_m$  un cycle de surface relativement faible c'est-à-dire des matériaux doux.

#### II.1.2.2. Pertes par courant de FOUCAULT [2]

Lorsqu'un échantillon d'un matériau est soumis à un champ magnétique alternatif d'amplitude $B_m$  et de fréquencef, il se crée dans le matériau des

courants induits, qui circulent dans une épaisseur dite de peau a la surface de matériau.

Ces courants provoquent des pertes par effet Joule, échauffement de ce matériau et crée une dissipation d'énergie.

L'épaisseur de peau dépend de la résistivité du matériau, de la perméabilité et de fréquence de champ magnétique.

#### **II.1.2.2.1.** Evaluation des pertes par courants de FOUCAULT

Pour déterminer ces pertes, on considère une tôle de longueur L, de largeur l et d'épaisseur e (voir figure II.1), soumis à un champ d'induction uniforme et sinusoïdale :

 $B = B_m \cos(wt)$ 

On peut décomposer cette tôle en circuits fermés élémentaires tel que celui couvert de hachures.



Figure II .2. Schéma d'un circuit fermé dans la tôle

La spire conductrice représentée, de résistivité  $\rho$ , de longueur 2*l* et de section L. dx, présente une résistance

$$r = \frac{2l\rho}{L.dx}$$
(II. 9)

Cette spire embrasse un flux d'induction :

$$\emptyset = S_{sp}.B = 2x l B = 2x l B_m \cos(wt)$$
(II.10)

Selon la loi de Lenz :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = 2x \, lB_m w \sin(wt) \tag{II.11}$$

Où :

e : la f.é.m. induite dans la spire élémentaire, sa valeur efficace est donné par :

$$\mathbf{E} = \sqrt{2}\mathbf{x}\mathbf{I}\mathbf{B}_{\mathrm{m}}\mathbf{w} = \sqrt{8}\mathbf{x}\mathbf{I}\mathbf{B}_{\mathrm{m}}\mathbf{\pi}\mathbf{f} \tag{II.12}$$

Si on néglige l'induction de cette spire, l'intensité du courant qui la traverse à pour valeur efficace :

$$I = \frac{E}{r} = \frac{\sqrt{8}x l B_m \pi f L dx}{2 l \rho} = \frac{\sqrt{2}\pi L f B_m}{\rho} x dx$$
(II.13)

D'où la puissance dissipée par effet Joule dans cette spire élémentaire sera :

$$dP_{cF} = rI^2 = \frac{4\pi^2 lL B_m^2 f^2 x^2}{\rho} dx$$
(II.14)

En intégrant l'expression précédente sur l'intervalle  $\left[0, \frac{e}{2}\right]$  de X, on aura la puissance totale dissipé dans la tôle.

$$P_{cF} = \int dP_{cF} = \int_{0}^{\frac{e}{2}} \frac{4\pi^{2} ILB_{m}^{2} f^{2} x^{2}}{\rho} dx$$

$$P_{cF} = \frac{4\pi^{2} ILB_{m}^{2} f^{2}}{\rho} \int_{0}^{\frac{e}{2}} x^{2} dx$$

$$P_{cF} = \frac{4\pi^{2} IL}{\rho} B_{m}^{2} f^{2} \left[\frac{x^{3}}{3}\right]$$

$$P_{cF} = \frac{4\pi^{2} ILe^{3}}{24\rho} B_{m}^{2} f^{2} \qquad (II.15)$$

Sachant que V = ILe, est le volume de la tôle.

On aura :

$$P_{cF} = \frac{\pi^2 V e^2}{6\rho} B_m^2 f^2$$
(II.16)

La puissance correspondante aux courants de FOUCAULT s'exprime sous la forme :

$$P_{cF} = KVe^2 B_m^2 f^2 \qquad [W] \tag{II.17}$$

Avec :K =  $\frac{\pi^2}{6\rho}$ , constante qui dépend de la nature du matériau.

Les pertes fer par cycle et par unité de masse valent :

$$P_{f} = \frac{\pi^{2} e^{2}}{6\rho m_{v}} B_{m}^{2} f$$
 [J/Kg] (II.18)

Avec : m<sub>v</sub> : la masse volumique de la tôle .

## II.1.2.2.2. Conséquence des courants de FOUCAULT et moyens utilisés pour les réduire

Ces courants diminuent le rendement des machines électriques et provoquent un échauffement des pièces dans lesquelles ils se produisent, d'où la nécessité d'utiliser des moyens de réduction de ces pertes.

Pour réduire ces pertes il faut :

-augmenter la résistivité du matériau.

-feuilleter le matériau en réalisant le circuit par un empilage de tôle.

-utiliser des tôles magnétiques verniers, donc isolé électriquement les uns des autres.

#### II.1.2.3. Pertes par excès des courants induits [6]

#### II.1.2.3.1. Phénomènes physiques et facteur d'anomalie des pertes

Les pertes classiques calculées précédemment, représentent la valeur minimale des pertes par courants induits. Le déplacement des parois des domaines provoque l'apparition des courants induits qui vont augmenter à leur tour les pertes dynamiques, ces courants se développent autour des parois et tendent à s'opposer à la variation de l'aimantation par suite des déplacements des parois de BLOCH.

Les pertes dynamiques sont obtenues par la différence entre les pertes totales mesurées  $P_{fer}$  et les pertes par hystérésis statiques  $P_h$ :

$$P_{dyn} = P_{fer} - P_h \tag{II.19}$$

La relation liant ces pertes dynamiques  $P_{dyn}$  aux pertes classiques  $P_{CF}$  dépend de la forme de l'induction magnétique :

Pour une induction magnétique sinusoïdale :

$$P_{dyn} = \eta P_{CF} \tag{II.20}$$

 $\eta$ : Coefficient d'anomalie des pertes.

Pour une induction magnétique non sinusoïdale :

$$P_{\rm dyn} = \eta (\frac{F}{F_{\rm S}})^2 P_{\rm CF} \tag{II.21}$$

 $O\hat{u}: F_S$  et F sont les facteurs de forme des inductions sinusoïdale et non sinusoïdale respectivement.

#### II.1.2.3.2. Evaluation des pertes par excès des courants induits

Les modèles les plus importants qui sont intéressés à l'étude de ce phénomène sont :

-le modèle des domaines parallèles de PRY et BEAN.

-le modèle statistique de Berttoti.

#### a) Modèle des domaines parallèles de PRY et BEAN [5]

Dans ce modèle PRY et BEAN supposent dans une tôle d'épaisseur e des domaines à 180° en forme de barre de longueur 21, séparés par des parois planes perpendiculaire aux faces de la tôle. Le coefficient d'anomalie des pertes  $\eta$  est alors associé par les auteurs au rapport  $\frac{21}{2}$ 

$$\eta = \frac{48}{\pi^3} \frac{2l}{e} \sum_{n \ge 1} \frac{1}{(2n-1)^3} \coth[(2n-1)\frac{\pi}{2}\frac{2l}{e}]$$
(II.22)

#### **Cas particuliers :**

- Si  $\frac{21}{e} \ll 1$  (domaine très étroits),  $\eta \approx 1$ , les pertes dynamiques se confondent aux pertes classiques.
- Si  $\frac{2l}{e} > 1$ ,  $\eta \approx 1.63(\frac{2l}{e})$ : les pertes dynamiques sont plus importantes que les pertes classiques.

#### b) Modèle statique de BERTTOTI

Au sein d'un matériau ferromagnétique, les parois de BLOCH ne se déplacent pas de manière totalement indépendante. En effet, à cause de certaine corrélation interne d'origine magnétostatique, ces parois ont tendance à se déplacer en groupe. Ainsi, BERTTOTI désigne par Objet Magnétique (O .M) un ensemble de parois ayant le même comportement dynamique. De plus, la taille d'un O.M dépend de la nature du matériau ainsi que de l'espacement entre les parois.

Pour une induction sinusoïdale de fréquence f et de valeur de crête $B_m$ , les pertes par excès par cycle dans une tôle de section S sont exprimées par la relation suivante :

$$P_{ex} = \frac{8.8}{m_V} \sqrt{\frac{GH_0S}{\rho}} B_m^{1,5} f^{0,5} [J/Kg]$$
(II.23)

G est un coefficient de frottement de l'OM (G=0,136 dans le cas ou l'OM correspond a une paroi.

 $H_0$  est équivalent à un champ coercitif caractérisant l'opposition des OM à s'activer.

#### **II.1.3.** Globalisation des pertes fer [6]

Les pertes totales s'expriment donc on utilisant la formule de Richter :

$$P_{\text{fer}} = \frac{bB_m^2 + aB_m}{m_v} + K' f B_m^2 e^2 + \frac{8.8}{m_v} \sqrt{\frac{GH_0 S}{\rho}} B_m^{1,5} f^{0,5} \qquad [J/Kg]$$
(II.24)

Pour des valeurs maximales importantes du champ, l'expression devient :

$$P_{\text{fer}} = \frac{aB_{\text{m}}}{m_{\text{v}}} + K' f B_{\text{m}}^2 e^2 + \frac{8.8}{m_{\text{v}}} \sqrt{\frac{GH_0 S}{\rho}} B_{\text{m}}^{1.5} f^{0.5} \qquad [J/Kg]$$
(II.25)

#### II.2. Analyse harmonique du champ et de l'induction magnétique [7]

#### II.2.1. Cas général

L'équation de diffusion d'un champ magnétique dans un matériau quelconque est donnée par l'équation différentielle

$$\nabla^2 \overline{\mathbf{H}} = \frac{1}{\rho} \frac{\delta \overline{\mathbf{B}}}{\delta \mathbf{t}} \tag{II.26}$$

Cette équation provient de la troisième équation de la théorie de Maxwell, qui s'écrit :

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = \mathbf{0} \tag{II.27}$$

L'équation (II.27) est valable pour les matériaux paramagnétiques ayant une perméabilité magnétique constante ( $\mu$  =constante)

$$\operatorname{div}\overline{B} = \mu \operatorname{div}\overline{H} = 0 \tag{II.28}$$

L'équation (II.26) est valable pour les matériaux ferromagnétiques sous condition de la vérification de l'équation supplémentaire suivante.

$$div \overline{B} = div(\mu \overline{H}) = \mu div \overline{H} + \overline{H}grad\mu = 0$$
(II.29)

Quand  $\mu$  n'est pas constante, les équations (II.26) et (II.27) ne sont vérifiées que si et seulement si  $\vec{H}$  et grad  $\mu$  sont orthogonaux et leurs produit scalaire est nul. Ces conditions sont réalisées dans les deux cas importants suivants.

-Les lignes de force du champ magnétique sont rectilignes et parallèles ;

-Les lignes de force du champ magnétique sont coaxiales circulaires.

Dans notre travail, on s'intéressera uniquement à la configuration du champ magnétique du premier cas .
Si  $\overline{H}$ ,  $\overline{B}$  et  $\overline{E}$  sont parallèles à la surface et si l'axe des x est orthogonal à celle-ci, nous pouvons utiliser les composantes scalaires du champ au lieu des vecteurs ; l'équation (II.26) devient alors

$$\frac{\delta^2 H}{\delta x^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\delta B}{\delta t} \tag{II.30}$$

En régime périodique ,la loi d'aimantation représentée par le cycle d'hystérésis impose une relation entre B et H. En effet, ces deux grandeurs ne peuvent jamais être toutes les deux sinusoïdales. Si on impose à l'une d'être sinusoïdale, l'autre peut être représentée par un développement en série de Fourrier .

impairs. On peut les écrire sous la forme complexe suivant :

$$H = \sum_{1}^{n} H_n \exp j(nwt + \psi_n)$$
(II. 31)

$$B = \sum_{n=1}^{n} B_n \exp j \left( nwt + \psi_n - \theta_n \right)$$
(II. 32)

Avec : n = 1, 3, 5.....

 $H_n$  et  $B_n$  sont les amplitudes des harmoniques de rang n du champ et du l'induction respectivement.

 $\psi_n \,$  est l'angle de phase de l'harmonique n ;

 $\theta_n$  est l'angle de déphasage hystérétique de l'harmonique n.

On introduit l'expression (II.30) et on calcule la dérivée partielle des équations (II.31) et (II.32),on aura

$$\sum_{1}^{n} \left[ \left( H_{n}^{"} - H_{n}(\psi_{n}^{\prime})^{2} \right) + j \left( H_{n} \psi_{n}^{"} + 2H_{n}^{\prime} \psi_{n}^{\prime} \right) \right] expj(nwt + \psi_{n})$$

$$= \sum_{1}^{n} \left[ \left\{ j \frac{nw}{\rho} B_{n} \exp(-j\theta_{n}) \exp(nwt + \psi_{n}) \right\} \right] \qquad (\text{II. 33})$$

tels que  $H_n$  et  $\psi_n$  sont des fonctions de la variables x et non pas de t.

 $H'_n$ ;  $\psi'_n$ ;  $H''_n$  et  $\psi''_n$  sont respectivement leurs dérivées partielles première et secondes. En écrivant l'égalité (II.33) pour une seule harmonique de rang n donnée, le terme exp  $j(nwt+\psi_n)$  sera simplifié et par identification terme à terme des parties réelles et imaginaires, on aura

$$H_n'' - H_n(\psi_n')^2 = \frac{nw}{\rho} D_n$$
 (II.34)

$$H_n\psi_n^{"} + 2H_n^{\prime}\psi_n^{"} = \frac{nw}{\rho}C_n \tag{II.35}$$

Avec: 
$$C_n = B_n \cos \theta_n$$
  $\overline{B}_n = C_n - jD_n$   
 $D_n = B_n \sin \theta_n$   $B_n = \sqrt{C_n^2 + D_n^2}$  (II.36)

#### Résolution mathématique des équations (II.33) et (II.34)

Pour simplifier les formules, nous omettons l'utilisation de l'indice n et nous appliquons les identités suivantes :

$$H'' = \frac{1}{2} \frac{d}{dH} (H')^2 \qquad \text{et} \qquad \psi'' = H' \frac{d}{dh} (\psi')$$

Les équations(II.34) et (II.35) s'écrivent :

$$\frac{d}{dH}(H')^2 = 2\frac{w}{\rho}C\,\mathrm{tag}\theta + 2\mathrm{H}(\psi')^2 \tag{II.37}$$

$$H'\left[H\frac{d}{dx}(\psi')^{2} \pm 4(\psi')^{2}\right] = 2\frac{w}{\rho}C\psi'$$
 (II.38)

Pour résoudre les équations (II.36) et (II.37), nous supposons par hypothèse :

$$(\psi')^2 = \frac{w}{2\rho} \frac{C(P-\operatorname{tang}\theta)}{H}$$
(II.39)

C'est la formule généralisée de la théorie linéaire, où P est une quantité initialement indéterminée.

$$\psi' = \frac{d\psi}{dx} = \sqrt{\frac{w\mu}{2\rho}} = \frac{1}{\rho} = \text{constante}$$

Où :

$$\mu = \frac{c}{H}$$
; P=1, tang  $\theta = 0$  et  $\delta$  est la profondeur de pénétration.

Insérons l'équation (II.39) dans (II.37) et par intégration, on aura :

$$(H')^2 = \frac{w}{\rho} \int_0^H (P + \tan \theta) C dH$$
(II.40)

On considère *P* et  $\theta$  provisoirement constantes, on aura ;

$$H' = \left[ (P + \tan \theta) \frac{w}{\rho} \int_0^H C dH \right]^{\frac{1}{2}}$$
(II.41)

L'équation différentielle (II.39) résulte de l'équation suivante :

$$H\frac{d}{dH}(\psi')^2 = \frac{w}{2\rho}(P - \tan\theta)\left[\frac{dC}{dH} - \frac{C}{H}\right]$$
(II.42)

Avec l'insertion des équations (II.40) et (II.42) dans (II.39),on trouve :

$$H'(P - \tan \theta)^{\frac{1}{2}} = \frac{4}{3 + \frac{HdC}{CdH}} \left[\frac{w}{2\rho} CH\right]^{\frac{1}{2}}$$
(II.43)

Et par élimination de *H* dans les équations (II.41) et (II.43) :

$$(P^{2} - \tan^{2}\theta)^{\frac{1}{2}} = \frac{4}{3 + \frac{HdC}{CdH}} \left[ \frac{CH}{2\int_{0}^{H} CdH} \right]^{\frac{1}{2}}$$
(II.44)

On a supposé P et  $\theta$  des quantités constantes, il s'ensuit que le second terme de l'équation (II.44) et aussi constant. Cette condition est réalisée dans le cas où la constante C est une fonction de puissance.

$$\mathbf{C} = \mathbf{K} \cdot H^r \tag{II.45}$$

Avec K et r des constantes ;dans ce cas, on a :

$$\frac{H}{c}\frac{dC}{dH} = r\int_0^H CdH = \frac{CH}{1+r}$$
(II.46)

L'équation (II.44) devient :

$$(P^2 - \tan^2 \theta)^{\frac{1}{2}} = \frac{4}{3+r} \left(\frac{1+r}{2}\right)^{\frac{1}{2}} = q$$
(II.47)

A partir de l'équation (II.47), on obtient :

$$P \pm \tan \theta = (q^2 \pm \tan^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \pm \tan \theta \qquad (\text{II.48})$$

Où bien,

avec: 
$$D=C \tan \theta$$
 et  $A=(q^2C^2+D^2)^{\frac{1}{2}}$  (II.49)

$$C(P \pm \tan \theta) = A \pm D \tag{II.50}$$

En insérant l'équation (II.50) dans l'équation (II.40) et (II.39), on obtient finalement la solution de l'équation (II.34) et (II.35) donnée comme suit :

$$H'_{n} = -\left[n\frac{w}{p}\int (A_{n} + D_{n})dH_{n}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(II.51)

$$H_n \psi'_n = -\left[n \frac{w}{p} \frac{1}{2} (A_n - D_n) H_n\right]^{\frac{1}{2}}$$
(II.52)

Avec :

$$A_n = [(q_n C_n)^2 + D_n^2]$$
;  $q_n = \frac{4}{3+r_n} \left[\frac{1+r_n}{2}\right]^{\frac{1}{2}}$ 

#### II.2.2. Analyse basée sur induction magnétique sinusoïdale

Si on a une induction magnétique sinusoïdale :

$$B = B_m \cos \omega t = \frac{1}{2} B_m (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t})$$
(II.53)

L'expression du champ magnétique H sera donnée sous forme d'une décomposition en série de Fourier.

$$H = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H_n e^{j(n\omega t + \theta_n)} = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H_n e^{jn\omega t} e^{j\theta_n}$$
(II.54)

$$H = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \overline{H}_n \, e^{jn\omega t} \tag{II.55}$$

Où: 
$$\overline{H}_n = H_n e^{j\theta_n} = H_n \cos \theta_n + j H_n \sin \theta_n$$
 (II.56)

$$\overline{H}_n = F_n + jG_n \tag{II.57}$$

$$F_{n} = H_{n} \cos \theta_{n} \qquad \qquad G_{n} = H_{n} \sin \theta_{n}$$
(II.58)  
$$H_{n} = \sqrt{F_{n}^{2} + G_{n}^{2}} \qquad \qquad \theta_{n} = \operatorname{arctg} \left[\frac{G_{n}}{F_{n}}\right]$$

L'équation (II.55) nous donne :

$$2H = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \overline{H}_n \, e^{jn\omega t}$$

Après la décomposition en série de Fourier, la forme de  $\overline{H}_n$  sera donné par l'équation suivante :

$$\overline{H}_{n} = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\pi} H e^{-jn\omega t} d(\omega t)$$
$$= \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\pi} H \cos n\omega t d(\omega t) - j\frac{2}{\pi} \int_{0}^{\pi} H \sin n\omega t d(\omega t)$$
(II.59)

Par identification entre (II.57) et (II.59) :

$$\begin{cases} F_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} H \cos n\omega t \, d(\omega t) \\ G_{n=} - \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} H \sin n\omega t d(\omega t) \end{cases}$$
(II.60)

D'autre part, on a :

$$\begin{cases}
H_m = \frac{1}{2}(H_I + H_{II}) \\
H_h = \frac{1}{2}(H_{II} - H_I)
\end{cases}$$
(II.61)

Où :  $H_I$  est la branche supérieure du cycle d'hystérésis et  $H_{II}$  est la branche inférieure du cycle d'hystérésis.

A noter que :  $H_m$  :est une fonction antisymétrique par rapport à  $wt = \frac{\pi}{2}$ 

 $H_h$  :est une fonction symétrique par rapport à  $wt = \frac{\pi}{2}$ 



Figure II. 3 : Cycle d'hystérésis statique pour une induction sinusoïdale B

D'après cette figure on aura la forme de  $H_m$  et  $H_h$ .



Figure II.4: allure de  $H_m$  et  $H_h$  en fonction de  $\omega t$ 

D'après l'équation (II.61) on tire :

$$H = H_I = H_m - H_h$$

Avec : *wt* variant de 0 à  $\pi$  .

En remplaçant *H* donné par la relation (II.60), on trouve :

$$\begin{cases} F_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (H_m - H_h) \cos n\omega t d(\omega t) \\ G_n = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (H_m - H_h) \sin n\omega t d(\omega t) \\ F_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} H_m \cos n\omega t d(\omega t) - \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} H_h \cos n\omega t d(\omega t) \\ G_n = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} H_m \sin n\omega t d(\omega t) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} H_h \sin n\omega t d(\omega t) \end{cases}$$
(II.63)

On sait que le résultat de l'intégrale de 0 à  $\pi$  du produit d'une fonction symétrique par une fonction antisymétrique est nul, donc l'écriture de cette équation devient comme suit :

$$\begin{cases} F_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} H_m \cos n\omega t d(\omega t) \\ G_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} H_h \sin n\omega t d(\omega t) \end{cases}$$
(II.64)

Notre étude est basé sur le fondamental :

$$F_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi} H_m \cos \omega t d(\omega t) \tag{II.65}$$

$$G_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi} H_h \sin \omega t d(\omega t) \tag{II.66}$$

On a :

$$\frac{d\sin\omega t}{d\omega t} = \cos\omega t \Rightarrow \cos\omega t d(\omega t) = d\sin\omega t \qquad (II.67)$$

On remplaçant ce résultat dans l'équation (II.65), on obtient :

$$F_{1} = \frac{4}{\pi} \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} H_{m} \, d \sin \omega t \tag{II.68}$$

#### Formule simplifié de G<sub>1</sub> :

On sait que :  $B = B_{max} \cos \omega t \Rightarrow \cos \omega t = \frac{B}{B_{max}}$  $d \cos \omega t = -\sin \omega t d(\omega t)$  (II.69)

On remplace cette équation dans la relation (II.66) on aura:  $G_{1} = \frac{4}{\pi} \int_{1}^{0} H_{h} (-d\cos wt) = -\frac{4}{\pi} \int_{1}^{0} H_{h} d(\cos wt) = \frac{4}{\pi} \int_{0}^{1} H_{h} d(\cos wt)$   $G_{1} = \frac{4}{\pi} \int_{0}^{1} H_{h} \frac{dB}{B_{max}} = \frac{4}{\pi B_{max}} \int_{0}^{B_{max}} H_{h} dB$   $\pi B_{max} G_{1} = 4 \int_{0}^{B_{max}} H_{h} dB = W_{h}$   $G_{1} = \frac{W_{h}}{\pi B_{max}} = \frac{4 \int_{0}^{B_{max}} H_{h} dB}{\pi B_{max}}$ (II.70)

Donc :

$$W_h = 4 \int_0^{B_{max}} H_h \, dB \tag{II.71}$$

Avec  $W_h$  représente les pertes par hystérésis par unité de volume par cycle.

## II.2.3. Analyse basée sur un champ magnétique sinusoïdale

Le champ magnétique est sinusoïdal, d'où son expression est donnée comme suit :

$$H = H_m \cos \omega t = \frac{1}{2} H_m (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t})$$
(II.72)

L'induction magnétique est donnée sous forme d'une décomposition en série de Fourier :

$$B = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n e^{j(n\omega t - \theta_n)}$$
$$= \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n e^{jn\omega t} e^{-j\theta_n}$$
(II.73)

$$B = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \overline{B}_n \, e^{jn\omega t} \tag{II.74}$$

Où :

$$\overline{B}_n = B_n e^{-j\theta_n} = B_n \cos \theta_n - j B_n \sin \theta_n \tag{II.75}$$

$$\overline{B}_n = C_n - jD_n \tag{II.76}$$

$$\begin{cases} C_n = B_n \cos \theta_n & D_n = B_n \sin \theta_n \\ B_n = \sqrt{F_n^2 + G_n^2} & \theta_n = \operatorname{arctg} \left[ \frac{D_n}{C_n} \right] \end{cases}$$
(II.77)

L'équation (II.74) nous donne :

$$2H = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \overline{H}_n \, e^{jn\omega t}$$

Après la décomposition en série de Fourier, la forme de  $\overline{H}_n$  sera donné par l'équation suivante :

$$\overline{B}_{n} = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\pi} B e^{-jn\omega t} d(\omega t)$$
$$= \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\pi} B \cos nwt d(\omega t) - j\frac{2}{\pi} \int_{0}^{\pi} B \sin n\omega t d(\omega t)$$
(II.78)

Par identification entre (II.76) et (II.77) :

$$\begin{cases} C_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B \cos n\omega t \, d(\omega t) \\\\ D_{n=} -j \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B \sin n\omega t d(\omega t) \end{cases}$$
(II.79)

On définit les grandeurs :

 $B_I = f(H)$ , est la branche supérieur du cycle d'hystérésis.  $B_{II} = f(H)$ , est la branche inférieur du cycle d'hystérésis

Avec :





Figure II.5 : Cycle d'hystérésis statique pour un champ magnétique sinusoïdale H

D'après cette figure on aura la forme de  $B_m$  et  $B_h$ .



Figure II.6: allure de  $B_m$  et  $B_h$  en fonction de  $\omega t$ 

 $B_m$  :est une fonction antisymétrique par rapport à  $wt = \frac{\pi}{2}$  et  $B_h$  :est une fonction symétrique par rapport à  $wt = \frac{\pi}{2}$ .

D'après l'équation (II.80) on tire :

$$B = B_I = B_m + B_h$$

Avec : *wt* variant de 0 à  $\pi$  .

En remplaçant *B* donné par la relation (II.60), on trouve :

$$\begin{cases} C_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (B_m + B_h) \cos n\omega t d(\omega t) \\ D_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (B_m + B_h) \sin n\omega t d(\omega t) \\ C_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B_m \cos n\omega t d(\omega t) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B_h \cos n\omega t d(\omega t) \\ D_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B_m \sin n\omega t d(\omega t) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B_h \sin n\omega t d(\omega t) \end{cases}$$
(II.82)

On sait que le résultat de l'intégrale de 0 à  $\pi$  du produit d'une fonction symétrique par une fonction antisymétrique est nul, donc l'écriture de cette équation devient comme suit :

$$\begin{cases} C_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B_m \cos n\omega t d(\omega t) \\ D_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B_h \sin n\omega t d(\omega t) \end{cases}$$
(II.83)

Notre étude est basé sur le fondamental :

$$C_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B_m \cos \omega t d(\omega t) \tag{II.84}$$

$$D_{1} = \frac{4}{\pi} \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} B_{h} \sin \omega t d(\omega t)$$
(II.85)

On a: 
$$\frac{d \sin \omega t}{d \omega t} = \cos \omega t \Rightarrow \cos \omega t d(\omega t) = d \sin \omega t$$
 (II.86)

On remplaçant ce résultat dans l'équation (II.84), on obtient :

$$C_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B_m \, d \sin \omega t \tag{II.87}$$

#### Formule simplifié de D<sub>1</sub> :

On sait que : 
$$H = H_{max} \cos \omega t \Rightarrow \cos \omega t = \frac{H}{H_{max}}$$
  
 $d \cos \omega t = -\sin \omega t d(\omega t)$  (II.88)

On remplace cette équation dans la relation (II.85) on aura :

$$D_{1} = \frac{4}{\pi} \int_{1}^{0} B_{h}(-d\cos wt)$$
  
=  $-\frac{4}{\pi} \int_{1}^{0} B_{h} d(\cos wt) = \frac{4}{\pi} \int_{0}^{1} B_{h} d(\cos wt)$   
 $D_{1} = \frac{4}{\pi} \int_{0}^{1} B_{h} \frac{dH}{H_{max}} = \frac{4}{\pi H_{max}} \int_{0}^{H_{max}} B_{h} dH$   
 $\pi H_{max} D_{1} = 4 \int_{0}^{H_{max}} B_{h} dH = W_{h}$ 

$$D_1 = \frac{W_h}{\pi H_{max}} = \frac{4 \int_0^{H_{max}} B_h dH}{\pi H_{max}} \tag{II.89}$$

Donc :

$$W_h = 4 \int_0^{H_{max}} B_h \, dH$$
 (II.90)

Avec :  $W_h$  représente les pertes par hystérésis par unité de volume par cycle.

#### II.3. Champ électrique induit et densité des pertes magnétiques [7]

#### II.3.1. Expression du champ électrique

L'amplitude du champ électrique à la surface du matériau pour l'harmonique fondamentale (n=1) est donné par :

$$E_{10} = \frac{2}{H_{01}} \sqrt{P_0^2 + Q_0^2} \tag{II.91}$$

 $H_{01}$  est l'amplitude du champ magnétique à la surface du matériau.

La valeur efficace du champ électrique est alors

$$E = \frac{E_{10}}{\sqrt{2}}$$
 [V/m] (II.92)

#### II.3.2. Densité de puissance active

On note par  $P_0$  la densité des pertes de puissance totale à la surface du matériau due à l'hystérésis et aux courants induits.

$$P_0 = \sum_{1}^{\infty} P_{0n} \qquad [W/m^2] \qquad (II.93)$$

Où :

$$P_{0n} = \frac{1}{2} H_{0n} \sqrt{n w \rho \int_0^{H0n} (A_n + D_n) dH_n}$$
(II.94)

Pour le fondamental (n=1),on aura :

$$P_0 = P_{01} = \frac{1}{2} H_{01} \sqrt{w\rho \int_0^{H01} (A_1 + D_1) dH_1}$$
(II.95)

Avec :

$$A_{1} = \sqrt{(q_{1}C_{1})^{2} + D_{1}^{2}} ; \qquad D_{1} = \frac{G_{1}}{H_{1}} B_{1}$$

$$C_{1} = \frac{F_{1}}{G_{1}} B_{1} ; \qquad q_{1} = \frac{4}{3+r_{1}} \left[\frac{1+r_{1}}{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$r_{1} = \frac{H_{1}}{C_{1}} \frac{dC_{1}}{dH_{1}} = \frac{\mu_{d}}{\mu}$$

 $\mu_d$ : est la perméabilité différentielle,

r<sub>1</sub> :est une constante

## II.3.3. Densité de puissance réactive

La densité des pertes réactives totales à la surface du matériau est donnée par :

$$Q_0 = \sum_{1}^{\infty} Q_{0n}$$
 [VAR/m<sup>2</sup>] (II.96)

Où :

$$Q_{0n} = \frac{1}{2} H_{0n} \sqrt{\frac{1}{2} n w \rho [A_n - D_n] H_{0n}}$$
(II.97)

Pour le fondamental (n=1) :

$$Q_{01} = \frac{1}{2} H_{01} \sqrt{\frac{1}{2} w \rho [A_1 - D_1] H_{01}}$$

#### **II.3.4.** Expression de puissance apparente

Sur la surface du matériau, le module de S s'écrit :

$$S_0 = \sqrt{P_0^2 + Q_0^2}$$
 [KVA] (II.98)

# II.3.5. Formule simplifiées des pertes

## a) Cas d'un champ électrique sinusoïdal à la surface

$$P_0 = 0,475 H_{\text{max}} \sqrt{w\rho \left[ w_{\text{B}} + \frac{1}{2\pi} \right] W_{\text{h}}} \qquad [W/m^2] \qquad (II.99)$$

Avec :

$$W_{B} = \int_{0}^{H_{max}} B_{max} dH \qquad [J/m^{2}]$$
$$W_{h} = 4 \int_{0}^{B_{max}} H_{max} dB \qquad [J/m^{3}]$$

La valeur de E est donnée par :

$$E = \sqrt{\frac{w\rho}{2} \left( W_{B} + \frac{1}{2} \left( B_{max} H_{max} \right) \right)} \qquad [Am] \qquad (II.100)$$

# b) Cas d'un champ magnétique sinusoïdal à la surface

$$P_0 = 0.525 H_{\text{max}} \sqrt{1.1 W_B \frac{1}{2\pi} W_h}$$
 [W/m<sup>2</sup>] (II.101)

Avec :

$$W_{h} = 4 \int_{0}^{B} H_{h} dB$$
 [J/m<sup>3</sup>] (II.102)





# III.1. Circuits de caractérisation des matériaux doux [1]

Pour caractériser un matériau magnétique doux, il est impératif d'utiliser un circuit magnétique fermé. Cela vient du fait que, dans tout circuit ouvert, l'échantillon est soumis à un champ démagnétisant interne, indésirable car le plus souvent inhomogène. Pour ces raisons, certaines formes de circuits sont recommandées pour la caractérisation des matériaux doux. Ils sont tous pourvus de deux enroulements, l'un pour l'excitation et l'autre pour la mesure. Ils fonctionnent en transformateur à vide.

## III.1.1. Cadre à bande unique

L'échantillon de mesure est constitué par une seule tôle, de forme carrée ou rectangulaire, et de dimensions suffisantes pour représenter un lot commercial. La fermeture du circuit magnétique aux deux extrémités de la bande est assurée par un, ou de préférence deux culasses mobiles, construites en matériau de grande perméabilité (Figure III.1)



Figure III.1 : Schéma de principe d'un cadre à bande unique comportant deux culasses de fermeture du flux.

La section des culasses est choisie très supérieure à celle de l'échantillon, par exemple 30 fois ou 50 fois plus grande. En utilisation dynamique les culasses doivent être feuilletées. Elles peuvent être réalisées en tôles FeSi de bonne qualité, ou mieux en alliage FeNi à haute perméabilité. Si on choisit d'effectuer les mesures sur des tôles de grandes dimensions, par exemple 500x500 mm<sup>2</sup> (norme CET 68-404-3), alors les culasses sont obligatoirement très lourdes. Une bonne fermeture du circuit magnétique, avec contrôle du parallélisme des faces d'appui et contrôle de la pression d'appui nécessite une construction mécanique très soignée.

Pour la mise en place d'une bande échantillon, on commence par ouvrir le circuit magnétique, puis on glisse la bande dans un fourreau qui supporte les bobinages d'excitation et de mesure, et on referme ensuite le circuit. L'aimantation de la bande est uniforme par construction dans sa partie centrale.

Parfaitement réalisé, le cadre à bande unique constitue, avec ses accessoires, un dispositif complexe mais très performant. Il permet en particulier la mesure absolue de toutes les grandeurs magnétiques caractéristiques des matériaux doux.

## **III.1.2.** Cadre à bande unique pour mesures bidimensionnelles

Il s'agit là de circuit magnétique permettant d'étudier le comportement d'une tôle- échantillon quand on impose une loi de variation de l'un des vecteurs magnétiques dans le plan de la tôle, par exemple la polarisation J(t). Il est particulièrement adapté aux études en champs tournants, circulaires ou elliptiques, et aux études de tôles anisotropes. La figure III.2 donne le schéma de principe d'un tel circuit.



**Figure III.2** : Schéma d'un cadre à bande unique pour des mesures bidirectionnelles.

Les culasses supérieures de fermeture du flux dans les directions OX et OY ne sont pas représentées, ni les enroulements d'excitation et de mesure.

## III.1.3. Tore

Le procédé le plus pertinent pour relever les caractéristiques magnétiques d'un matériau est de réaliser avec ce dernier un tore de section circulaire ou rectangulaire tel que le rayon moyen  $R_{moy}$  soit grand vis-à-vis de l'épaisseur  $\beta$  (Figure III.3).



Figure III.3 : Coupe dans un circuit torique

Le tore est généralement pourvu de deux enroulements régulièrement répartis sur sa circonférence.

• Un bobinage d'excitation comportant  $N_1$  spires, qualifié d'enroulement primaire, et parcouru par un courant excitation  $I_1$  permet de définir le champ magnétique H dans l'échantillon torique par l'utilisation du théorème d'Ampère appliqué à la ligne de champ de longueur moyenne  $L_{mov}$ :

$$H = \frac{N_1 I_1}{L_{moy}}$$
(III.1)

• L'enroulement de mesure comportant  $N_2$  spires, permet de déduire l'induction B dans le matériau à partir de la variation du flux  $\Delta \Phi$  produite par une modification du courant magnétisant  $I_1$ :

$$B = \frac{\Delta \Phi}{N_2 S}$$
(III.2)

S :est la section droite du tore.

Comme nous l'avons souligné, le circuit torique est le circuit idéal pour la caractérisation des matériaux, mais il est très difficile de réaliser un tore représentatif de la qualité des tôles ferromagnétiques, à cause :

- De l'anisotropie des tôles, toujours présente dans les tôles à grain non orientées. Elle est également considérable dans le cas des tôles à grains orientées.
- Des contraintes créées lors de l'enroulage de la bande, très difficiles à contrôler et à éliminer.
- De l'opération difficile et délicate de mise en place des deux bobinages qui nécessitent beaucoup de soins.

Alors l'obtention d'un échantillon représentatif de forme torique demande donc beaucoup de travail. Il n'y a pas de meilleure solution toutefois pour mesurer des alliages à très haute perméabilité. Cette technique de caractérisation est encore utilisée.

## III.1.4. Cadre Epstein

C'est un circuit fermé démontable, de forme carrée, utilisé dans le monde entier pour caractériser les tôles magnétiques. Sa construction a été soigneusement codifiée par de nombreux organismes de normalisation (CET, AFNOR, etc.). Le noyau magnétique est constitué de N bandes rectangulaires (N étant multiple de 4 et au moins égal à 16). Les dimensions recommandées pour chaque bande étant 280 x 30 mm<sup>2</sup> (Figure III.4). On utilise environ 0.5 kg de matière par noyau magnétique. Les N bandes sont assemblées en un circuit carré, avec des joints à recouvrement (Figure III.4) de telle sorte que le périmètre moyen vaut approximativement de 1 m.

L'avantage primordial du circuit Epstein réside dans le fait qu'il s'agit d'un circuit démontable, qu'un technicien bien entraîné peut mettre en place en quelques minutes. Par contre il y a un problème au niveau des coins, où il n'y a plus d'enroulements et une épaisseur double de la matière. Pour traiter en pratique ce système comme un circuit homogène, on a établi par des mesures comparatives soignées autour de Bmax = 1.5T, qu'il se comportait comme un circuit fermé ayant pour section la section moyenne d'un coté (c-à-d la section de N/4) et pour longueur ce qu'on appelle la longueur conventionnelle du circuit  $L_m$ , établie à  $L_m = 0.95 m$ .

Les quatre prismes du cadre d'Epstein sont munis chacun de deux enroulements : primaire et secondaire. Les quatre enroulements primaires, respectivement secondaires sont branchés en série et intégrés dans le circuit de mesure. De ce fait le cadre d'Epstein fonctionne donc comme un transformateur à vide. L'enroulement primaire est parcouru par le courant d'excitation  $I_1(t)$ . La

variation du flux induit dans l'enroulement secondaire une tension  $V_2(t)$ . Dans ce cas le champ magnétique est relié au courant primaire  $I_1(t)$  par la relation.

$$H(t) = \frac{N_1}{L_m} I_1(t) \tag{III.3}$$

Où :

 $N_1$ : est le nombre de spires de l'enroulement primaire ;

 $L_m$ : la longueur moyenne du circuit magnétique du cadre.



**Figure III.4** : Cadre Epstein, **a**) dimension, **b**) joints de recouvrement

L'induction magnétique est obtenue en intégrant la tension secondaire  $V_2(t)$ :

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S} \oint V_2(t) dt$$
(III.4)

Où :

 $N_2$ : est le nombre de spires de l'enroulement secondaire ;

S : la section du circuit magnétique du cadre.

# **III.2.** Dispositif expérimental

## III.2.1. Matériaux étudiés

Trois matériaux ont été caractérisés. Il s'agit de circuits magnétiques de transformateurs monophasés didactiques (tôles de FeSi à grains orientés) :

- Transformateur type ANONYME Tensions nominales : 110 / 220 V ;
- Transformateur type DELORENZO ; 2,0 kVA Tensions nominales : 25-50V / 220-440 V ;
- Transformateur démontable type PHYWE Bobine primaire :  $N_1 = 300$  spires ; Courant maximum  $I_1 = 4$  A Bobine secondaire :  $N_2 = 900$  spires ; Courant maximum  $I_2 = 1,2$  A

## III.2.2. Montage expérimental

Pour visualiser l'image du champ H et celle de l'induction magnétique B dans les échantillons étudiés, nous avons utilisé le montage de la figure III.5 qui est constitué de l'appareillage suivant :

- Un ampèremètre ferromagnétique de type GANZ HLA, de classe 1 et de plusieurs calibres,
- Un voltmètre ferromagnétique de type GANZ HLA, de classe 1 et de plusieurs calibres,
- Un rhéostat de type PHYWE, de caractéristiques 5  $\Omega$ ; 10 A,
- Un oscilloscope à mémoire de type HAMEG HM 1507-2,
- Une alimentation à courant alternatif type AEG, à tension réglable (0-230 /400V-50A),
- Un migro-ordinateur Pentium III 800 Mhz.



Figure III.5 : Schéma de montage

# III.3. Modes opératoires des mesures et calculs

## III.3.1. Mesures effectuées

On fait varier la tension d'alimentation  $V_I$  jusqu'à la valeur égale à 1,1 fois la tension nominale du transformateur étudié.

Pour chaque valeur efficace de la tension primaire  $V_l(t)$ ,

- Le signal V<sub>Rh</sub>(t) (image du champ H(t)), prélevé aux bornes du rhéostat R<sub>h</sub>, est injecté à la voie CHII de l'oscilloscope ;
- Le signal V<sub>20</sub>(t), (image de la dérivée de l'induction B(t)), prélevé aux bornes de l'enroulement secondaire, est injecté à la voie CHI de l'oscilloscope.

Ces deux signaux sont envoyés et enregistrés sur un micro-ordinateur à l'aide du logiciel SP107 livré avec l'oscilloscope, puis traités avec le logiciel Microsoft Excel.

## III.3.2. Calculs des pertes fer

Le fonctionnement à vide d'un transformateur peut être modélisé par le schéma électrique équivalent suivant :



Figure III.6. Schéma électrique équivalent

Les éléments  $r_1$  et  $l_1 \omega$  représentent respectivement la résistance et la réactance de fuites partielles de l'enroulement primaire.

Les pertes fer sont représentées par la puissance absorbée par la résistance fictive  $R_{\mu}$  située au primaire, alimentée par  $E_1$  et traversée par la composante active  $I_{1a}$  du courant primaire  $I_1$ .

$$P_f = \frac{E_1^2}{R_{\mu}} = R_{\mu} (I_{1a})^2$$
(III.6)

On peut aussi les écrire sous la forme suivante :

$$P_{f} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} e_{1} i_{1} dt$$
(III.7)

Or le rapport de transformation est donné par :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{E_1} \Longrightarrow E_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \tag{III.8}$$

En introduisant l'égalité (III.8) dans (III.7) on obtient :

$$P_{f} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \frac{N_{1}}{N_{2}} V_{2} I_{1} dt \\ I_{1} = \frac{V_{Rh}}{R_{h}}$$
 
$$\Rightarrow P_{f} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \frac{N_{1}}{N_{2}} \frac{1}{R_{h}} V_{Rh} V_{2} dt$$
 (III.9)

Finalement

$$P_{f} = \frac{N_{1}f}{N_{2}R_{h}} \int_{0}^{T} V_{Rh}V_{2}dt$$
(III.10)

Avec :

T = 1/f est la période ;

f: la fréquence de la tension d'alimentation V<sub>1</sub>.

#### Remarque

- Tous les calculs sont effectués numériquement à l'aide du logiciel Microsoft Excel.
- Pour le calcul des pertes fer, nous avons eu recours à la méthode des trapèzes dont nous rappellerons brièvement le principe ci-dessous.

## III.3.3. Intégration numérique [8]

## Formule des trapèzes

Soit f(x) une fonction quelconque. L'intégrale de y = f(x) entre les bornes *a* et *b* (figure III.7) est égale à l'aire du trapèze hachuré.

$$\int_{a}^{b} f(x)dx = \frac{1}{2}h(y_0 + y_1)$$
(III.22)

Avec : h = b - a



# Formule généralisée

Si on subdivise l'intervalle [a, b] en n intervalles égaux (figure III.8) avec :

 $x_i = a + ih \qquad i = 0, \dots, n$  $h = \frac{(b-a)}{n}$ 

On aura :

Et

$$\int_{a}^{b} f(x)dx = \sum_{i=1}^{n} \int_{x_{i-1}}^{x_{i}} f(x)dx = \sum_{i=1}^{n} \frac{h}{2}(y_{i} + y_{i-1}) \quad (\text{III.23})$$

Soit :



Figure III.8

$$\int_{a}^{b} f(x)dx = h\left(\frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} + \frac{y_n}{2}\right)$$
(III.24)

# III.4. Résultat expérimentaux

La visualisation des signaux  $V_{Rh}(t)$  coté primaire et  $V_{20}(t)$  coté secondaire des transformateurs est réalisée avec un oscilloscope à mémoire relié directement à un ordinateur. Quand au traitement des données, il est effectué à l'aide du logiciel Microsoft Excel.

## III.4.1. Induction et champ magnétiques

Il est important de signaler que la forme de la tension délivrée par la source n'est pas sinusoïdale comme l'illustre la figure III.9. Par conséquent, les mesures expérimentales ont été réalisées pour des inductions et des champs magnétiques non sinusoïdaux.



Figure III.9 : Allure de la tension délivrée par la source

#### **III.4.1.1. Transformateur Anonyme**

Les mesures ont été effectuées pour les valeurs efficaces des tensions primaires  $V_1$  suivantes :

$V_{I}(V)$	70	80	90	100	105	110	115	120
$V_{20}(V)$	134	155	174	194	202	213	225	238

Les allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  sont représentées simultanément ci-dessous pour chaque valeur de  $V_1$ :



**Figure III.10 :** Allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  pour  $V_1 = 70$  V.















**Figure III.14 :** Allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  pour  $V_1 = 105$  V.







**Figure III.16 :** Allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  pour  $V_1 = 115$  V.



**Figure III.17 :** Allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  pour  $V_1 = 120$  V.

## **III.4.1.2. Transformateur DELORENZO**

Pour ce transformateur, les mesures ont été effectuées avec les valeurs efficaces des tensions primaires  $V_1$  suivantes :

$V_{l}(V)$	10	15	17,5	20	22	25	27,5	30
$V_{20}(V)$	55	82	96	108	120	135	146	161

Les allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  sont représentées simultanément ci-dessous pour chaque valeur de  $V_1$ :







**Figure III.19 :** Allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  pour  $V_1 = 15$  V.







**Figure III.21 :** Allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  pour  $V_1 = 20$  V.







**Figure III.23 :** Allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  pour  $V_1 = 25$  V.






**Figure III.25 :** Allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  pour  $V_1 = 30$  V.

#### **III.4.1.3.** Transformateur PHYWE

Les mesures ont été effectuées pour ce transformateur, avec les valeurs efficaces des tensions primaires  $V_1$  suivantes :

$V_{I}(V)$	10	15	17,5	20	22,5	25	28
$V_{20}(V)$	28	41,5	48,5	55	64	71	79

Les allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  sont représentées simultanément ci-dessous pour chaque valeur de  $V_1$ :



**Figure III.26 :** Allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  pour  $V_1 = 10$  V.







Figure III.28 : Allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  pour  $V_1 = 17,5$  V.















**Figure III.32 :** Allures de  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  pour  $V_1 = 28$  V.

#### III.4.1.4. Interprétations des résultats

Comme nous l'avons signalé précédemment, la tension  $V_{rh}(t)$  aux bornes du rhéostat R<sub>h</sub> (fig. III.5) représente l'image du champ magnétique H(t) dans le matériau du circuit magnétique, tandis que la tension  $V_{20}(t)$  aux bornes de l'enroulement secondaire, est l'image de la dérivée par rapport au temps de l'induction magnétique B(t) dans le transformateur.

Les tensions nominales sont connues pour les transformateurs Anonyme ( $V_{In} = 110$  V) et DELORENZO ( $V_{In} = 25$  V). Nous remarquons d'après les résultats qui précèdent que pour les valeurs de la tension d'alimentation  $V_I$  faibles devant ces valeurs nominales (figures III.10 à III.12, et figures III.18 à III.20),  $V_{20}$  varie sensiblement proportionnellement à  $V_{rh}$ . En outre, ces deux grandeurs restent très peu perturbées, leur allure est proche de celle de la tension  $V_I$  délivrée par la source d'alimentation (figure III.9). Ceci peut être expliqué par le fait que l'état magnétique des circuits magnétiques de ces transformateurs est situé dans la zone linéaire de la loi d'aimantation B(H).

Quant au transformateur didactique démontable PHYWE, les remarques signalées précédemment sont également ici valables et ceci pour toutes les valeurs choisies de la tension d'alimentation (figures III.26 à III.32). Nous pouvons conclure que ce transformateur a été soumis aux essais sous tensions d'alimentation  $V_I$  inférieures à la tension primaire nominale dont on ignore la valeur.

Nous constatons aussi d'après les résultats précédents que pour les valeurs de la tension d'alimentation  $V_1$  égales et voisines des valeurs nominales (figures III.13 à III.17, et figures III.21 à III.25),  $V_{20}$  ne semble plus varier proportionnellement à  $V_{rh}$ . La forme de ces deux grandeurs est perturbée, surtout pour la tension  $V_{rh}$  (champ magnétique). Ceci peut trouver son explication par le fait que l'état magnétique des circuits magnétiques de ces transformateurs est situé dans la zone saturée de la caractéristique d'aimantation B(H).

# **III.4.2.** Pertes fer

Nous présentons ci dessous pour chaque transformateur les grandeurs enregistrées numériquement au micro ordinateur et les calculs détaillés des pertes fer avec le Logiciel Microsoft Excel.

#### III.4.2.1. Transformateur Anonyme

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t)*Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t) dt$	Pfer(w)
0,00E+00	-1,20E+01	1,60E+00	-1,92E+01	0,00E+00	1,17E+01
1,00E-05	-1,20E+01	1,60E+00	-1,92E+01	-1,92E-04	
2,00E-05	-1,20E+01	1,56E+00	-1,87E+01	-3,82E-04	
3,00E-05	-1,20E+01	1,56E+00	-1,87E+01	-5,69E-04	
4,00E-05	-1,20E+01	1,56E+00	-1,87E+01	-7,56E-04	
5.00E-05	-1.60E+01	1.56E+00	-2.50E+01	-9.74E-04	-
6.00E-05	-1.20E+01	1.56E+00	-1.87E+01	-1.19E-03	
7.00E-05	-1.60E+01	1.56E+00	-2.50E+01	-1.41E-03	
8.00E-05	-1.60E+01	1.56E+00	-2.50E+01	-1.66E-03	
9.00E-05	-1.60E+01	1.52E+00	-2.43E+01	-1.91E-03	
1.00E-04	-1.60E+01	1.52E+00	-2.43E+01	-2.15E-03	
1,50E-04	-2.00E+01	1.52E+00	-3.04E+01	-3.52E-03	-
2.00E-04	-2.00E+01	1.44E+00	-2.88E+01	-5.00E-03	-
3.00E-04	-2 80E+01	1 40E+00	-3.92E+01	-6 74E-03	-
3 50E-04	-3 20E+01	1,36E+00	-4.35E+01	-8.81E-03	-
4 00E-04	-3 20E+01	1,32E+00	-4 22E+01	-1 10E-02	-
5,00E-04	-4 00E+01	1,02E+00	-4 96E+01	-1 57E-02	-
5,00E-04	-4,00E+01	1,24E+00	-5,30E+01	-1,37E-02	
5,50E-04	-4,40E+01	1,20E+00	-5,20E+01	-1,02E-02	
7.00E-04	-4,00E+01	1,10E+00	-5,37E+01	-2,000-02	-
7,00E-04	-5,20E+01	1,120+00	-5,82E+01	-2,03E-02	-
7,50E-04	-5,00E+01	1,00E+00	-0,03E+01	-2,94E-02	-
0,00E-04	-0,00E+01		-0,00E+01	-3,24E-02	-
9,00E-04	-0,40E+01	9,00E-01	-0,14E+01	-3,04E-02	-
3,30E-04	-0,00E+01	8 80E-01	-5,20E+01	-4,14E-02	-
1,00E-03	-0,80E+01	4 80E-01	-3,90L+01	-4,43E-02	-
2.00E-03	-1 24E+02	1 60E-01	-1 98E+01	-8 98E-02	-
3.00E-03	-1,2+E+02	-4 40F-01	7 57E+01	-6.35E-02	-
3 50E-03	-1 84E+02	-6.80E-01	1 25E+02	-1 23E-02	-
4 00E-03	-1 92E+02	-8 80E-01	1, <u>20E+02</u>	6 25E-02	-
5.00E-03	-1 96E+02	-1 24E+00	2 43E+02	2 69E-01	-
5 50E-03	-1.96E+02	-1 40E+00	2 74F+02	3 99E-01	-
6.00E-03	-1 80E+02	-1 56E+00	2 81E+02	5.43E-01	-
7 00E-03	-1.36E+02	-1 88E+00	2,56E+02	8 21F-01	-
7,50E-03	-1.08E+02	-1 96E+00	2 12E+02	9.38E-01	-
8.00E-03	-8.00E+01	-1.96E+00	1.57E+02	1.03E+00	-
9.00E-03	-3 60E+01	-1.92E+00	6.91E+01	1 14E+00	-
9,50E-03	-1.20E+01	-1.80E+00	2.16E+01	1,16E+00	
1 00E-02	1, <u>202+01</u>	-1 56E+00	-2 50E+01	1 16E+00	-
1,10E-02	6.80E+01	-8.40E-01	-5.71E+01	1,12E+00	
1,20E-02	1.24E+02	-1.20E-01	-1.49E+01	1.07E+00	
1.30E-02	1.72E+02	4.80E-01	8.26E+01	1,10E+00	
1.40E-02	1.96E+02	9.20E-01	1.80E+02	1.24E+00	1
1.50F-02	2.04F+02	1.28F+00	2.61F+02	1,46E+00	1
1.60E-02	1.92E+02	1.64E+00	3.15E+02	1.75E+00	1
1.70E-02	1.44E+02	1.92E+00	2.76E+02	2,05E+00	1
1.80E-02	8.80E+01	2.04E+00	1.80E+02	2,28E+00	1
1.90E-02	4.40E+01	2.00E+00	8.80E+01	2,41E+00	1
2,00E-02	-1,20E+01	1,60E+00	-1,92E+01	2,45E+00	1

Tableau III.4 : Calcul des pertes fer pour  $V_I = 70$ V

	1				
t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t)*Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t) dt$	Pfer(w)
0,00E+00	-1,20E+01	2,04E+00	-2,45E+01	0,00E+00	1,54E+01
1,00E-05	-1,60E+01	2,04E+00	-3,26E+01	-2,86E-04	
2,00E-05	-1,60E+01	2,00E+00	-3,20E+01	-6,09E-04	
3,00E-05	-1,60E+01	2,00E+00	-3,20E+01	-9,29E-04	
4,00E-05	-1,60E+01	2,00E+00	-3,20E+01	-1,25E-03	
5,00E-05	-1,60E+01	2,00E+00	-3,20E+01	-1,57E-03	
6,00E-05	-2,00E+01	1,96E+00	-3,92E+01	-1,92E-03	
7,00E-05	-2,00E+01	1,96E+00	-3,92E+01	-2,32E-03	
8,00E-05	-2,00E+01	1,96E+00	-3,92E+01	-2,71E-03	
9,00E-05	-2,00E+01	1,96E+00	-3,92E+01	-3,10E-03	
1,00E-04	-2,00E+01	1,92E+00	-3,84E+01	-3,49E-03	
1,50E-04	-2,40E+01	1,92E+00	-4,61E+01	-5,52E-03	
2,00E-04	-2,80E+01	1,88E+00	-5,26E+01	-7,89E-03	
3,00E-04	-3,20E+01	1,76E+00	-5,63E+01	-1,33E-02	
3,50E-04	-3,60E+01	1,72E+00	-6,19E+01	-1,62E-02	
4,00E-04	-4,00E+01	1,68E+00	-6,72E+01	-1,93E-02	]
5,00E-04	-4,40E+01	1,56E+00	-6,86E+01	-2,61E-02	
5,50E-04	-4,80E+01	1,52E+00	-7,30E+01	-2,98E-02	
6,00E-04	-5,20E+01	1,48E+00	-7,70E+01	-3,35E-02	
7,00E-04	-6,00E+01	1,36E+00	-8,16E+01	-4,15E-02	
7,50E-04	-6,40E+01	1,32E+00	-8,45E+01	-4,57E-02	
8,00E-04	-6,80E+01	1,28E+00	-8,70E+01	-4,99E-02	
9,00E-04	-7,20E+01	1,16E+00	-8,35E+01	-5,84E-02	
9,50E-04	-7,60E+01	1,12E+00	-8,51E+01	-6,27E-02	
1,00E-03	-8,00E+01	1,08E+00	-8,64E+01	-6,70E-02	
1,50E-03	-1,12E+02	6,00E-01	-6,72E+01	-1,07E-01	
2,00E-03	-1,44E+02	2,00E-01	-2,88E+01	-1,31E-01	
3,00E-03	-2,00E+02	-5,20E-01	1,04E+02	-9,61E-02	
3,50E-03	-2,16E+02	-8,00E-01	1,73E+02	-2,71E-02	
4,00E-03	-2,28E+02	-1,00E+00	2,28E+02	7,31E-02	
5,00E-03	-2,28E+02	-1,44E+00	3,28E+02	3,53E-01	
5,50E-03	-2,24E+02	-1,64E+00	3,67E+02	5,28E-01	
6.00E-03	-2.08E+02	-1.88E+00	3.91E+02	7.22E-01	
7.00E-03	-1.52E+02	-2.28E+00	3.47E+02	1.10E+00	
7.50E-03	-1.20E+02	-2.40E+00	2.88E+02	1.26E+00	
8.00E-03	-8.80E+01	-2.48E+00	2.18E+02	1.38E+00	
9.00E-03	-3.60E+01	-2.48E+00	8.93E+01	1.53E+00	
9.50E-03	-1.20E+01	-2.32E+00	2.78E+01	1.56E+00	
1.00E-02	1.60E+01	-2.00E+00	-3.20E+01	1.56E+00	1
1.10E-02	8.00E+01	-1.08E+00	-8.64E+01	1.49E+00	1
1.20E-02	1.44E+02	-1.60E-01	-2.30E+01	1.43E+00	1
1.30F-02	2.00F+02	5.60F-01	1.12F+02	1.46F+00	1
1.40F-02	2.32F+02	1.04F+00	2.41F+02	1.64F+00	1
1,50F-02	2.36F+02	1,48F+00	3,49F+02	1,94F+00	
1.60F-02	2 16F+02	1,92F+00	4 15F+02	2,32F+00	
1 70F-02	1 60F±02	2 32F±00	371F±02	2,32E+00	1
1.80F-02	9.60F+01	2.52E+00	2 42F+02	3.04F+00	1
1 90F-02	4 40F±01	2,52E+00	1 13F±02	3 21F+00	1
2.00F-02	-1.20F+01	2.04F+00	-2.45F+01	3,26F+00	1
2,302 02	.,_001	,= := : 00	_,	3,202.00	J

Tableau III.5 : Calcul des pertes fer pour  $V_I = 80V$ 

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t)*Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t) dt$	Pfer(w)
0,00E+00	-1,60E+01	2,68E+00	-4,29E+01	0,00E+00	2,00E+01
1,00E-05	-1,60E+01	2,64E+00	-4,22E+01	-4,26E-04	
2,00E-05	-1,60E+01	2,64E+00	-4,22E+01	-8,48E-04	
3,00E-05	-1,60E+01	2,60E+00	-4,16E+01	-1,27E-03	
4,00E-05	-2,00E+01	2,60E+00	-5,20E+01	-1,74E-03	
5,00E-05	-2,00E+01	2,60E+00	-5,20E+01	-2,26E-03	
6,00E-05	-2,00E+01	2,56E+00	-5,12E+01	-2,77E-03	
7,00E-05	-2,00E+01	2,60E+00	-5,20E+01	-3,29E-03	
8,00E-05	-2,00E+01	2,60E+00	-5,20E+01	-3,81E-03	
9,00E-05	-2,00E+01	2,56E+00	-5,12E+01	-4,32E-03	
1,00E-04	-2,00E+01	2,56E+00	-5,12E+01	-4,84E-03	
1,50E-04	-2,40E+01	2,48E+00	-5,95E+01	-7,81E-03	
2,00E-04	-2,80E+01	2,44E+00	-6,83E+01	-1,11E-02	
3,00E-04	-3,60E+01	2,32E+00	-8,35E+01	-1,85E-02	
3,50E-04	-3,60E+01	2,24E+00	-8,06E+01	-2,26E-02	
4,00E-04	-4,00E+01	2,16E+00	-8,64E+01	-2,70E-02	
5,00E-04	-4,80E+01	2,08E+00	-9,98E+01	-3,64E-02	
5,50E-04	-5,20E+01	2,00E+00	-1,04E+02	-4,15E-02	
6,00E-04	-5,60E+01	1,92E+00	-1,08E+02	-4,66E-02	
7,00E-04	-6,00E+01	1,80E+00	-1,08E+02	-5,72E-02	
7,50E-04	-6,80E+01	1,72E+00	-1,17E+02	-6,29E-02	
8,00E-04	-6,80E+01	1,64E+00	-1,12E+02	-6,86E-02	
9,00E-04	-7,60E+01	1,52E+00	-1,16E+02	-8,02E-02	
9,50E-04	-8,00E+01	1,44E+00	-1,15E+02	-8,61E-02	
1,00E-03	-8,40E+01	1,40E+00	-1,18E+02	-9,20E-02	
1,50E-03	-1,24E+02	7,60E-01	-9,42E+01	-1,48E-01	
2,00E-03	-1,60E+02	2,80E-01	-4,48E+01	-1,84E-01	
3,00E-03	-2,28E+02	-5,60E-01	1,28E+02	-1,46E-01	
3,50E-03	-2,48E+02	-8,80E-01	2,18E+02	-5,81E-02	
4,00E-03	-2,60E+02	-1,12E+00	2,91E+02	7,19E-02	
5,00E-03	-2,64E+02	-1,64E+00	4,33E+02	4,35E-01	
5,50E-03	-2,56E+02	-1,92E+00	4,92E+02	6,66E-01	
6,00E-03	-2,32E+02	-2,24E+00	5,20E+02	9,24E-01	
7,00E-03	-1,64E+02	-2,80E+00	4,59E+02	1,43E+00	
7,50E-03	-1,24E+02	-3,00E+00	3,72E+02	1,64E+00	
8,00E-03	-8,80E+01	-3,16E+00	2,78E+02	1,80E+00	
9,00E-03	-3,60E+01	-3,24E+00	1,17E+02	2,00E+00	
9,50E-03	-8,00E+00	-3,04E+00	2,43E+01	2,03E+00	
1,00E-02	2,00E+01	-2,64E+00	-5,28E+01	2,02E+00	
1,10E-02	8,40E+01	-1,44E+00	-1,21E+02	1,93E+00	
1,20E-02	1,60E+02	-2,80E-01	-4,48E+01	1,84E+00	
1,30E-02	2,32E+02	6,00E-01	1,39E+02	1,88E+00	
1,40E-02	2,64E+02	1,16E+00	3,06E+02	2,11E+00	
1,50E-02	2,68E+02	1,64E+00	4,40E+02	2,48E+00	
1,60E-02	2,44E+02	2,24E+00	5,47E+02	2,99E+00	
1,70E-02	1,76E+02	2,80E+00	4,93E+02	3,52E+00	
1,80E-02	1,00E+02	3,20E+00	3,20E+02	3,93E+00	
1,90E-02	4,40E+01	3,28E+00	1,44E+02	4,16E+00	
2,00E-02	-1,60E+01	2,68E+00	-4,29E+01	4,21E+00	J

Tableau III.6 : Calcul des pertes fer pour  $V_1 = 90$ V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t) * Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t) dt$	Pfer(w)
0,00E+00	-2,40E+01	3,44E+00	-8,26E+01	0,00E+00	2,53E+01
1,00E-05	-2,40E+01	3,44E+00	-8,26E+01	-8,26E-04	
2,00E-05	-2,80E+01	3,36E+00	-9,41E+01	-1,71E-03	
3,00E-05	-2,80E+01	3,36E+00	-9,41E+01	-2,65E-03	
4,00E-05	-2,80E+01	3,36E+00	-9,41E+01	-3,59E-03	
5,00E-05	-2,80E+01	3,36E+00	-9,41E+01	-4,53E-03	]
6,00E-05	-2,80E+01	3,28E+00	-9,18E+01	-5,46E-03	]
7,00E-05	-2,80E+01	3,28E+00	-9,18E+01	-6,38E-03	
8,00E-05	-2,80E+01	3,28E+00	-9,18E+01	-7,30E-03	
9,00E-05	-3,20E+01	3,28E+00	-1,05E+02	-8,28E-03	
1,00E-04	-3,20E+01	3,28E+00	-1,05E+02	-9,33E-03	]
1,50E-04	-3,20E+01	3,20E+00	-1,02E+02	-1,45E-02	]
2,00E-04	-3,60E+01	3,12E+00	-1,12E+02	-2,00E-02	1
3,00E-04	-4,00E+01	2,88E+00	-1,15E+02	-3,16E-02	]
3,50E-04	-4,80E+01	2,80E+00	-1,34E+02	-3,80E-02	1
4,00E-04	-4,80E+01	2,72E+00	-1,31E+02	-4,46E-02	]
5,00E-04	-5,60E+01	2,56E+00	-1,43E+02	-5,87E-02	]
5,50E-04	-6,00E+01	2,48E+00	-1,49E+02	-6,60E-02	]
6,00E-04	-6,40E+01	2,40E+00	-1,54E+02	-7,35E-02	1
7,00E-04	-7,20E+01	2,24E+00	-1,61E+02	-8,89E-02	1
7,50E-04	-7,60E+01	2,08E+00	-1,58E+02	-9,68E-02	1
8,00E-04	-8,00E+01	2,00E+00	-1,60E+02	-1,05E-01	1
9,00E-04	-8,80E+01	1,84E+00	-1,62E+02	-1,21E-01	]
9,50E-04	-9,60E+01	1,76E+00	-1,69E+02	-1,29E-01	]
1,00E-03	-1,00E+02	1,68E+00	-1,68E+02	-1,38E-01	
1,50E-03	-1,44E+02	8,80E-01	-1,27E+02	-2,13E-01	
2,00E-03	-1,92E+02	2,40E-01	-4,61E+01	-2,60E-01	]
3,00E-03	-2,68E+02	-6,40E-01	1,72E+02	-1,98E-01	
3,50E-03	-2,92E+02	-1,04E+00	3,04E+02	-7,52E-02	
4,00E-03	-3,04E+02	-1,28E+00	3,89E+02	9,93E-02	
5,00E-03	-2,96E+02	-1,92E+00	5,68E+02	5,85E-01	
5,50E-03	-2,80E+02	-2,32E+00	6,50E+02	8,95E-01	]
6,00E-03	-2,44E+02	-2,72E+00	6,64E+02	1,23E+00	
7,00E-03	-1,60E+02	-3,60E+00	5,76E+02	1,88E+00	
7,50E-03	-1,16E+02	-3,84E+00	4,45E+02	2,13E+00	
8,00E-03	-7,60E+01	-4,08E+00	3,10E+02	2,32E+00	
9,00E-03	-2,00E+01	-4,24E+00	8,48E+01	2,52E+00	
9,50E-03	4,00E+00	-3,92E+00	-1,57E+01	2,53E+00	
1,00E-02	2,80E+01	-3,28E+00	-9,18E+01	2,51E+00	
1,10E-02	9,60E+01	-1,68E+00	-1,61E+02	2,38E+00	]
1,20E-02	1,88E+02	-2,40E-01	-4,51E+01	2,26E+00	
1,30E-02	2,68E+02	8,00E-01	2,14E+02	2,34E+00	
1,40E-02	3,04E+02	1,44E+00	4,38E+02	2,67E+00	
1,50E-02	3,04E+02	2,00E+00	6,08E+02	3,20E+00	
1,60E-02	2,56E+02	2,88E+00	7,37E+02	3,90E+00	
1,70E-02	1,72E+02	3,68E+00	6,33E+02	4,60E+00	
1,80E-02	8,80E+01	4,24E+00	3,73E+02	5,10E+00	

Tableau III.7 : Calcul des pertes fer pour  $V_I = 100$ V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t) * Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t) dt$	Pfer(w)
0,00E+00	-2,40E+01	4,00E+00	-9,60E+01	0,00E+00	2,83E+01
1,00E-05	-2,40E+01	4,00E+00	-9,60E+01	-9,60E-04	
2,00E-05	-2,40E+01	4,00E+00	-9,60E+01	-1,92E-03	
3,00E-05	-2,40E+01	4,00E+00	-9,60E+01	-2,88E-03	
4,00E-05	-2,40E+01	3,92E+00	-9,41E+01	-3,82E-03	
5,00E-05	-2,80E+01	3,92E+00	-1,10E+02	-4,92E-03	
6,00E-05	-2,80E+01	3,92E+00	-1,10E+02	-6,02E-03	
7,00E-05	-2,80E+01	3,92E+00	-1,10E+02	-7,11E-03	
8,00E-05	-2,80E+01	3,92E+00	-1,10E+02	-8,21E-03	
9,00E-05	-2,80E+01	3,84E+00	-1,08E+02	-9,29E-03	
1,00E-04	-2,80E+01	3,84E+00	-1,08E+02	-1,04E-02	
1,50E-04	-3,20E+01	3,76E+00	-1,20E+02	-1,64E-02	
2,00E-04	-3,60E+01	3,68E+00	-1,32E+02	-2,25E-02	
3,00E-04	-4,00E+01	3,44E+00	-1,38E+02	-3,56E-02	
3,50E-04	-4,40E+01	3,36E+00	-1,48E+02	-4,26E-02	
4,00E-04	-4,80E+01	3,28E+00	-1,57E+02	-5,00E-02	
5,00E-04	-5,20E+01	3,04E+00	-1,58E+02	-6,54E-02	
5,50E-04	-5,60E+01	2,96E+00	-1,66E+02	-7,34E-02	
6,00E-04	-6,00E+01	2,80E+00	-1,68E+02	-8,18E-02	
7,00E-04	-6,80E+01	2,64E+00	-1,80E+02	-9,89E-02	
7,50E-04	-7,20E+01	2,48E+00	-1,79E+02	-1,08E-01	
8,00E-04	-7,60E+01	2,40E+00	-1,82E+02	-1,17E-01	
9,00E-04	-8,40E+01	2,24E+00	-1,88E+02	-1,35E-01	
9,50E-04	-8,80E+01	2,08E+00	-1,83E+02	-1,45E-01	
1,00E-03	-9,60E+01	1,92E+00	-1,84E+02	-1,54E-01	
1,50E-03	-1,44E+02	1,04E+00	-1,50E+02	-2,42E-01	
2,00E-03	-1,96E+02	4,00E-01	-7,84E+01	-3,00E-01	
3,00E-03	-2,88E+02	-7,20E-01	2,07E+02	-2,38E-01	
3,50E-03	-3,08E+02	-1,12E+00	3,45E+02	-1,01E-01	
4,00E-03	-3,24E+02	-1,44E+00	4,67E+02	9,68E-02	
5,00E-03	-3,16E+02	-2,08E+00	6,57E+02	6,54E-01	
5,50E-03	-2,96E+02	-2,56E+00	7,58E+02	1,01E+00	
6,00E-03	-2,56E+02	-3,04E+00	7,78E+02	1,40E+00	
7,00E-03	-1,60E+02	-4,08E+00	6,53E+02	2,14E+00	
7,50E-03	-1,12E+02	-4,48E+00	5,02E+02	2,43E+00	
8,00E-03	-7,20E+01	-4,80E+00	3,46E+02	2,64E+00	
9,00E-03	-1,60E+01	-4,96E+00	7,94E+01	2,84E+00	
9,50E-03	8,00E+00	-4,64E+00	-3,71E+01	2,85E+00	
1,00E-02	2,80E+01	-3,92E+00	-1,10E+02	2,82E+00	
1,10E-02	9,20E+01	-2,00E+00	-1,84E+02	2,67E+00	
1,20E-02	1,96E+02	-3,20E-01	-6,27E+01	2,53E+00	
1,30E-02	2,88E+02	8,00E-01	2,30E+02	2,61E+00	
1,40E-02	3,28E+02	1,44E+00	4,72E+02	2,98E+00	
1,50E-02	3,24E+02	2,16E+00	7,00E+02	3,58E+00	
1,60E-02	2,68E+02	3,12E+00	8,36E+02	4,37E+00	
1,70E-02	1,72E+02	4,16E+00	7,16E+02	5,17E+00	
1,80E-02	8,00E+01	4,88E+00	3,90E+02	5,73E+00	]

Tableau III.8 : Calcul des pertes fer pour  $V_I = 105$ V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t) * Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t) dt$	Pfer(w)
0,00E+00	8,00E+00	5,36E+00	4,29E+01	0,00E+00	3,15E+01
1,00E-05	8,00E+00	5,28E+00	4,22E+01	4,26E-04	
2,00E-05	4,00E+00	5,28E+00	2,11E+01	7,42E-04	
3,00E-05	4,00E+00	5,28E+00	2,11E+01	9,54E-04	
4,00E-05	4,00E+00	5,28E+00	2,11E+01	1,16E-03	
5,00E-05	4,00E+00	5,28E+00	2,11E+01	1,38E-03	
6,00E-05	4,00E+00	5,28E+00	2,11E+01	1,59E-03	
7,00E-05	4,00E+00	5,28E+00	2,11E+01	1,80E-03	
8,00E-05	4,00E+00	5,28E+00	2,11E+01	2,01E-03	
9,00E-05	4,00E+00	5,28E+00	2,11E+01	2,22E-03	
1,00E-04	4,00E+00	5,20E+00	2,08E+01	2,43E-03	
1,50E-04	0,00E+00	5,12E+00	0,00E+00	2,53E-03	
2,00E-04	0,00E+00	5,12E+00	0,00E+00	2,33E-03	
3,00E-04	-4,00E+00	5,04E+00	-2,02E+01	1,02E-03	
3,50E-04	-8,00E+00	4,96E+00	-3,97E+01	-2,88E-04	
4,00E-04	-8,00E+00	4,88E+00	-3,90E+01	-2,26E-03	
5,00E-04	-1,20E+01	4,72E+00	-5,66E+01	-7,74E-03	
5,50E-04	-1,60E+01	4,64E+00	-7,42E+01	-1,10E-02	
6,00E-04	-1,60E+01	4,56E+00	-7,30E+01	-1,47E-02	
7,00E-04	-2,00E+01	4,40E+00	-8,80E+01	-2,32E-02	
7,50E-04	-2,40E+01	4,32E+00	-1,04E+02	-2,82E-02	
8,00E-04	-2,80E+01	4,24E+00	-1,19E+02	-3,34E-02	
9,00E-04	-3,20E+01	4,00E+00	-1,28E+02	-4,53E-02	
9,50E-04	-3,20E+01	3,92E+00	-1,25E+02	-5,16E-02	
1,00E-03	-3,60E+01	3,76E+00	-1,35E+02	-5,85E-02	
1,50E-03	-6,80E+01	2,72E+00	-1,85E+02	-1,41E-01	
2,00E-03	-1,20E+02	1,60E+00	-1,92E+02	-2,38E-01	
3,00E-03	-2,32E+02	8,00E-02	-1,86E+01	-3,61E-01	
3,50E-03	-2,76E+02	-4,80E-01	1,32E+02	-3,33E-01	
4,00E-03	-3,08E+02	-8,80E-01	2,71E+02	-2,29E-01	
5,00E-03	-3,32E+02	-1,60E+00	5,31E+02	1,80E-01	
5,50E-03	-3,28E+02	-1,92E+00	6,30E+02	4,69E-01	
6,00E-03	-3,12E+02	-2,40E+00	7,49E+02	8,14E-01	
7,00E-03	-2,36E+02	-3,52E+00	8,31E+02	1,62E+00	
7,50E-03	-1,88E+02	-4,08E+00	7,67E+02	2,02E+00	
8,00E-03	-1,32E+02	-4,56E+00	6,02E+02	2,36E+00	
9,00E-03	-4,80E+01	-5,20E+00	2,50E+02	2,79E+00	
9,50E-03	-2,40E+01	-5,28E+00	1,27E+02	2,89E+00	
1,00E-02	0,00E+00	-5,12E+00	0,00E+00	2,92E+00	
1,10E-02	4,00E+01	-3,76E+00	-1,50E+02	2,85E+00	
1,20E-02	1,16E+02	-1,60E+00	-1,86E+02	2,67E+00	
1,30E-02	2,28E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,57E+00	
1,40E-02	3,08E+02	1,04E+00	3,20E+02	2,74E+00	
1,50E-02	3,40E+02	1,76E+00	5,98E+02	3,21E+00	
1,60E-02	3,24E+02	2,56E+00	8,29E+02	3,92E+00	
1,70E-02	2,52E+02	3,60E+00	9,07E+02	4,80E+00	
1,80E-02	1,48E+02	4,72E+00	6,99E+02	5,63E+00	
1,90E-02	6,00E+01	5,44E+00	3,26E+02	6,14E+00	
2,00E-02	8,00E+00	5,36E+00	4,29E+01	6,32E+00	

Tableau III.9 : Calcul des pertes fer pour  $V_I = 110V$ 

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t) * Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t) dt$	Pfer(w)
0,00E+00	-3,20E+01	5,04E+00	-1,61E+02	0,00E+00	3,46E+01
1,00E-05	-3,20E+01	5,04E+00	-1,61E+02	-1,61E-03	
2,00E-05	-3,20E+01	4,96E+00	-1,59E+02	-3,21E-03	
3,00E-05	-3,20E+01	4,96E+00	-1,59E+02	-4,80E-03	
4,00E-05	-3,20E+01	4,96E+00	-1,59E+02	-6,39E-03	
5,00E-05	-3,20E+01	4,88E+00	-1,56E+02	-7,96E-03	
6,00E-05	-3,60E+01	4,88E+00	-1,76E+02	-9,62E-03	
7,00E-05	-3,60E+01	4,80E+00	-1,73E+02	-1,14E-02	
8,00E-05	-3,60E+01	4,80E+00	-1,73E+02	-1,31E-02	
9,00E-05	-3,60E+01	4,80E+00	-1,73E+02	-1,48E-02	
1,00E-04	-3,60E+01	4,72E+00	-1,70E+02	-1,65E-02	
1,50E-04	-4,00E+01	4,56E+00	-1,82E+02	-2,50E-02	
2,00E-04	-4,00E+01	4,48E+00	-1,79E+02	-3,40E-02	
3,00E-04	-4,40E+01	4,16E+00	-1,83E+02	-5,25E-02	
3,50E-04	-4,80E+01	4,08E+00	-1,96E+02	-6,21E-02	
4,00E-04	-5,20E+01	3,92E+00	-2,04E+02	-7,22E-02	
5,00E-04	-6,00E+01	3,60E+00	-2,16E+02	-9,30E-02	
5,50E-04	-6,40E+01	3,44E+00	-2,20E+02	-1,04E-01	
6,00E-04	-6,80E+01	3,28E+00	-2,23E+02	-1,15E-01	
7,00E-04	-7,60E+01	3,04E+00	-2,31E+02	-1,37E-01	
7,50E-04	-8,00E+01	2,88E+00	-2,30E+02	-1,48E-01	
8,00E-04	-8,40E+01	2,72E+00	-2,28E+02	-1,60E-01	
9,00E-04	-9,60E+01	2,48E+00	-2,38E+02	-1,84E-01	
9,50E-04	-1,00E+02	2,32E+00	-2,32E+02	-1,95E-01	
1,00E-03	-1,08E+02	2,16E+00	-2,33E+02	-2,07E-01	
1,50E-03	-1,72E+02	1,04E+00	-1,79E+02	-3,14E-01	
2,00E-03	-2,40E+02	1,60E-01	-3,84E+01	-3,73E-01	
3,00E-03	-3,40E+02	-1,04E+00	3,54E+02	-2,25E-01	
3,50E-03	-3,64E+02	-1,36E+00	4,95E+02	-1,19E-02	
4,00E-03	-3,76E+02	-1,76E+00	6,62E+02	2,80E-01	
5,00E-03	-3,44E+02	-2,72E+00	9,36E+02	1,08E+00	
5,50E-03	-3,04E+02	-3,44E+00	1,05E+03	1,59E+00	
6,00E-03	-2,48E+02	-4,24E+00	1,05E+03	2,12E+00	
7,00E-03	-1,24E+02	-5,76E+00	7,14E+02	3,03E+00	
7,50E-03	-7,20E+01	-6,32E+00	4,55E+02	3,33E+00	
8,00E-03	-3,60E+01	-6,72E+00	2,42E+02	3,50E+00	
9,00E-03	4,00E+00	-6,80E+00	-2,72E+01	3,60E+00	
9,50E-03	1,60E+01	-6,08E+00	-9,73E+01	3,57E+00	
1,00E-02	3,60E+01	-4,96E+00	-1,79E+02	3,50E+00	
1,10E-02	1,04E+02	-2,24E+00	-2,33E+02	3,30E+00	1
1,20E-02	2,36E+02	-1,60E-01	-3,78E+01	3,13E+00	1
1,30E-02	3,44E+02	1,04E+00	3,58E+02	3,29E+00	1
1,40E-02	3,76E+02	1,84E+00	6,92E+02	3,83E+00	1
1,50E-02	3,56E+02	2,80E+00	9,97E+02	4,68E+00	1
1,60E-02	2,60E+02	4,24E+00	1,10E+03	5,77E+00	1
1,70E-02	1,40E+02	5,76E+00	8,06E+02	6,76E+00	1
1,80E-02	4,80E+01	6,88E+00	3,30E+02	7,31E+00	1

Tableau III.10 : Calcul des pertes fer pour  $V_I = 115$ V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t) * Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t) dt$	Pfer(w)
0,00E+00	-4,00E+01	4,80E+00	-1,92E+02	0,00E+00	3,8E+01
1,00E-05	-4,00E+01	4,80E+00	-1,92E+02	-1,92E-03	
2,00E-05	-4,00E+01	4,80E+00	-1,92E+02	-3,84E-03	
3,00E-05	-4,00E+01	4,80E+00	-1,92E+02	-5,76E-03	
4,00E-05	-4,00E+01	4,80E+00	-1,92E+02	-7,68E-03	
5,00E-05	-4,00E+01	4,80E+00	-1,92E+02	-9,60E-03	
6,00E-05	-4,80E+01	4,60E+00	-2,21E+02	-1,17E-02	
7,00E-05	-4,80E+01	4,60E+00	-2,21E+02	-1,39E-02	
8,00E-05	-4,80E+01	4,60E+00	-2,21E+02	-1,61E-02	
9,00E-05	-4,80E+01	4,60E+00	-2,21E+02	-1,83E-02	
1,00E-04	-4,80E+01	4,60E+00	-2,21E+02	-2,05E-02	
1,50E-04	-4,80E+01	4,40E+00	-2,11E+02	-3,12E-02	
2,00E-04	-5,60E+01	4,20E+00	-2,35E+02	-4,20E-02	
3,00E-04	-6,40E+01	3,80E+00	-2,43E+02	-6,49E-02	
3,50E-04	-6,40E+01	3,80E+00	-2,43E+02	-7,69E-02	
4,00E-04	-6,40E+01	3,40E+00	-2,18E+02	-8,85E-02	
5,00E-04	-8,00E+01	3,20E+00	-2,56E+02	-1,12E-01	
5,50E-04	-8,00E+01	3,00E+00	-2,40E+02	-1,25E-01	
6,00E-04	-8,80E+01	2,80E+00	-2,46E+02	-1,38E-01	
7,00E-04	-9,60E+01	2,60E+00	-2,50E+02	-1,63E-01	
7,50E-04	-1,04E+02	2,40E+00	-2,50E+02	-1,76E-01	
8,00E-04	-1,12E+02	2,40E+00	-2,69E+02	-1,89E-01	
9,00E-04	-1,20E+02	2,00E+00	-2,40E+02	-2,14E-01	
9,50E-04	-1,28E+02	1,80E+00	-2,30E+02	-2,26E-01	
1,00E-03	-1,36E+02	1,80E+00	-2,45E+02	-2,38E-01	
1,50E-03	-2,16E+02	6,00E-01	-1,30E+02	-3,36E-01	
2,00E-03	-2,96E+02	-2,00E-01	5,92E+01	-3,54E-01	
3,00E-03	-3,84E+02	-1,20E+00	4,61E+02	-6,06E-02	
3,50E-03	-4,00E+02	-1,60E+00	6,40E+02	2,34E-01	
4,00E-03	-3,92E+02	-2,20E+00	8,62E+02	6,19E-01	
5,00E-03	-3,36E+02	-3,60E+00	1,21E+03	1,64E+00	
5,50E-03	-2,72E+02	-4,40E+00	1,20E+03	2,24E+00	
6,00E-03	-2,08E+02	-5,40E+00	1,12E+03	2,82E+00	
7,00E-03	-8,00E+01	-7,20E+00	5,76E+02	3,67E+00	
7,50E-03	-4,00E+01	-7,80E+00	3,12E+02	3,88E+00	
8,00E-03	-8,00E+00	-8,00E+00	6,40E+01	3,97E+00	
9,00E-03	1,60E+01	-7,40E+00	-1,18E+02	3,95E+00	
9,50E-03	2,40E+01	-6,40E+00	-1,54E+02	3,88E+00	
1,00E-02	4,80E+01	-4,80E+00	-2,30E+02	3,78E+00	
1,10E-02	1,36E+02	-1,80E+00	-2,45E+02	3,55E+00	
1,20E-02	2,88E+02	4,00E-01	1,15E+02	3,43E+00	
1,30E-02	3,84E+02	1,40E+00	5,38E+02	3,75E+00	
1,40E-02	4,00E+02	2,20E+00	8,80E+02	4,47E+00	
1,50E-02	3,52E+02	3,60E+00	1,27E+03	5,54E+00	
1,60E-02	2,24E+02	5,40E+00	1,21E+03	6,81E+00	
1,70E-02	9,60E+01	7,20E+00	6,91E+02	7,78E+00	
1,80E-02	2,40E+01	8,20E+00	1,97E+02	8,19E+00	

Tableau III.11 : Calcul des pertes fer pour  $V_1 = 120$ V

Les résultats des calculs des pertes fer sont consignés dans le tableau III.12 pour le transformateur anonyme.

$V_l(\mathbf{V})$	70	80	90	100	105	110	115	120
$V_1^2(V^2)$	4900	6400	8100	10000	11025	12100	13225	14400
Pfer(W)	11,7	15,4	20	25,3	28,3	31,5	34,6	38

Tableau III.12 :	Résultats	des p	ertes f	fer
------------------	-----------	-------	---------	-----

Les courbes des pertes fer en fonction de la tension d'alimentation et en fonction du carré de la tension d'alimentation sont représentées sur les figures III.7 et III.8.



Figure III.7 : Evolution des pertes fer en fonction de la tension d'alimentation



Figure III.8 : Evolution des pertes fer en fonction du carré de la tension d'alimentation

# III.4.2.2. Transformateur DELORENZO

0,00E+00 6,00E+00 9,80E-01 5,88E+00 5,88E+05   1,00E+05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 1,17E+04   3,00E+05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 2,32E+04   5,00E+05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 2,32E+04   5,00E+05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 3,47E+04   7,00E+05 4,00E+00 9,60E-01 3,76E+00 4,37E+04   8,00E+05 4,00E+00 9,40E+01 3,76E+00 4,33E+04   9,00E+04 2,00E+00 9,40E+01 3,76E+00 5,05E+04   2,00E+04 2,00E+00 9,40E+01 1,88E+00 6,68E+04   2,00E+04 2,00E+00 8,80E+01 -1,72E+00 6,74E+04   3,50E+04 -2,00E+00 8,80E+01 -1,72E+04 5,50E+04 -3,02E+04   5,50E+04 -8,00E+00 7,80E+01 -4,22E+04 -4,94E+04   7,50E+04 +3,00E+00 7,80E+01 -2,07E+03 -3,54E+03   5,50E+03 -2,20E+00 <		t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t) * Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t) dt$	Pfer(w)
1,00E-056,00E+009,80E-015,88E+005,88E+052,00E-056,00E+009,60E-015,76E+001,77E-043,00E-056,00E+009,60E-015,76E+002,32E-045,00E+009,60E-015,76E+002,32E-046,00E-056,00E+009,60E-013,76E+003,37E-047,00E-054,00E+009,60E-013,76E+003,37E-048,00E-054,00E+009,40E-013,76E+004,33E-049,00E-054,00E+009,40E-013,76E+004,32E-041,00E-044,00E+009,40E-013,76E+005,09E-041,00E-042,00E+009,40E-011,88E+006,68E-042,00E+009,40E-011,72E+007,59E-043,00E-042,00E+008,60E-01-1,72E+007,60E-043,00E-042,00E+008,60E-01-1,72E+006,74E-044,00E+044,00E+008,60E-01-1,72E+00-1,22E-037,50E-04-8,00E+007,80E-01-6,24E+00-4,94E-047,00E-04-1,00E+016,20E-01-9,92E+00-3,54E-031,00E-03-1,80E+01-6,20E+00-2,07E+039,00E-04-1,60E+016,20E-01-9,92E+00-3,54E-031,00E-03-1,80E+01-1,02E+01-3,03E-039,00E-04-1,60E+016,20E-01-9,92E+00-3,54E-031,00E-03-2,80E+01-4,60E-01-3,54E+031,00E-03-2,80E+01-4,60E-01-3,54E+031,00E-03-5,60E+01	ļ	0,00E+00	6,00E+00	9,80E-01	5,88E+00	0,00E+00	1,33E+00
2,00E-05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 1,17E-04   3,00E-05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 2,32E-04   5,00E-05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 2,90E-04   6,00E-05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 3,47E-04   7,00E-05 4,00E+00 9,60E-01 3,76E+00 4,33E-04   9,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 4,33E-04   9,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 4,33E-04   1,00E-04 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 5,09E-04   1,00E-04 4,00E+00 9,40E-01 1,88E+00 6,68E-04   2,00E-04 2,00E+00 8,80E-01 -1,72E+00 6,74E-04   4,00E-04 -4,00E+00 8,20E-01 -3,28E+00 -1,82E-04   6,00E+00 8,00E-01 -6,24E+00 -1,82E-04 6,00E+04   6,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,82E-04 6,00E+03   7,00E-04 -1,00E+01 7,80E-01 <td< td=""><td>ļ</td><td>1,00E-05</td><td>6,00E+00</td><td>9,80E-01</td><td>5,88E+00</td><td>5,88E-05</td><td></td></td<>	ļ	1,00E-05	6,00E+00	9,80E-01	5,88E+00	5,88E-05	
3,00E-05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 1,75E-04   4,00E-05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 2,32E-04   5,00E-05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 3,47E-04   7,00E-05 4,00E+00 9,60E-01 3,76E+00 4,32E-04   9,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 4,33E-04   9,00E-04 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 5,09E-04   1,00E-04 4,00E+00 9,40E-01 1,88E+00 6,68E-04   2,00E+04 9,00E-01 1,88E+00 5,68E-04   3,00E-04 2,00E+00 8,80E-01 -1,72E+00 6,74E-04   4,00E-04 4,00E+00 8,20E-01 -3,28E+00 5,47E-04   5,50E-04 -8,00E+00 8,20E-01 -4,22E-03 7,70E-04   7,00E-04 -1,00E+01 6,20E-01 -1,22E-03 7,50E-04   7,00E-04 -1,00E+01 6,20E-01 -1,22E-03 7,50E-03   7,00E-04 -1,00E+01 6,20E-01 -1,22E-03 <t< td=""><td></td><td>2,00E-05</td><td>6,00E+00</td><td>9,60E-01</td><td>5,76E+00</td><td>1,17E-04</td><td></td></t<>		2,00E-05	6,00E+00	9,60E-01	5,76E+00	1,17E-04	
4,00E-05 $6,00E+00$ $9,60E-01$ $5,76E+00$ $2,32E-04$ $6,00E-05$ $6,00E+00$ $9,60E-01$ $5,76E+00$ $2,90E-04$ $6,00E-05$ $4,00E+00$ $9,60E-01$ $3,84E+00$ $3,95E-04$ $8,00E-05$ $4,00E+00$ $9,40E-01$ $3,76E+00$ $4,33E-04$ $9,00E-05$ $4,00E+00$ $9,40E-01$ $3,76E+00$ $4,71E-04$ $1,00E-04$ $2,00E+00$ $9,40E-01$ $3,76E+00$ $5,09E-04$ $2,00E-04$ $2,00E+00$ $9,40E-01$ $1,88E+00$ $6,68E-04$ $2,00E-04$ $2,00E+00$ $9,40E-01$ $1,88E+00$ $6,68E-04$ $2,00E-04$ $2,00E+00$ $9,40E-01$ $1,72E+00$ $6,74E-04$ $3,00E-04$ $2,00E+00$ $8,00E-01$ $-1,72E+00$ $6,74E-04$ $4,00E-04$ $4,00E+00$ $8,00E-01$ $-1,72E+00$ $6,74E-04$ $4,00E-04$ $-2,00E+00$ $8,00E-01$ $-1,82E-04$ $6,00E-04$ $6,00E-04$ $-8,00E+00$ $7,80E-01$ $-6,24E+00$ $-4,94E-04$ $7,00E-04$ $-1,00E+01$ $7,20E+01$ $-1,02E+01$ $-3,03E-03$ $8,00E-04$ $-1,00E+01$ $6,20E-01$ $-1,22E-03$ $7,50E-04$ $-1,00E+01$ $6,20E-01$ $-1,02E+01$ $-3,03E-03$ $8,00E-04$ $-1,00E+01$ $-6,24E+00$ $-4,94E-04$ $7,00E-04$ $-1,00E+01$ $-6,24E+00$ $-4,20E+03$ $7,00E-04$ $-1,00E+01$ $-3,02E-03$ $-3,04E-03$ $8,00E+00$ $-1,22E+00$ $-3,54E-03$ $8,00E+00$ $-1,22E+00$ <t< td=""><td></td><td>3,00E-05</td><td>6,00E+00</td><td>9,60E-01</td><td>5,76E+00</td><td>1,75E-04</td><td></td></t<>		3,00E-05	6,00E+00	9,60E-01	5,76E+00	1,75E-04	
S,00E-05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 3,47E-04   7,00E-05 4,00E+00 9,60E-01 3,76E+00 3,95E-04   8,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 4,33E-04   9,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 4,33E-04   9,00E-04 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 5,99E-04   1,50E-04 2,00E+00 9,40E-01 1,88E+00 6,68E-04   2,00E-04 2,00E+00 8,60E-01 -1,72E+00 6,74E-04   3,00E-04 -2,00E+00 8,60E-01 -3,28E+00 5,47E-04   3,00E-04 -4,00E+00 8,00E-01 -4,80E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,22E-03   7,50E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -8,06E+00 -2,07E-03   9,00E-04 -1,00E+01 7,20E-01 -3,28E+00 -2,07E-03   9,00E-04 -1,40E+01 6,40E-01 -8,96E+00 -2,07E-03   9,00E-04 -1,60E+01 6,20E-01		4,00E-05	6,00E+00	9,60E-01	5,76E+00	2,32E-04	
6,00E-05 6,00E+00 9,60E-01 5,76E+00 3,47E-04   7,00E-05 4,00E+00 9,60E-01 3,84E+00 3,95E-04   8,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 4,33E-04   9,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 5,09E-04   1,00E-04 4,00E+00 9,40E-01 1,88E+00 6,68E-04   2,00E-04 2,00E+00 8,60E-01 -1,76E+00 7,60E-04   3,00E-04 -2,00E+00 8,60E-01 -1,72E+00 6,74E-04   4,00E+04 -4,00E+00 8,00E-01 -4,80E+00 1,12E-04   5,00E-04 -6,00E+00 8,00E-01 -4,80E+00 1,12E-04   5,00E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,22E-03   7,00E-04 -1,00E+01 7,20E+01 -7,20E+00 -1,22E-03   7,50E-04 -1,20E+01 6,30E+01 -8,06E+00 -2,07E+03   9,00E-04 -1,40E+01 6,40E-01 -8,96E+00 -2,07E+03   9,00E-04 -1,60E+01 6,84E+00		5,00E-05	6,00E+00	9,60E-01	5,76E+00	2,90E-04	
7,00E-05 4,00E+00 9,60E-01 3,84E+00 3,95E-04   8,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 4,33E-04   9,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 4,71E-04   1,00E-04 4,00E+00 9,40E-01 1,80E+00 5,09E-04   1,50E-04 2,00E+00 9,00E-01 1,80E+00 7,59E-04   3,00E-04 -2,00E+00 8,00E-01 -1,72E+00 6,74E-04   4,00E-04 -2,00E+00 8,00E-01 -1,72E+00 6,74E-04   4,00E-04 -4,00E+00 8,00E-01 -3,28E+00 5,47E-04   5,00E-04 -6,00E+00 8,00E-01 -6,24E+00 -1,22E-03   7,50E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -8,96E+00 -2,07E-03   9,00E-04 -1,40E+01 6,40E-01 -3,03E-03 9,00E-04   9,00E-04 -1,40E+01 6,40E-01 -3,03E-03 9,00E-04   9,00E-04 -1,60E+01 6,20E-01 -3,54E-03 1,50E-03   9,00E-03 -2,80E+01 1,22E+01		6,00E-05	6,00E+00	9,60E-01	5,76E+00	3,47E-04	
8,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 4,33E-04   9,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 4,71E-04   1,00E-04 4,00E+00 9,40E-01 1,88E+00 5,09E-04   2,00E-04 2,00E+00 9,40E-01 1,88E+00 6,68E-04   2,00E-04 2,00E+00 8,60E-01 -1,72E+00 6,74E-04   3,00E-04 -2,00E+00 8,00E-01 -3,28E+00 5,47E-04   5,00E-04 -6,00E+00 8,00E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -6,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -1,00E+01 6,80E-01 -8,96E+00 -2,07E-03   9,00E-04 -1,00E+01 6,80E-01 -1,12E+01 -3,03E-03   9,00E-04 -1,60E+01 6,20E-01 -9,92E+00 -3,54E-03   1,00E-03 -3,80E+01 -1,12E+01 -4,08E-03   1,50E-03 -5,80E+01 -2,80E-01 -1,12E+0		7,00E-05	4,00E+00	9,60E-01	3,84E+00	3,95E-04	
9,00E-05 4,00E+00 9,40E-01 3,76E+00 4,71E-04   1,00E-04 4,00E+00 9,40E-01 3,75E+00 5,09E-04   1,50E-04 2,00E+00 9,04E-01 1,88E+00 6,68E-04   2,00E-04 2,00E+00 8,80E-01 -1,76E+00 7,59E-04   3,00E-04 -2,00E+00 8,60E-01 -1,72E+00 6,74E-04   4,00E-04 -4,00E+00 8,00E-01 -3,28E+00 5,47E-04   5,00E-04 -6,00E+00 8,00E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -1,00E+01 7,20E-01 -7,20E+00 -1,22E-03   7,50E-04 -1,20E+01 6,40E-01 -1,02E+01 -3,03E-03   9,00E-04 -1,60E+01 6,40E-01 -1,12E+01 -3,03E-03   9,00E-03 -3,80E+01 -1,12E+01 -4,08E-03 1,50E-03   1,50E-03 -5,60E+01 -9,8E+0		8,00E-05	4,00E+00	9,40E-01	3,76E+00	4,33E-04	
1,00E-044,00E+009,40E-013,76E+005,09E-041,50E-042,00E+009,00E-011,88E+006,68E-042,00E-042,00E+008,00E-01-1,76E+007,50E-043,50E-04-2,00E+008,00E-01-1,72E+006,74E-044,00E-04-4,00E+008,00E-01-3,28E+005,47E-045,00E-04-6,00E+008,00E-01-6,24E+00-4,94E-045,00E-04-8,00E+007,80E-01-6,24E+00-4,94E-046,00E-04-8,00E+007,80E-01-7,20E+00-1,22E-037,50E-04-1,00E+017,20C-01-7,20E+00-1,22E-037,50E-04-1,20E+016,40E-01-8,96E+00-2,07E-039,00E-04-1,60E+016,40E-01-9,92E+00-3,54E-031,00E-03-1,80E+016,20E-01-1,12E+01-4,08E-031,50E-03-2,80E+01-1,12E+01-9,69E-032,00E-03-3,80E+012,80E-011,57E+01-1,10E-023,00E-03-6,20E+01-4,38E+00-1,41E-023,00E-03-6,20E+01-1,30E+017,30E+01-7,6E-025,50E-03-7,60E+01-2,80E+011,57E+01-1,10E-023,50E-03-7,60E+01-1,12E+008,29E+011,59E-017,50E-03-7,60E+01-1,22E+003,68E+011,77E-025,50E-03-7,80E+01-1,22E+003,68E+011,59E-017,50E-03-6,20E+01-1,22E+003,68E+013,78E-017,50E-03-6,20E+01-1,22E+		9,00E-05	4,00E+00	9,40E-01	3,76E+00	4,71E-04	
1,50E-04 2,00E+00 9,00E-01 1,88E+00 6,68E-04   2,00E-04 2,00E+00 8,80E-01 -1,76E+00 7,59E-04   3,50E-04 -2,00E+00 8,60E-01 -1,72E+00 6,74E-04   4,00E-04 -4,00E+00 8,00E-01 -3,28E+00 5,47E-04   5,00E-04 -6,00E+00 8,00E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -1,00E+01 7,20E-01 -7,20E+00 -1,22E-03   7,50E-04 -1,00E+01 6,80E-01 -8,96E+00 -2,07E-03   9,00E-04 -1,40E+01 6,40E-01 -8,96E+00 -2,07E-03   9,00E-03 -1,80E+01 6,20E-01 -1,12E+01 -4,08E-03   1,00E-03 -5,80E+01 1,57E+01 -1,10E-02   3,50E-03 -6,20E+01 -8,84E+00 -1,11E-02   3,50E-03 -6,20E+01 -7,57E+01 1,59E-01		1,00E-04	4,00E+00	9,40E-01	3,76E+00	5,09E-04	
2,00E-04 2,00E+00 9,00E-01 1,80E+00 7,59E-04   3,00E-04 -2,00E+00 8,80E-01 -1,72E+00 6,74E-04   4,00E-04 -4,00E+00 8,20E-01 -3,28E+00 5,47E-04   5,00E-04 -6,00E+00 8,00E-01 -4,80E+00 1,12E-04   5,50E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,22E-03   7,50E-04 -1,00E+01 7,20E-01 -7,20E+00 -1,22E-03   7,50E-04 -1,00E+01 7,20E-01 -7,20E+00 -1,22E-03   7,50E-04 -1,20E+01 6,80E-01 -8,96E+00 -2,07E-03   9,00E-04 -1,60E+01 6,40E-01 -1,02E+01 -3,03E-03   9,00E-04 -1,60E+01 6,20E-01 -1,12E+01 -4,08E-03   1,50E-03 -2,80E+01 -1,12E+01 -9,69E-03   2,00E-03 -3,80E+01 1,80E-01 -1,12E+01 -1,41E-02   3,00E-03 -5,60E+01 -2,80E+01 1,75E+01 -1,10E-02   3,50E-03 -7,60E+01 -2,60E+01 <td< td=""><td></td><td>1,50E-04</td><td>2,00E+00</td><td>9,40E-01</td><td>1,88E+00</td><td>6,68E-04</td><td></td></td<>		1,50E-04	2,00E+00	9,40E-01	1,88E+00	6,68E-04	
3,00E-04 -2,00E+00 8,80E-01 -1,76E+00 7,60E-04   3,50E-04 -2,00E+00 8,60E-01 -1,72E+00 6,74E-04   4,00E-04 -4,00E+00 8,20E-01 -3,28E+00 5,47E-04   5,50E-04 -6,00E+00 8,00E+00 -4,80E+00 1,12E-04   5,50E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,22E-03   7,50E-04 -1,20E+01 6,80E-01 -8,96E+00 -2,07E-03   9,00E-04 -1,60E+01 6,40E-01 -8,96E+00 -2,07E-03   9,00E-04 -1,60E+01 6,40E-01 -1,02E+01 -3,03E-03   9,00E-04 -1,60E+01 6,20E-01 -1,12E+01 -9,69E-03   1,00E-03 -3,80E+01 1,80E-01 -5,84E+00 -1,41E+02   3,00E-03 -5,60E+01 -2,80E-01 1,57E+01 -1,10E+02   3,00E-03 -5,60E+01 -2,80E+01 1,85E+02 5,50E-03   5,50E-03 -7,60E+01 <td< td=""><td></td><td>2,00E-04</td><td>2,00E+00</td><td>9,00E-01</td><td>1,80E+00</td><td>7,59E-04</td><td></td></td<>		2,00E-04	2,00E+00	9,00E-01	1,80E+00	7,59E-04	
3,50E-04 -2,00E+00 8,60E-01 -1,72E+00 6,74E-04   4,00E-04 -4,00E+00 8,20E-01 -3,28E+00 5,47E-04   5,00E-04 -6,00E+00 8,00E-01 -4,80E+00 1,12E-04   5,00E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -1,00E+01 7,20E-01 -7,20E+00 -1,42E-03   7,50E-04 -1,20E+01 6,80E-01 -8,16E+00 -1,63E-03   8,00E-04 -1,40E+01 6,40E-01 -1,02E+01 -3,03E-03   9,00E-04 -1,60E+01 6,40E-01 -1,02E+01 -3,03E-03   9,00E-04 -1,60E+01 6,20E-01 -9,92E+00 -3,54E-03   1,00E-03 -1,80E+01 6,20E-01 -1,12E+01 -4,08E-03   1,50E-03 -2,80E+01 1,57E+01 -1,10E+02 3,00E+03   3,00E-03 -5,60E+01 -2,80E+01 1,57E+01 1,10E+02   3,00E-03 -7,60E+01 -9,60E-01 7,36E+01 1,85E+02   5,50E-03 -7,60E+01		3,00E-04	-2,00E+00	8,80E-01	-1,76E+00	7,60E-04	
4,00E-04-4,00E+008,20E-01-3,28E+005,47E-045,00E-04-6,00E+008,00E+01-4,80E+001,12E-045,50E-04-8,00E+007,80E-01-6,24E+00-4,94E-047,00E-04-1,00E+017,20E-01-7,20E+00-1,22E-037,50E-04-1,20E+016,80E-01-8,96E+00-2,07E-039,00E-04-1,40E+016,40E-01-1,02E+01-3,03E-039,00E-04-1,40E+016,20E-01-9,92E+00-3,54E-031,00E-03-1,80E+016,20E-01-1,12E+01-4,08E-031,50E-03-2,80E+014,00E-01-1,12E+01-4,08E-031,50E-03-2,80E+014,00E-01-1,12E+01-9,69E-032,00E-03-3,80E+011,80E-01-6,84E+00-1,41E-023,00E-03-5,60E+01-2,80E-011,57E+01-1,10E-023,50E-03-6,20E+01-9,60E-017,30E+017,76E-025,50E-03-7,60E+01-9,60E-017,30E+011,59E-017,00E-03-6,20E+01-1,12E+008,29E+011,59E-017,00E-03-6,20E+01-1,26E+007,06E+012,76E-018,00E-03-7,40E+01-1,22E+005,86E+013,08E-019,00E-03-3,00E+01-1,22E+003,60E+013,58E-019,00E-03-4,80E+01-1,22E+003,60E+013,58E-019,00E-03-4,00E+01-1,22E+003,60E+013,58E-019,00E-03-4,00E+01-1,22E+003,60E+013,58E-019,00	Ī	3,50E-04	-2,00E+00	8,60E-01	-1,72E+00	6,74E-04	
5,00E-04 -6,00E+00 8,00E-01 -4,80E+00 1,12E-04   5,50E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -1,82E-04   6,00E-04 -8,00E+00 7,80E-01 -6,24E+00 -4,94E-04   7,00E-04 -1,00E+01 7,20E-01 -7,20E+00 -1,22E-03   7,50E-04 -1,20E+01 6,80E-01 -8,96E+00 -2,07E-03   9,00E-04 -1,60E+01 6,40E-01 -9,92E+00 -3,54E-03   1,00E-03 -1,80E+01 6,20E-01 -1,12E+01 -4,08E-03   1,50E-03 -2,80E+01 4,00E-01 -1,12E+01 -9,69E-03   2,00E-03 -3,80E+01 1,80E-01 -6,84E+00 -1,41E-02   3,00E-03 -5,60E+01 -2,80E-01 1,57E+01 -1,10E-02   3,00E-03 -6,60E+01 -2,85E+01 6,44E+05 4,00E-03   4,00E-03 -6,80E+01 -1,28E+00 8,42E+01 1,17E+01   6,00E+03 -7,60E+01 -1,28E+00 8,02E+01 1,59E-01   7,00E+03 -7,60E+01 <t< td=""><td>Ī</td><td>4,00E-04</td><td>-4,00E+00</td><td>8,20E-01</td><td>-3,28E+00</td><td>5,47E-04</td><td></td></t<>	Ī	4,00E-04	-4,00E+00	8,20E-01	-3,28E+00	5,47E-04	
5,50E-04 $-8,00E+00$ $7,80E-01$ $-6,24E+00$ $-1,82E-04$ $6,00E-04$ $-8,00E+00$ $7,80E-01$ $-6,24E+00$ $-4,94E-04$ $7,00E-04$ $-1,00E+01$ $7,20E-01$ $-7,20E+00$ $-1,22E-03$ $7,50E-04$ $-1,20E+01$ $6,80E-01$ $-8,16E+00$ $-1,63E-03$ $8,00E-04$ $-1,40E+01$ $6,40E-01$ $-8,96E+00$ $-2,07E-03$ $9,00E-04$ $-1,60E+01$ $6,20E-01$ $-1,02E+01$ $-3,03E-03$ $9,50E-04$ $-1,60E+01$ $6,20E-01$ $-1,12E+01$ $-4,08E-03$ $1,50E-03$ $-2,80E+01$ $4,00E-01$ $-1,12E+01$ $-9,69E-03$ $2,00E-03$ $-3,80E+01$ $1,80E-01$ $-6,84E+00$ $-1,41E-02$ $3,00E-03$ $-5,60E+01$ $-2,80E-01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ $3,00E-03$ $-6,20E+01$ $-4,60E-01$ $2,85E+01$ $6,44E-05$ $4,00E-03$ $-6,20E+01$ $-4,60E-01$ $7,30E+01$ $7,76E-02$ $5,50E-03$ $-7,60E+01$ $-9,60E-01$ $7,30E+01$ $1,72E-01$ $5,00E-03$ $-7,60E+01$ $-1,22E+00$ $8,22E+01$ $1,57E-01$ $7,00E-03$ $-6,20E+01$ $-1,22E+00$ $8,28E+01$ $1,58E-01$ $7,00E-03$ $-5,60E+01$ $-1,22E+00$ $7,66E+01$ $3,58E-01$ $7,00E-03$ $-5,60E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $7,00E-03$ $-5,60E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $7,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,00$	Ī	5,00E-04	-6,00E+00	8,00E-01	-4,80E+00	1,12E-04	
6,00E-04 $-8,00E+00$ $7,80E-01$ $-6,24E+00$ $-4,94E-04$ $7,00E-04$ $-1,00E+01$ $7,20E+01$ $-7,20E+00$ $-1,22E-03$ $7,50E-04$ $-1,20E+01$ $6,80E-01$ $-8,16E+00$ $-1,63E-03$ $8,00E-04$ $-1,40E+01$ $6,40E-01$ $-8,96E+00$ $-2,07E-03$ $9,00E-04$ $-1,60E+01$ $6,20E-01$ $-9,92E+00$ $-3,54E-03$ $1,00E-03$ $-1,80E+01$ $6,20E-01$ $-1,12E+01$ $-4,08E-03$ $1,00E-03$ $-2,80E+01$ $4,00E-01$ $-1,12E+01$ $-4,08E-03$ $2,00E-03$ $-3,80E+01$ $4,00E-01$ $-1,12E+01$ $-9,69E-03$ $2,00E-03$ $-3,60E+01$ $-2,80E+01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ $3,00E-03$ $-5,60E+01$ $-2,80E-01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ $3,00E-03$ $-6,20E+01$ $-4,60E-01$ $2,85E+01$ $6,44E-05$ $4,00E-03$ $-6,80E+01$ $-6,40E-01$ $7,30E+01$ $1,75E-02$ $5,50E-03$ $-7,60E+01$ $-1,12E+00$ $8,22E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-6,20E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-5,60E+01$ $-1,28E+00$ $7,6E-01$ $8,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $7,50E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $1,00E-02$ $-2,00$	Ī	5,50E-04	-8,00E+00	7,80E-01	-6,24E+00	-1,82E-04	
7,00E-04 $-1,00E+01$ $7,20E-01$ $-7,20E+00$ $-1,22E-03$ $7,50E-04$ $-1,20E+01$ $6,80E-01$ $-8,16E+00$ $-1,63E-03$ $8,00E-04$ $-1,40E+01$ $6,40E-01$ $-8,96E+00$ $-2,07E-03$ $9,00E-04$ $-1,60E+01$ $6,20E-01$ $-9,92E+00$ $-3,54E-03$ $1,00E-03$ $-1,80E+01$ $6,20E-01$ $-9,92E+00$ $-3,54E-03$ $1,00E-03$ $-1,80E+01$ $6,20E-01$ $-1,12E+01$ $-4,08E-03$ $1,50E-03$ $-2,80E+01$ $4,00E-01$ $-1,12E+01$ $-9,69E-03$ $2,00E-03$ $-3,80E+01$ $1,80E-01$ $-5,84E+00$ $-1,41E-02$ $3,00E-03$ $-5,60E+01$ $-2,80E-01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ $3,50E-03$ $-6,20E+01$ $-4,60E-01$ $2,85E+01$ $6,44E-05$ $4,00E-03$ $-7,60E+01$ $-9,60E-01$ $7,30E+01$ $7,76E-02$ $5,50E-03$ $-7,60E+01$ $-1,12E+00$ $8,42E+01$ $1,17E-01$ $6,00E-03$ $-7,40E+01$ $-1,22E+00$ $7,66E+01$ $2,76E-01$ $7,00E-03$ $-5,60E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $7,50E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,69E-01$ $1,00E$	ĺ	6,00E-04	-8,00E+00	7,80E-01	-6,24E+00	-4,94E-04	
7,50E-04 $-1,20E+01$ $6,80E-01$ $-8,16E+00$ $-1,63E-03$ $8,00E-04$ $-1,40E+01$ $6,40E-01$ $-8,96E+00$ $-2,07E-03$ $9,00E-04$ $-1,60E+01$ $6,40E-01$ $-1,02E+01$ $-3,03E-03$ $9,50E-04$ $-1,60E+01$ $6,20E-01$ $-9,92E+00$ $-3,54E-03$ $1,00E-03$ $-1,80E+01$ $6,20E-01$ $-1,12E+01$ $-4,08E-03$ $1,50E-03$ $-2,80E+01$ $4,00E-01$ $-1,12E+01$ $-9,69E-03$ $2,00E-03$ $-3,80E+01$ $1,80E-01$ $-6,84E+00$ $-1,41E-02$ $3,00E-03$ $-5,60E+01$ $-2,80E-01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ $3,50E-03$ $-5,20E+01$ $-4,60E-01$ $2,85E+01$ $6,44E-05$ $4,00E-03$ $-6,80E+01$ $-6,40E-01$ $4,35E+01$ $1,85E-02$ $5,00E-03$ $-7,60E+01$ $-9,60E-01$ $7,30E+01$ $7,76E-02$ $5,50E-03$ $-7,80E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-6,20E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-5,60E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $7,00E-03$ $-5,60E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+00$ $-9,40E-01$ $1,73E+01$ $3,76E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+01$ $-1,60E+01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ $1,20E-02$ $4,20E+01$ $-1,60E-01$ $-6,72E+00$ $3,58E-01$ $1,20E$	ĺ	7,00E-04	-1,00E+01	7,20E-01	-7,20E+00	-1,22E-03	
8,00E-04 $-1,40E+01$ $6,40E-01$ $-8,96E+00$ $-2,07E-03$ $9,00E-04$ $-1,60E+01$ $6,40E-01$ $-1,02E+01$ $-3,03E-03$ $9,50E-04$ $-1,60E+01$ $6,20E-01$ $-9,92E+00$ $-3,54E-03$ $1,00E-03$ $-1,80E+01$ $6,20E-01$ $-1,12E+01$ $-4,08E-03$ $1,50E-03$ $-2,80E+01$ $4,00E-01$ $-1,12E+01$ $-9,69E-03$ $2,00E-03$ $-3,80E+01$ $1,80E-01$ $-6,84E+00$ $-1,41E-02$ $3,00E-03$ $-5,60E+01$ $-2,80E-01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ $3,50E-03$ $-6,20E+01$ $-4,60E-01$ $2,85E+01$ $6,44E-05$ $4,00E-03$ $-6,80E+01$ $-6,40E-01$ $4,35E+01$ $1,85E-02$ $5,00E-03$ $-7,60E+01$ $-9,60E-01$ $7,30E+01$ $7,76E-02$ $5,50E-03$ $-7,80E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-6,20E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-5,60E+01$ $-1,22E+00$ $5,66E+01$ $3,08E-01$ $7,00E-03$ $-5,60E+01$ $-1,22E+00$ $5,66E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ $1,20E-02$ $-6,00E+01$ $-1,28E+01$ $3,61E-01$ <		7,50E-04	-1,20E+01	6,80E-01	-8,16E+00	-1,63E-03	
9,00E-04 $-1,60E+01$ $6,40E-01$ $-1,02E+01$ $-3,03E-03$ 9,50E-04 $-1,60E+01$ $6,20E-01$ $-9,92E+00$ $-3,54E-03$ 1,00E-03 $-1,30E+01$ $6,20E-01$ $-1,12E+01$ $-4,08E-03$ 1,50E-03 $-2,80E+01$ $4,00E-01$ $-1,12E+01$ $-9,69E-03$ 2,00E-03 $-3,30E+01$ $1,80E-01$ $-6,84E+00$ $-1,41E-02$ 3,00E-03 $-5,60E+01$ $-2,80E-01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ 3,50E-03 $-6,20E+01$ $-4,60E-01$ $2,85E+01$ $6,44E-05$ 4,00E-03 $-6,80E+01$ $-6,40E-01$ $4,35E+01$ $1,85E-02$ 5,00E-03 $-7,60E+01$ $-9,60E-01$ $7,30E+01$ $7,76E-02$ 5,50E-03 $-7,80E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ 7,00E-03 $-6,20E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ 7,00E-03 $-6,20E+01$ $-1,22E+00$ $7,06E+01$ $2,76E-01$ 8,00E-03 $-4,80E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ 9,00E-03 $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ 9,00E-03 $-3,00E+01$ $-1,20E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ 1,00E-02 $-2,00E+00$ $-9,40E-01$ $1,73E+01$ $3,71E-01$ 1,00E-02 $-2,00E+01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ 1,20E-02 $4,20E+01$ $-1,60E-01$ $-6,72E+00$ $3,58E-01$ 1,30E-02 $6,00E+01$ $3,00E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ 1,40E-02 $7,40E+01$ $6,40E-01$ $4,74E+01$ <td></td> <td>8,00E-04</td> <td>-1,40E+01</td> <td>6,40E-01</td> <td>-8,96E+00</td> <td>-2,07E-03</td> <td></td>		8,00E-04	-1,40E+01	6,40E-01	-8,96E+00	-2,07E-03	
9,50E-04 $-1,60E+01$ $6,20E-01$ $-9,92E+00$ $-3,54E-03$ 1,00E-03 $-1,80E+01$ $6,20E-01$ $-1,12E+01$ $-4,08E-03$ 1,50E-03 $-2,80E+01$ $4,00E-01$ $-1,12E+01$ $-9,69E-03$ 2,00E-03 $-3,80E+01$ $1,80E-01$ $-6,84E+00$ $-1,41E-02$ 3,00E-03 $-5,60E+01$ $-2,80E-01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ 3,50E-03 $-6,20E+01$ $-4,60E-01$ $2,85E+01$ $6,44E-05$ 4,00E-03 $-6,80E+01$ $-6,40E-01$ $4,35E+01$ $1,85E-02$ 5,00E-03 $-7,60E+01$ $-9,60E-01$ $7,30E+01$ $7,76E-02$ 5,50E-03 $-7,80E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ 7,00E-03 $-6,20E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ 7,00E-03 $-6,20E+01$ $-1,22E+00$ $7,66E+01$ $2,76E-01$ 8,00E-03 $-4,80E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ 9,00E-03 $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ 9,00E-03 $-3,00E+01$ $-1,20E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ 1,00E-02 $-2,00E+00$ $-9,40E-01$ $1,88E+00$ $3,76E-01$ 1,00E-02 $-2,00E+00$ $-9,40E-01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ 1,20E-02 $4,20E+01$ $-1,60E-01$ $-6,72E+00$ $3,58E-01$ 1,30E-02 $6,00E+01$ $3,00E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ 1,40E-02 $7,40E+01$ $6,40E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ 1,50E-02 $8,00E+01$ $1,16E+00$	ĺ	9,00E-04	-1,60E+01	6,40E-01	-1,02E+01	-3,03E-03	
1,00E-03 $-1,80E+01$ $6,20E-01$ $-1,12E+01$ $-4,08E-03$ $1,50E-03$ $-2,80E+01$ $4,00E-01$ $-1,12E+01$ $-9,69E-03$ $2,00E-03$ $-3,80E+01$ $1,80E-01$ $-6,84E+00$ $-1,41E-02$ $3,00E-03$ $-5,60E+01$ $-2,80E-01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ $3,50E-03$ $-6,20E+01$ $-4,60E-01$ $2,85E+01$ $6,44E-05$ $4,00E-03$ $-6,80E+01$ $-6,40E-01$ $4,35E+01$ $1,85E-02$ $5,00E-03$ $-7,60E+01$ $-9,60E-01$ $7,30E+01$ $7,76E-02$ $5,50E-03$ $-7,80E+01$ $-1,08E+00$ $8,42E+01$ $1,17E-01$ $6,00E-03$ $-7,40E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-6,20E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,50E-03$ $-5,60E+01$ $-1,22E+00$ $7,06E+01$ $2,76E-01$ $8,00E-03$ $-4,80E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,20E+00$ $3,60E+01$ $3,71E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+00$ $-9,40E-01$ $1,88E+00$ $3,76E-01$ $1,10E-02$ $2,20E+01$ $-5,80E-01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ $1,20E-02$ $4,20E+01$ $-1,60E-01$ $-6,72E+00$ $3,58E-01$ $1,30E-02$ $6,00E+01$ $3,00E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ $1,40E-02$ $7,40E+01$ $6,40E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ $1,50E-02$	Ì	9,50E-04	-1,60E+01	6,20E-01	-9,92E+00	-3,54E-03	
1,50E-03 $-2,80E+01$ $4,00E-01$ $-1,12E+01$ $-9,69E-03$ $2,00E-03$ $-3,80E+01$ $1,80E-01$ $-6,84E+00$ $-1,41E-02$ $3,00E-03$ $-5,60E+01$ $-2,80E-01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ $3,50E-03$ $-6,20E+01$ $-4,60E-01$ $2,85E+01$ $6,44E-05$ $4,00E-03$ $-6,80E+01$ $-6,40E-01$ $4,35E+01$ $1,85E-02$ $5,00E-03$ $-7,60E+01$ $-9,60E-01$ $7,30E+01$ $7,76E-02$ $5,50E-03$ $-7,80E+01$ $-1,08E+00$ $8,42E+01$ $1,17E-01$ $6,00E-03$ $-7,40E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-6,20E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $2,40E-01$ $7,50E-03$ $-5,60E+01$ $-1,26E+00$ $7,06E+01$ $2,76E-01$ $8,00E-03$ $-4,80E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,00E-03$ $-1,60E+01$ $-1,20E+00$ $3,60E+01$ $3,71E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+00$ $-9,40E-01$ $1,88E+00$ $3,76E-01$ $1,10E-02$ $2,20E+01$ $-5,80E-01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ $1,20E-02$ $4,20E+01$ $-1,60E-01$ $-6,72E+00$ $3,58E-01$ $1,30E-02$ $6,00E+01$ $3,00E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ $1,40E-02$ $7,40E+01$ $6,40E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ $1,50E-02$ $8,00E+01$ $1,20E+00$ $8,04E+01$ $4,59E-01$ $1,60E-02$ <td< td=""><td>ĺ</td><td>1,00E-03</td><td>-1,80E+01</td><td>6,20E-01</td><td>-1,12E+01</td><td>-4,08E-03</td><td></td></td<>	ĺ	1,00E-03	-1,80E+01	6,20E-01	-1,12E+01	-4,08E-03	
2,00E-03 $-3,80E+01$ $1,80E-01$ $-6,84E+00$ $-1,41E-02$ $3,00E-03$ $-5,60E+01$ $-2,80E-01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ $3,50E-03$ $-6,20E+01$ $-4,60E-01$ $2,85E+01$ $6,44E-05$ $4,00E-03$ $-6,80E+01$ $-6,40E-01$ $4,35E+01$ $1,85E-02$ $5,00E-03$ $-7,60E+01$ $-9,60E-01$ $7,30E+01$ $7,76E-02$ $5,50E-03$ $-7,80E+01$ $-1,08E+00$ $8,42E+01$ $1,17E-01$ $6,00E-03$ $-7,40E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-6,20E+01$ $-1,16E+00$ $7,19E+01$ $2,40E-01$ $7,50E-03$ $-5,60E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,20E+00$ $3,60E+01$ $3,71E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+00$ $-9,40E-01$ $1,88E+00$ $3,76E-01$ $1,20E-02$ $4,20E+01$ $-1,60E-01$ $-6,72E+00$ $3,58E-01$ $1,30E-02$ $6,00E+01$ $3,00E-01$ $1,80E+01$ $3,61E-01$ $1,40E-02$ $7,40E+01$ $6,40E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ $1,50E-02$ $8,20E+01$ $9,80E-01$ $8,04E+01$ $4,59E-01$ $1,60E-02$ $8,00E+01$ $1,16E+00$ $9,28E+01$ $5,48E-01$ $1,70E-02$ $6,80E+01$ $1,20E+00$ $8,16E+01$ $6,39E-01$ $1,80E-02$ $5,60E+01$ $1,26E+00$ $7,06E+01$ $7,16E-01$	Ī	1,50E-03	-2,80E+01	4,00E-01	-1,12E+01	-9,69E-03	
3,00E-03 $-5,60E+01$ $-2,80E-01$ $1,57E+01$ $-1,10E-02$ $3,50E-03$ $-6,20E+01$ $-4,60E-01$ $2,85E+01$ $6,44E-05$ $4,00E-03$ $-6,80E+01$ $-6,40E-01$ $4,35E+01$ $1,85E-02$ $5,00E-03$ $-7,60E+01$ $-9,60E-01$ $7,30E+01$ $7,76E-02$ $5,50E-03$ $-7,80E+01$ $-1,08E+00$ $8,42E+01$ $1,17E-01$ $6,00E-03$ $-7,40E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-6,20E+01$ $-1,16E+00$ $7,19E+01$ $2,40E-01$ $7,50E-03$ $-5,60E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $8,00E-03$ $-4,80E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,22E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,08E+00$ $1,73E+01$ $3,71E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+00$ $-9,40E-01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ $1,10E-02$ $2,20E+01$ $-5,80E-01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ $1,30E-02$ $6,00E+01$ $3,00E-01$ $1,80E+01$ $3,61E-01$ $1,30E-02$ $6,00E+01$ $3,00E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ $1,40E-02$ $7,40E+01$ $6,40E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ $1,50E-02$ $8,20E+01$ $9,80E-01$ $8,04E+01$ $4,59E-01$ $1,60E-02$ $8,00E+01$ $1,20E+00$ $8,16E+01$ $6,39E-01$ $1,70E-02$ $6,80E+01$ $1,20E+00$ $8,16E+01$ $6,39E-01$ $1,80E-02$ $5,60E$	Ī	2,00E-03	-3,80E+01	1,80E-01	-6,84E+00	-1,41E-02	
3,50E-03-6,20E+01-4,60E-012,85E+016,44E-054,00E-03-6,80E+01-6,40E-014,35E+011,85E-025,00E-03-7,60E+01-9,60E-017,30E+017,76E-025,50E-03-7,80E+01-1,08E+008,42E+011,17E-016,00E-03-7,40E+01-1,12E+008,29E+011,59E-017,00E-03-6,20E+01-1,16E+007,19E+012,40E-017,50E-03-5,60E+01-1,22E+005,86E+013,08E-019,00E-03-3,00E+01-1,20E+003,60E+013,58E-019,50E-03-1,60E+01-1,08E+001,73E+013,71E-011,00E-02-2,00E+00-9,40E-01-1,28E+013,69E-011,10E-022,20E+01-5,80E-01-1,28E+013,69E-011,20E-024,20E+01-1,60E-01-6,72E+003,58E-011,30E-026,00E+013,00E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-014,74E+013,94E-011,50E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,60E-028,00E+011,20E+008,16E+016,39E-011,60E-028,00E+011,20E+008,16E+016,39E-011,60E-028,00E+011,20E+008,16E+016,39E-011,60E-025,60E+011,20E+007,06E+017,16E-01	Ì	3,00E-03	-5,60E+01	-2,80E-01	1,57E+01	-1,10E-02	
4,00E-03 $-6,80E+01$ $-6,40E-01$ $4,35E+01$ $1,85E-02$ $5,00E-03$ $-7,60E+01$ $-9,60E-01$ $7,30E+01$ $7,76E-02$ $5,50E-03$ $-7,80E+01$ $-1,08E+00$ $8,42E+01$ $1,17E-01$ $6,00E-03$ $-7,40E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-6,20E+01$ $-1,16E+00$ $7,19E+01$ $2,40E-01$ $7,50E-03$ $-5,60E+01$ $-1,26E+00$ $7,06E+01$ $2,76E-01$ $8,00E-03$ $-4,80E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,20E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,50E-03$ $-1,60E+01$ $-1,08E+00$ $1,73E+01$ $3,71E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+00$ $-9,40E-01$ $1,88E+00$ $3,76E-01$ $1,20E-02$ $4,20E+01$ $-1,60E-01$ $-6,72E+00$ $3,58E-01$ $1,30E-02$ $6,00E+01$ $3,00E-01$ $1,80E+01$ $3,61E-01$ $1,40E-02$ $7,40E+01$ $6,40E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ $1,50E-02$ $8,20E+01$ $9,80E-01$ $8,04E+01$ $4,59E-01$ $1,60E-02$ $8,00E+01$ $1,16E+00$ $9,28E+01$ $5,48E-01$ $1,70E-02$ $6,80E+01$ $1,20E+00$ $8,16E+01$ $6,39E-01$ $1,80E-02$ $5,60E+01$ $1,26E+00$ $7,06E+01$ $7,16E-01$	ĺ	3,50E-03	-6,20E+01	-4,60E-01	2,85E+01	6,44E-05	
5,00E-03-7,60E+01-9,60E-017,30E+017,76E-025,50E-03-7,80E+01-1,08E+008,42E+011,17E-016,00E-03-7,40E+01-1,12E+008,29E+011,59E-017,00E-03-6,20E+01-1,16E+007,19E+012,40E-017,50E-03-5,60E+01-1,26E+007,06E+012,76E-018,00E-03-4,80E+01-1,22E+005,86E+013,08E-019,00E-03-3,00E+01-1,20E+003,60E+013,58E-019,50E-03-1,60E+01-1,08E+001,73E+013,71E-011,00E-02-2,00E+00-9,40E-011,88E+003,76E-011,10E-022,20E+01-5,80E-01-1,28E+013,69E-011,20E-024,20E+01-1,60E-01-6,72E+003,58E-011,30E-026,00E+013,00E-011,80E+013,61E-011,40E-027,40E+016,40E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	Ī	4,00E-03	-6,80E+01	-6,40E-01	4,35E+01	1,85E-02	
5,50E-03 $-7,80E+01$ $-1,08E+00$ $8,42E+01$ $1,17E-01$ $6,00E-03$ $-7,40E+01$ $-1,12E+00$ $8,29E+01$ $1,59E-01$ $7,00E-03$ $-6,20E+01$ $-1,16E+00$ $7,19E+01$ $2,40E-01$ $7,50E-03$ $-5,60E+01$ $-1,26E+00$ $7,06E+01$ $2,76E-01$ $8,00E-03$ $-4,80E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,20E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,50E-03$ $-1,60E+01$ $-1,08E+00$ $1,73E+01$ $3,71E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+00$ $-9,40E-01$ $1,88E+00$ $3,76E-01$ $1,10E-02$ $2,20E+01$ $-5,80E-01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ $1,20E-02$ $4,20E+01$ $-1,60E-01$ $-6,72E+00$ $3,58E-01$ $1,30E-02$ $6,00E+01$ $3,00E-01$ $1,80E+01$ $3,61E-01$ $1,40E-02$ $7,40E+01$ $6,40E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ $1,50E-02$ $8,20E+01$ $9,80E-01$ $8,04E+01$ $4,59E-01$ $1,60E-02$ $8,00E+01$ $1,20E+00$ $8,16E+01$ $6,39E-01$ $1,70E-02$ $6,80E+01$ $1,20E+00$ $8,16E+01$ $6,39E-01$ $1,80E-02$ $5,60E+01$ $1,20E+00$ $7,06E+01$ $7,16E-01$		5,00E-03	-7,60E+01	-9,60E-01	7,30E+01	7,76E-02	
6,00E-03-7,40E+01-1,12E+008,29E+011,59E-017,00E-03-6,20E+01-1,16E+007,19E+012,40E-017,50E-03-5,60E+01-1,26E+007,06E+012,76E-018,00E-03-4,80E+01-1,22E+005,86E+013,08E-019,00E-03-3,00E+01-1,20E+003,60E+013,58E-019,50E-03-1,60E+01-1,08E+001,73E+013,71E-011,00E-02-2,00E+00-9,40E-011,88E+003,76E-011,10E-022,20E+01-5,80E-01-1,28E+013,69E-011,20E-024,20E+01-1,60E-01-6,72E+003,58E-011,30E-026,00E+013,00E-011,80E+013,61E-011,40E-027,40E+016,40E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	Ì	5,50E-03	-7,80E+01	-1,08E+00	8,42E+01	1,17E-01	
7,00E-03 $-6,20E+01$ $-1,16E+00$ $7,19E+01$ $2,40E-01$ $7,50E-03$ $-5,60E+01$ $-1,26E+00$ $7,06E+01$ $2,76E-01$ $8,00E-03$ $-4,80E+01$ $-1,22E+00$ $5,86E+01$ $3,08E-01$ $9,00E-03$ $-3,00E+01$ $-1,20E+00$ $3,60E+01$ $3,58E-01$ $9,50E-03$ $-1,60E+01$ $-1,08E+00$ $1,73E+01$ $3,71E-01$ $1,00E-02$ $-2,00E+00$ $-9,40E-01$ $1,88E+00$ $3,76E-01$ $1,10E-02$ $2,20E+01$ $-5,80E-01$ $-1,28E+01$ $3,69E-01$ $1,20E-02$ $4,20E+01$ $-1,60E-01$ $-6,72E+00$ $3,58E-01$ $1,30E-02$ $6,00E+01$ $3,00E-01$ $1,80E+01$ $3,61E-01$ $1,40E-02$ $7,40E+01$ $6,40E-01$ $4,74E+01$ $3,94E-01$ $1,50E-02$ $8,20E+01$ $9,80E-01$ $8,04E+01$ $4,59E-01$ $1,60E-02$ $8,00E+01$ $1,16E+00$ $9,28E+01$ $5,48E-01$ $1,70E-02$ $6,80E+01$ $1,20E+00$ $8,16E+01$ $6,39E-01$ $1,80E-02$ $5,60E+01$ $1,26E+00$ $7,06E+01$ $7,16E-01$	Ì	6,00E-03	-7,40E+01	-1,12E+00	8,29E+01	1,59E-01	
7,50E-03-5,60E+01-1,26E+007,06E+012,76E-018,00E-03-4,80E+01-1,22E+005,86E+013,08E-019,00E-03-3,00E+01-1,20E+003,60E+013,58E-019,50E-03-1,60E+01-1,08E+001,73E+013,71E-011,00E-02-2,00E+00-9,40E-011,88E+003,76E-011,10E-022,20E+01-5,80E-01-1,28E+013,69E-011,20E-024,20E+01-1,60E-01-6,72E+003,58E-011,30E-026,00E+013,00E-011,80E+013,61E-011,40E-027,40E+016,40E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	Ī	7,00E-03	-6,20E+01	-1,16E+00	7,19E+01	2,40E-01	
8,00E-03-4,80E+01-1,22E+005,86E+013,08E-019,00E-03-3,00E+01-1,20E+003,60E+013,58E-019,50E-03-1,60E+01-1,08E+001,73E+013,71E-011,00E-02-2,00E+00-9,40E-011,88E+003,76E-011,10E-022,20E+01-5,80E-01-1,28E+013,69E-011,20E-024,20E+01-1,60E-01-6,72E+003,58E-011,30E-026,00E+013,00E-011,80E+013,61E-011,40E-027,40E+016,40E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01		7,50E-03	-5,60E+01	-1,26E+00	7,06E+01	2,76E-01	
9,00E-03-3,00E+01-1,20E+003,60E+013,58E-019,50E-03-1,60E+01-1,08E+001,73E+013,71E-011,00E-02-2,00E+00-9,40E-011,88E+003,76E-011,10E-022,20E+01-5,80E-01-1,28E+013,69E-011,20E-024,20E+01-1,60E-01-6,72E+003,58E-011,30E-026,00E+013,00E-011,80E+013,61E-011,40E-027,40E+016,40E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01		8,00E-03	-4,80E+01	-1,22E+00	5,86E+01	3,08E-01	
9,50E-03-1,60E+01-1,08E+001,73E+013,71E-011,00E-02-2,00E+00-9,40E-011,88E+003,76E-011,10E-022,20E+01-5,80E-01-1,28E+013,69E-011,20E-024,20E+01-1,60E-01-6,72E+003,58E-011,30E-026,00E+013,00E-011,80E+013,61E-011,40E-027,40E+016,40E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	Ĩ	9,00E-03	-3,00E+01	-1,20E+00	3,60E+01	3,58E-01	
1,00E-02-2,00E+00-9,40E-011,88E+003,76E-011,10E-022,20E+01-5,80E-01-1,28E+013,69E-011,20E-024,20E+01-1,60E-01-6,72E+003,58E-011,30E-026,00E+013,00E-011,80E+013,61E-011,40E-027,40E+016,40E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	Ī	9,50E-03	-1,60E+01	-1,08E+00	1,73E+01	3,71E-01	
1,10E-022,20E+01-5,80E-01-1,28E+013,69E-011,20E-024,20E+01-1,60E-01-6,72E+003,58E-011,30E-026,00E+013,00E-011,80E+013,61E-011,40E-027,40E+016,40E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	Ī	1,00E-02	-2,00E+00	-9,40E-01	1,88E+00	3,76E-01	
1,20E-024,20E+01-1,60E-01-6,72E+003,58E-011,30E-026,00E+013,00E-011,80E+013,61E-011,40E-027,40E+016,40E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	ĺ	1,10E-02	2,20E+01	-5,80E-01	-1,28E+01	3,69E-01	
1,30E-026,00E+013,00E-011,80E+013,61E-011,40E-027,40E+016,40E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	ļ	1,20E-02	4,20E+01	-1,60E-01	-6,72E+00	3,58E-01	
1,40E-027,40E+016,40E-014,74E+013,94E-011,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	ļ	1,30E-02	6,00E+01	3,00E-01	1,80E+01	3,61E-01	]
1,50E-028,20E+019,80E-018,04E+014,59E-011,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	ļ	1,40E-02	7,40E+01	6,40E-01	4,74E+01	3,94E-01	]
1,60E-028,00E+011,16E+009,28E+015,48E-011,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	ļ	1,50E-02	8,20E+01	9,80E-01	8,04E+01	4,59E-01	]
1,70E-026,80E+011,20E+008,16E+016,39E-011,80E-025,60E+011,26E+007,06E+017,16E-01	ļ	1,60E-02	8,00E+01	1,16E+00	9,28E+01	5,48E-01	1
1,80E-02 5,60E+01 1,26E+00 7,06E+01 7,16E-01	ļ	1,70E-02	6,80E+01	1,20E+00	8,16E+01	6,39E-01	1
	ļ	1,80E-02	5,60E+01	1,26E+00	7,06E+01	7,16E-01	

Tableau III.13 : Calcul des pertes fer pour  $V_1$ =10V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	<b>V20</b> (t) * Vrh(t) $\int$ V20(t) * Vrh(t) dt		Pfer(w)
0,00E+00	1,00E+01	1,48E+00	1,48E+01	0,00E+00	2,86E+00
1,00E-05	1,00E+01	1,44E+00	1,44E+01	1,46E-04	
2,00E-05	8,00E+00	1,44E+00	1,15E+01	2,76E-04	
3,00E-05	8,00E+00	1,44E+00	1,15E+01	3,91E-04	
4,00E-05	8,00E+00	1,44E+00	1,15E+01	5,06E-04	
5,00E-05	8,00E+00	1,44E+00	1,15E+01	6,21E-04	
6,00E-05	8,00E+00	1,40E+00	1,12E+01	7,35E-04	
7,00E-05	6,00E+00	1,40E+00	8,40E+00	8,33E-04	
8,00E-05	6,00E+00	1,44E+00	8,64E+00	9,18E-04	
9,00E-05	6,00E+00	1,40E+00	8,40E+00	1,00E-03	
1,00E-04	6,00E+00	1,40E+00	8,40E+00	1,09E-03	
1,50E-04	4,00E+00	1,40E+00	5,60E+00	1,44E-03	
2,00E-04	2,00E+00	1,36E+00	2,72E+00	1,64E-03	
3,00E-04	-2,00E+00	1,32E+00	-2,64E+00	1,59E-03	
3,50E-04	-4,00E+00	1,28E+00	-5,12E+00	1,39E-03	
4,00E-04	-6,00E+00	1,28E+00	-7,68E+00	1,07E-03	
5,00E-04	-1,00E+01	1,20E+00	-1,20E+01	1,19E-04	
5,50E-04	-1,20E+01	1,16E+00	-1,39E+01	-4,91E-04	
6,00E-04	-1,20E+01	1,16E+00	-1,39E+01	-1,19E-03	
7,00E-04	-1,60E+01	1,08E+00	-1,73E+01	-2,85E-03	
7,50E-04	-1,80E+01	1,04E+00	-1,87E+01	-3,80E-03	
8,00E-04	-2,00E+01	1,00E+00	-2,00E+01	-4,78E-03	
9,00E-04	-2,20E+01	9,60E-01	-2,11E+01	-6,91E-03	
9,50E-04	-2,40E+01	9,20E-01	-2,21E+01	-8,02E-03	
1,00E-03	-2,60E+01	8,80E-01	-2,29E+01	-9,18E-03	
1,50E-03	-4,00E+01	5,60E-01	-2,24E+01	-2,10E-02	
2,00E-03	-5,60E+01	2,00E-01	-1,12E+01	-2,98E-02	
3,00E-03	-8,20E+01	-4,40E-01	3,61E+01	-1,98E-02	
3,50E-03	-9,40E+01	-7,20E-01	6,77E+01	5,68E-03	
4,00E-03	-1,02E+02	-9,60E-01	9,79E+01	4,65E-02	
5,00E-03	-1,16E+02	-1,32E+00	1,53E+02	1,72E-01	
5,50E-03	-1,18E+02	-1,44E+00	1,70E+02	2,53E-01	
6,00E-03	-1,14E+02	-1,56E+00	1,78E+02	3,40E-01	
7,00E-03	-9,40E+01	-1,60E+00	1,50E+02	5,06E-01	
7,50E-03	-8,40E+01	-1,64E+00	1,38E+02	5,79E-01	
8,00E-03	-7,60E+01	-1,68E+00	1,28E+02	6,45E-01	
9,00E-03	-4,80E+01	-1,64E+00	7,87E+01	7,50E-01	
9,50E-03	-2,60E+01	-1,56E+00	4,06E+01	7,80E-01	
1,00E-02	-6,00E+00	-1,36E+00	8,16E+00	7,92E-01	
1,10E-02	2,80E+01	-8,40E-01	-2,35E+01	7,80E-01	
1,20E-02	5,80E+01	-1,60E-01	-9,28E+00	7,61E-01	
1,30E-02	8,60E+01	5,20E-01	4,47E+01	7,76E-01	
1,40E-02	1,06E+02	1,04E+00	1,10E+02	8,53E-01	
1,50E-02	1,20E+02	1,40E+00	1,68E+02	9,94E-01	
1,60E-02	1,20E+02	1,64E+00	1,97E+02	1,18E+00	
1,70E-02	1,02E+02	1,72E+00	1,75E+02	1,37E+00	
1,80E-02	8,20E+01	1,76E+00	1,44E+02	1,53E+00	

Tableau III.14 : Calcul des pertes fer pour  $V_1$ =15V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t) * Vrh(t)	∫ V20(t) * Vrh(t) dt	Pfer(w)
0,00E+00	1,20E+01	1,80E+00	2,16E+01	0,00E+00	3,85E+00
1,00E-05	1,20E+01	1,80E+00	2,16E+01	2,16E-04	
2,00E-05	1,00E+01	1,80E+00	1,80E+01	4,14E-04	
3,00E-05	1,00E+01	1,80E+00	1,80E+01	5,94E-04	
4,00E-05	1,00E+01	1,80E+00	1,80E+01	7,74E-04	
5,00E-05	1,00E+01	1,80E+00	1,80E+01	9,54E-04	
6,00E-05	8,00E+00	1,76E+00	1,41E+01	1,11E-03	
7,00E-05	1,00E+01	1,76E+00	1,76E+01	1,27E-03	
8,00E-05	8,00E+00	1,76E+00	1,41E+01	1,43E-03	_
9,00E-05	6,00E+00	1,76E+00	1,06E+01	1,55E-03	_
1,00E-04	6,00E+00	1,72E+00	1,03E+01	1,66E-03	_
1,50E-04	4,00E+00	1,72E+00	6,88E+00	2,16E-03	_
2,00E-04	2,00E+00	1,72E+00	3,44E+00	2,48E-03	_
3,00E-04	-2,00E+00	1,64E+00	-3,28E+00	2,42E-03	_
3,50E-04	-4,00E+00	1,60E+00	-6,40E+00	2,14E-03	_
4,00E-04	-6,00E+00	1,56E+00	-9,36E+00	1,69E-03	_
5,00E-04	-1,00E+01	1,48E+00	-1,48E+01	3,13E-04	_
5,50E-04	-1,20E+01	1,48E+00	-1,78E+01	-5,31E-04	_
6,00E-04	-1,60E+01	1,40E+00	-2,24E+01	-1,54E-03	
7,00E-04	-1,80E+01	1,36E+00	-2,45E+01	-3,87E-03	
7,50E-04	-2,00E+01	1,32E+00	-2,64E+01	-5,18E-03	
8,00E-04	-2,20E+01	1,28E+00	-2,82E+01	-6,57E-03	_
9,00E-04	-2,60E+01	1,20E+00	-3,12E+01	-9,55E-03	_
9,50E-04	-2,80E+01	1,16E+00	-3,25E+01	-1,12E-02	_
1,00E-03	-3,00E+01	1,12E+00	-3,36E+01	-1,28E-02	_
1,50E-03	-4,60E+01	6,80E-01	-3,13E+01	-2,96E-02	_
2,00E-03	-6,40E+01	2,80E-01	-1,79E+01	-4,25E-02	
3,00E-03	-9,40E+01	-5,20E-01	4,89E+01	-2,91E-02	
3,50E-03	-1,08E+02	-8,40E-01	9,07E+01	5,98E-03	
4,00E-03	-1,20E+02	-1,12E+00	1,34E+02	6,21E-02	-
5,00E-03	-1,36E+02	-1,56E+00	2,12E+02	2,31E-01	-
5,50E-03	-1,38E+02	-1,64E+00	2,26E+02	3,40E-01	-
6,00E-03	-1,32E+02	-1,76E+00	2,32E+02	4,56E-01	-
7,00E-03	-1,12E+02	-1,84E+00	2,06E+02	6,78E-01	-
7,50E-03	-1,00E+02	-1,88E+00	1,88E+02	7,77E-01	
8,00E-03	-9,00E+01	-1,92E+00	1,/3E+02	8,68E-01	
9,00E-03	-5,60E+01	-2,00E+00	1,12E+02	1,02E+00	
9,50E-03	-3,20E+01	-1,92E+00	6,14E+01	1,06E+00	
1,00E-02	-8,00E+00	-1,/2E+00	1,38E+01	1,08E+00	4
1,10E-02	3,20E+01	-1,04E+00	-3,33E+U1	1,06E+00	-
1,20E-02	6,60E+01	-2,00E-01	-1,32E+U1	1,03E+00	-
1,30E-02	9,80E+01	6,00E-01	5,88E+01	1,05E+00	-
1,40E-02	1,22E+U2	1,16E+00	1,42E+02	1,15E+00	-
1,50E-02	1,40E+02	1,60E+00	2,24E+U2	1,34E+UU	-
1,60E-02	1,38E+02	1,88E+00	2,59E+02	1,59E+00	4
1,70E-02	1,18E+02	1,92E+00	2,27E+02	1,84E+00	J

Tableau III.15 : Calcul des pertes fer pour  $V_1$ =17,5V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t) * Vrh(t) $\int$ V20(t) * Vrh(t) dt		: Pfer(w)	
0,00E+00	1,40E+01	2,28E+00	3,19E+01	0,00E+00	5,04E+00	
1,00E-05	1,40E+01	2,32E+00	3,25E+01	3,22E-04		
2,00E-05	1,40E+01	2,28E+00	3,19E+01	6,44E-04		
3,00E-05	1,40E+01	2,24E+00	3,14E+01	9,60E-04		
4,00E-05	1,20E+01	2,24E+00	2,69E+01	1,25E-03		
5,00E-05	1,20E+01	2,24E+00	2,69E+01	1,52E-03	-	
6,00E-05	1,20E+01	2,24E+00	2,69E+01	1,79E-03	-	
7,00E-05	1,00E+01	2,24E+00	2,24E+01	2,04E-03	-	
8,00E-05	1,00E+01	2,24E+00	2,24E+01	2,26E-03	-	
9,00E-05	1,00E+01	2,24E+00	2,24E+01	2,48E-03	-	
1,00E-04	8,00E+00	2,24E+00	1,79E+01	2,69E-03	-	
1,50E-04	6,00E+00	2,20E+00	1,32E+01	3,55E-03	-	
2,00E-04	4,00E+00	2,16E+00	8,64E+00	4,09E-03	-	
3,00E-04	-2,00E+00	2,12E+00	-4,24E+00	4,25E-03	1	
3,50E-04	-4,00E+00	2,08E+00	-8,32E+00	4,02E-03		
4,00E-04	-6,00E+00	2,04E+00	-1,22E+01	3,47E-03		
5,00E-04	-1,20E+01	1,92E+00	-2,30E+01	1,75E-03	-	
5,50E-04	-1,40E+01	1,88E+00	-2,63E+01	5,46E-04	-	
6.00E-04	-1.60E+01	1.84E+00	-2.94E+01	-8.79E-04	-	
7.00E-04	-2.00E+01	1.72E+00	-3.44E+01	-4.14E-03	-	
7.50E-04	-2.20E+01	1.68E+00	-3.70E+01	-5.96E-03	-	
8.00F-04	-2.60F+01	1.64F+00	-4.26F+01	-7.97F-03	-	
9.00E-04	-3.00F+01	1.56F+00	-4.68F+01	-1.23F-02	-	
9.50E-04	-3,20F+01	1,52E+00	-4.86F+01	-1.46F-02	-	
1 00F-03	-3 40F+01	1 44F+00	-4 90F+01	-1 70F-02	-	
1 50E-03	-5 20E+01	9 20F-01	-4 78F+01	-4 18F-02	-	
2 00F-03	-7 20E+01	4 00F-01	-2 88F+01	-6 12E-02	-	
3 00F-03	-1.06E+02	-6 00E-01	6 36F+01	-4 71F-02	-	
3,50E-03	-1 22E+02	-9 60E-01	1 17E+02	-2 62E-03	-	
4 00E-03	-1 36E+02	-1 2/F+00	1,17E+02	6 86F-02	-	
5,00E-03	-1 56E+02	-1 72E+00	2 68E+02	0,80E 02	-	
5,00E-03	-1,50L+02	-1,72L+00	2,08L+02	2,83E-01	-	
5,50E-03	-1,58L+02	-1,84L+00	2,911+02	4,24L-01 5 75E-01	-	
0,00E-03	-1,34L+02	-1,90L+00	3,02L+02	9,655 01	-	
7,002-03	-1,30E+02	-2,08E+00	2,702+02	0.01E.01	-	
7,30E-03	-1,100+02	-2,10E+00	2,310+02	1 115+00	-	
8,00E-03	-1,04E+02	-2,20E+00	2,29E+02	1,110	-	
9,00E-03	-0,00E+01	-2,44E+00	1,01E+U2	1,31E+00	-	
9,50E-03	-4,00E+01	-2,36E+00	9,44E+01	1,38E+00	-	
1,00E-02	-1,00E+01	-2,20E+00	2,20E+01	1,41E+00	-	
1,10E-02	3,60E+01	-1,44E+00	-5,18E+01	1,39E+00	-	
1,20E-02	7,40E+01	-3,0UE-U1	-2,00E+U1	1,34E+UU	-	
1,30E-02	1,10E+02	6,40E-01	7,04E+01	1,36E+UU	-	
1,40E-02	1,38E+02	1,32E+00	1,82E+02	1,49E+00	-	
1,50E-02	1,58E+02	1,76E+00	2,78E+02	1,72E+00	-	
1,60E-02	1,60E+02	2,04E+00	3,26E+02	2,04E+00	-	
1,70E-02	1,38E+02	2,16E+00	2,98E+02	2,35E+00	4	
1,80E-02	1,12E+02	2,28E+00	2,55E+02	2,63E+00		

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t) * Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t) dt$	Pfer(t)
0,00E+00	1,40E+01	2,80E+00	3,92E+01	0,00E+00	6,04E+00
1,00E-05	1,40E+01	2,80E+00	3,92E+01	3,92E-04	
2,00E-05	1,40E+01	2,80E+00	3,92E+01	7,84E-04	
3,00E-05	1,20E+01	2,76E+00	3,31E+01	1,15E-03	
4,00E-05	1,20E+01	2,76E+00	3,31E+01	1,48E-03	
5,00E-05	1,00E+01	2,76E+00	2,76E+01	1,78E-03	
6,00E-05	1,00E+01	2,76E+00	2,76E+01	2,06E-03	
7,00E-05	1,00E+01	2,76E+00	2,76E+01	2,33E-03	
8,00E-05	8,00E+00	2,72E+00	2,18E+01	2,58E-03	
9,00E-05	8,00E+00	2,76E+00	2,21E+01	2,80E-03	
1,00E-04	8,00E+00	2,72E+00	2,18E+01	3,02E-03	
1,50E-04	6,00E+00	2,68E+00	1,61E+01	3,91E-03	
2,00E-04	2,00E+00	2,68E+00	5,36E+00	4,39E-03	-
3,00E-04	-4,00E+00	2,56E+00	-1,02E+01	4,21E-03	-
3,50E-04	-8,00E+00	2,52E+00	-2,02E+01	3,55E-03	1
4,00E-04	-8,00E+00	2,48E+00	-1,98E+01	2,56E-03	
5.00E-04	-1.40E+01	2.32E+00	-3.25E+01	-2.03E-04	
5,50E-04	-1,60E+01	2,32E+00	-3,71E+01	-2,06E-03	
6.00E-04	-2.00E+01	2.24E+00	-4.48E+01	-4.15E-03	-
7.00E-04	-2.40E+01	2.12E+00	-5.09E+01	-8.93E-03	-
7.50E-04	-2.60E+01	2.08E+00	-5.41E+01	-1.16E-02	-
8,00E-04	-2,80E+01	2,00E+00	-5,60E+01	-1,45E-02	
9,00E-04	-3,40E+01	, 1,92E+00	-6,53E+01	-2,06E-02	
9,50E-04	-3,60E+01	1,80E+00	-6,48E+01	-2,38E-02	
1,00E-03	-3,80E+01	1,76E+00	-6,69E+01	-2,70E-02	
1,50E-03	-5,80E+01	1,12E+00	-6,50E+01	-6,09E-02	
2,00E-03	-8,00E+01	4,80E-01	-3,84E+01	-8,72E-02	
3,00E-03	-1,16E+02	-6,40E-01	7,42E+01	-7,25E-02	-
3,50E-03	-1,34E+02	-1,08E+00	1,45E+02	-1,83E-02	
4,00E-03	-1,48E+02	-1,36E+00	2,01E+02	6,85E-02	
5,00E-03	-1,70E+02	-1,88E+00	3,20E+02	3,30E-01	
5,50E-03	-1,74E+02	-2,04E+00	3,55E+02	4,98E-01	
6,00E-03	-1,70E+02	-2,12E+00	3,60E+02	6,78E-01	
7,00E-03	-1,44E+02	-2,32E+00	3,34E+02	1,03E+00	
7,50E-03	-1,28E+02	-2,32E+00	2,97E+02	1,19E+00	
8,00E-03	-1,14E+02	-2,52E+00	2,87E+02	1,33E+00	
9,00E-03	-7,20E+01	-2,84E+00	2,04E+02	1,59E+00	
1,00E-02	-1,00E+01	-2,72E+00	2,72E+01	1,71E+00	]
1,20E-02	8,00E+01	-4,40E-01	-3,52E+01	1,61E+00	
1,30E-02	1,20E+02	6,80E-01	8,16E+01	1,63E+00	
1,40E-02	1,52E+02	1,44E+00	2,19E+02	1,78E+00	
1,50E-02	1,74E+02	1,96E+00	3,41E+02	2,07E+00	
1,60E-02	1,76E+02	2,32E+00	4,08E+02	2,44E+00	
1,70E-02	1,52E+02	2,36E+00	3,59E+02	2,82E+00	
1,80E-02	1,22E+02	2,60E+00	3,17E+02	3,16E+00	

Tableau III.17 : Calcul des pertes fer pour  $V_1=22V$ 

t(S)	V20(t) Vrh(t)		V20(t)*Vrh(t)	V20(t)*Vrh(t)dt	Pfer(t)
0,00E+00	1,20E+01	4,08E+00	4,90E+01	0,00E+00	7,90E+00
1,00E-05	1,20E+01	4,08E+00	4,90E+01	4,90E-04	
2,00E-05	8,00E+00	4,08E+00	3,26E+01	8,98E-04	
3,00E-05	8,00E+00	4,08E+00	3,26E+01	1,22E-03	
4,00E-05	8,00E+00	4,08E+00	3,26E+01	1,55E-03	
5,00E-05	8,00E+00	4,08E+00	3,26E+01	1,88E-03	
6,00E-05	8,00E+00	4,00E+00	3,20E+01	2,20E-03	
7,00E-05	8,00E+00	4,00E+00	3,20E+01	2,52E-03	
8,00E-05	4,00E+00	4,00E+00	1,60E+01	2,76E-03	
9,00E-05	4,00E+00	4,00E+00	1,60E+01	2,92E-03	
1,00E-04	4,00E+00	4,00E+00	1,60E+01	3,08E-03	
1,50E-04	0,00E+00	4,00E+00	0,00E+00	3,64E-03	
2,00E-04	-4,00E+00	3,84E+00	-1,54E+01	3,56E-03	
3,00E-04	-8,00E+00	3,76E+00	-3,01E+01	1,67E-03	
3,50E-04	-1,20E+01	3,68E+00	-4,42E+01	-4,32E-05	
4,00E-04	-1,20E+01	3,60E+00	-4,32E+01	-2,23E-03	
5,00E-04	-2,00E+01	3,44E+00	-6,88E+01	-8,16E-03	
5,50E-04	-2,00E+01	3,36E+00	-6,72E+01	-1,17E-02	
6,00E-04	-2,40E+01	3,28E+00	-7,87E+01	-1,57E-02	
7,00E-04	-3,20E+01	3,12E+00	-9,98E+01	-2,46E-02	
7,50E-04	-3,20E+01	3,04E+00	-9,73E+01	-2,95E-02	
8,00E-04	-3,60E+01	2,96E+00	-1,07E+02	-3,44E-02	
9,00E-04	-4,00E+01	2,72E+00	-1,09E+02	-4,50E-02	
9,50E-04	-4,40E+01	2,64E+00	-1,16E+02	-5,05E-02	
1,00E-03	-4,40E+01	2,56E+00	-1,13E+02	-5,62E-02	
1,50E-03	-6,80E+01	1,60E+00	-1,09E+02	-1,13E-01	
2,00E-03	-8,80E+01	8,00E-01	-7,04E+01	-1,57E-01	
3,00E-03	-1,32E+02	-6,40E-01	8,45E+01	-1,55E-01	
3,50E-03	-1,52E+02	-1,12E+00	1,70E+02	-9,11E-02	
4,00E-03	-1,68E+02	-1,52E+00	2,55E+02	1,61E-02	
5,00E-03	-1,96E+02	-2,00E+00	3,92E+02	3,43E-01	
5,50E-03	-2,00E+02	-2,16E+00	4,32E+02	5,55E-01	
6,00E-03	-1,96E+02	-2,32E+00	4,55E+02	7,82E-01	
7,00E-03	-1,64E+02	-2,56E+00	4,20E+02	1,23E+00	
7,50E-03	-1,48E+02	-2,72E+00	4,03E+02	1,43E+00	
8,00E-03	-1,28E+02	-3,04E+00	3,89E+02	1,63E+00	
9,00E-03	-8,00E+01	-3,76E+00	3,01E+02	1,99E+00	
9,50E-03	-4,40E+01	-4,00E+00	1,76E+02	2,10E+00	
1,00E-02	-8,00E+00	-3,92E+00	3,14E+01	2,15E+00	
1,10E-02	4,80E+01	-2,48E+00	-1,19E+02	2,09E+00	
1,20E-02	9,20E+01	-6,40E-01	-5,89E+01	2,00E+00	
1,30E-02	1,36E+02	8,00E-01	1,09E+02	2,01E+00	
1,40E-02	1,72E+02	1,76E+00	3,03E+02	2,22E+00	
1,50E-02	2,00E+02	2,24E+00	4,48E+02	2,59E+00	
1,60E-02	2,04E+02	2,56E+00	5,22E+02	3,08E+00	
1,70E-02	1,72E+02	2,80E+00	4,82E+02	3,59E+00	
1,80E-02	1,36E+02	3,20E+00	4,35E+02	4,04E+00	

Tableau III.18 : Calcul des pertes fer pour  $V_1$ =25V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t) * Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t) dt$	Pfer(t)
0,00E+00	1,20E+01	5,52E+00	6,62E+01	0,00E+00	9,40E+00
1,00E-05	1,20E+01	5,60E+00	6,72E+01	6,67E-04	
2,00E-05	1,20E+01	5,52E+00	6,62E+01	1,33E-03	
3,00E-05	8,00E+00	5,52E+00	4,42E+01	1,89E-03	-
4,00E-05	8,00E+00	5,52E+00	4,42E+01	2,33E-03	
5,00E-05	8,00E+00	5,44E+00	4,35E+01	2,77E-03	-
6,00E-05	8,00E+00	5,52E+00	4,42E+01	3,20E-03	-
7,00E-05	8,00E+00	5,44E+00	4,35E+01	3,64E-03	
8,00E-05	8,00E+00	5,44E+00	4,35E+01	4,08E-03	
9,00E-05	4,00E+00	5,44E+00	2,18E+01	4,40E-03	
1,00E-04	4,00E+00	5,44E+00	2,18E+01	4,62E-03	
1,50E-04	0,00E+00	5,36E+00	0,00E+00	5,60E-03	
2,00E-04	0,00E+00	5,36E+00	0,00E+00	5,60E-03	
3,00E-04	-8,00E+00	5,12E+00	-4,10E+01	2,90E-03	
3,50E-04	-1,20E+01	5,04E+00	-6,05E+01	5,57E-04	
4,00E-04	-1,20E+01	4,96E+00	-5,95E+01	-2,63E-03	
5,00E-04	-2,00E+01	4,72E+00	-9,44E+01	-1,09E-02	
5,50E-04	-2,00E+01	4,64E+00	-9,28E+01	-1,56E-02	
6,00E-04	-2,40E+01	4,48E+00	-1,08E+02	-2,08E-02	
7,00E-04	-3,20E+01	4,24E+00	-1,36E+02	-3,30E-02	
7,50E-04	-3,20E+01	4,08E+00	-1,31E+02	-3,96E-02	
8,00E-04	-3,60E+01	4,00E+00	-1,44E+02	-4,67E-02	
9,00E-04	-4,00E+01	3,68E+00	-1,47E+02	-6,16E-02	
9,50E-04	-4,40E+01	3,60E+00	-1,58E+02	-6,91E-02	
1,00E-03	-4,40E+01	3,44E+00	-1,51E+02	-7,68E-02	
1,50E-03	-6,80E+01	2,24E+00	-1,52E+02	-1,55E-01	
2,00E-03	-9,20E+01	1,12E+00	-1,03E+02	-2,19E-01	
3,00E-03	-1,36E+02	-4,80E-01	6,53E+01	-2,40E-01	
3,50E-03	-1,60E+02	-1,12E+00	1,79E+02	-1,78E-01	
4,00E-03	-1,80E+02	-1,52E+00	2,74E+02	-6,14E-02	_
5,00E-03	-2,08E+02	-2,16E+00	4,49E+02	3,06E-01	
5,50E-03	-2,16E+02	-2,32E+00	5,01E+02	5,46E-01	_
6,00E-03	-2,16E+02	-2,56E+00	5,53E+02	8,08E-01	_
7,00E-03	-1,84E+02	-2,72E+00	5,00E+02	1,34E+00	
7,50E-03	-1,64E+02	-2,96E+00	4,85E+02	1,59E+00	
8,00E-03	-1,44E+02	-3,36E+00	4,84E+02	1,83E+00	
9,00E-03	-8,80E+01	-4,64E+00	4,08E+02	2,29E+00	_
1,00E-02	-8,00E+00	-5,44E+00	4,35E+01	2,53E+00	_
1,20E-02	9,20E+01	-1,04E+00	-9,57E+01	2,31E+00	_
1,30E-02	1,40E+02	6,40E-01	8,96E+01	2,30E+00	_
1,40E-02	1,84E+02	1,76E+00	3,24E+02	2,51E+00	4
1,50E-02	2,12E+02	2,32E+00	4,92E+02	2,92E+00	_
1,60E-02	2,20E+02	2,72E+00	5,98E+02	3,48E+00	4
1,70E-02	1,92E+02	2,96E+00	5,68E+02	4,08E+00	4
1,80E-02	1,52E+02	3,52E+00	5,35E+02	4,63E+00	]

Tableau III.19 : Calcul des pertes fer pour  $V_1$ =27,5V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	V20(t) * Vrh(t) $\int V20(t) * Vrh(t) dt$		Pfer(t)
0,00E+00	8,00E+00	9,40E+00	7,52E+01	0,00E+00	1,15E+01
1,00E-05	8,00E+00	9,40E+00	7,52E+01	7,52E-04	
2,00E-05	8,00E+00	9,40E+00	7,52E+01	1,50E-03	
3,00E-05	8,00E+00	9,40E+00	7,52E+01	2,26E-03	
4,00E-05	8,00E+00	9,40E+00	7,52E+01	3,01E-03	
5,00E-05	8,00E+00	9,20E+00	7,36E+01	3,75E-03	
6,00E-05	8,00E+00	9,20E+00	7,36E+01	4,49E-03	
7,00E-05	8,00E+00	9,20E+00	7,36E+01	5,22E-03	
8,00E-05	4,00E+00	9,20E+00	3,68E+01	5,78E-03	
9,00E-05	4,00E+00	9,20E+00	3,68E+01	6,14E-03	
1,00E-04	4,00E+00	9,20E+00	3,68E+01	6,51E-03	
1,50E-04	0,00E+00	9,20E+00	0,00E+00	7,42E-03	
2,00E-04	-4,00E+00	8,80E+00	-3,52E+01	7,25E-03	
3,00E-04	-8,00E+00	8,60E+00	-6,88E+01	2,87E-03	
3,50E-04	-8,00E+00	8,60E+00	-6,88E+01	-5,68E-04	
4,00E-04	-1,20E+01	8,40E+00	-1,01E+02	-5,45E-03	
5,00E-04	-1,60E+01	8,00E+00	-1,28E+02	-1,74E-02	
5,50E-04	-2,00E+01	7,80E+00	-1,56E+02	-2,48E-02	
6,00E-04	-2,40E+01	7,60E+00	-1,82E+02	-3,26E-02	
7,00E-04	-2,80E+01	7,20E+00	-2,02E+02	-5,14E-02	
7,50E-04	-3,20E+01	7,00E+00	-2,24E+02	-6,15E-02	
8,00E-04	-3,20E+01	6,80E+00	-2,18E+02	-7,24E-02	
9,00E-04	-3,60E+01	6,40E+00	-2,30E+02	-9,45E-02	
9,50E-04	-4,00E+01	6,20E+00	-2,48E+02	-1,06E-01	
1,00E-03	-4,00E+01	5,80E+00	-2,32E+02	-1,18E-01	
1,50E-03	-6,40E+01	3,80E+00	-2,43E+02	-2,41E-01	
2,00E-03	-8,40E+01	2,20E+00	-1,85E+02	-3,47E-01	
3,00E-03	-1,36E+02	0,00E+00	0,00E+00	-4,39E-01	
3,50E-03	-1,64E+02	-8,00E-01	1,31E+02	-3,98E-01	
4,00E-03	-1,88E+02	-1,40E+00	2,63E+02	-2,94E-01	
5,00E-03	-2,28E+02	-2,20E+00	5,02E+02	8,96E-02	
5,50E-03	-2,40E+02	-2,40E+00	5,76E+02	3,55E-01	
6,00E-03	-2,44E+02	-2,60E+00	6,34E+02	6,55E-01	
7,00E-03	-2,16E+02	-3,00E+00	6,48E+02	1,31E+00	
7,50E-03	-1,92E+02	-3,40E+00	6,53E+02	1,63E+00	
8,00E-03	-1,68E+02	-4,00E+00	6,72E+02	1,96E+00	
9,00E-03	-9,20E+01	-7,00E+00	6,44E+02	2,63E+00	
9,50E-03	-4,40E+01	-8,80E+00	3,87E+02	2,90E+00	
1,00E-02	-8,00E+00	-9,00E+00	7,20E+01	3,00E+00	
1,10E-02	4,40E+01	-5,80E+00	-2,55E+02	2,87E+00	
1,20E-02	8,40E+01	-1,80E+00	-1,51E+02	2,65E+00	
1,30E-02	1,40E+02	4,00E-01	5,60E+01	2,59E+00	
1,40E-02	1,92E+02	1,80E+00	3,46E+02	2,79E+00	
1,50E-02	2,28E+02	2,60E+00	5,93E+02	3,27E+00	
1,60E-02	2,48E+02	3,00E+00	7,44E+02	3,95E+00	_
1,70E-02	2,24E+02	3,40E+00	7,62E+02	4,72E+00	
1,80E-02	1,76E+02	4,20E+00	7,39E+02	5,49E+00	

Tableau III.20 : Calcul des pertes fer pour  $V_1 = 30$ V

Les pertes fer calculées sont présentées dans le tableau III.21 pour le transformateur Delorenzo.

$V_{l}(V)$	10	15	17,5	20	22	25	27,5	30
$V_1^{2}(V^2)$	100	225	306,25	400	484	625	756,25	900
Pfer(W)	1,33	2,86	3,85	5,04	6,04	7,9	9,40	11,5

#### Tableau III.21 : Résultats des pertes fer

Les courbes des pertes fer en fonction de la tension d'alimentation et en fonction du carré de la tension d'alimentation sont illustrées sur les figures III.9 et III.10.



Figure III.9 : Evolution des pertes fer en fonction de la tension d'alimentation (Transformateur DELORENZO)



Figure III.10 : Evolution des pertes fer en fonction du carré de la tension d'alimentation (Transformateur DELORENZO)

# III.4.2.3. Transformateur PHYWE

t(S)	V20(t)	Vrh(t)	( V20(t)dt	V20(t)*Vrh(t)	(V20(t) * Vrh(t)dt	Pfer(w)
0.00F+00	2.40F+00	7.00F-01	0.00F+00	1.68F+00	0.00F+00	4.52F-01
1.00E-05	2.40E+00	7.00E-01	2.40E-05	1.68E+00	1.68E-05	.,
2.00E-05	2.40E+00	6.80E-01	4.80E-05	1.63E+00	3.34E-05	
3.00E-05	2.40E+00	7.00E-01	7.20E-05	1.68E+00	4.99E-05	
4,00E-05	1,60E+00	6,80E-01	9,20E-05	1,09E+00	6,38E-05	
5.00E-05	1.60E+00	7.00E-01	1.08E-04	1.12E+00	7.48E-05	
6.00E-05	1.60E+00	7.00E-01	1.24E-04	1.12E+00	8.60E-05	
7,00E-05	1,60E+00	7,00E-01	1,40E-04	1,12E+00	9,72E-05	
8,00E-05	1,60E+00	6,80E-01	1,56E-04	1,09E+00	1,08E-04	
9,00E-05	1,60E+00	6,80E-01	1,72E-04	1,09E+00	1,19E-04	
1,00E-04	8,00E-01	6,80E-01	1,84E-04	5,44E-01	1,27E-04	
1,50E-04	8,00E-01	7,00E-01	2,24E-04	5,60E-01	1,55E-04	
2,00E-04	0,00E+00	6,80E-01	2,36E-04	0,00E+00	1,63E-04	
3,00E-04	-1,60E+00	6,80E-01	1,64E-04	-1,09E+00	1,15E-04	
3,50E-04	-2,40E+00	6,60E-01	8,00E-05	-1,58E+00	5,84E-05	
4,00E-04	-2,40E+00	6,60E-01	-4,00E-05	-1,58E+00	-2,22E-05	
5,00E-04	-4,00E+00	6,20E-01	-3,68E-04	-2,48E+00	-2,36E-04	
5,50E-04	-4,00E+00	6,20E-01	-5,68E-04	-2,48E+00	-3,65E-04	
6,00E-04	-4,80E+00	6,40E-01	-8,04E-04	-3,07E+00	-5,14E-04	
7,00E-04	-6,40E+00	6,20E-01	-1,35E-03	-3,97E+00	-8,54E-04	
7,50E-04	-6,40E+00	6,20E-01	-1,67E-03	-3,97E+00	-1,05E-03	
8,00E-04	-7,20E+00	6,00E-01	-2,00E-03	-4,32E+00	-1,25E-03	
9,00E-04	-8,00E+00	6,00E-01	-2,75E-03	-4,80E+00	-1,70E-03	
9,50E-04	-8,80E+00	6,00E-01	-3,16E-03	-5,28E+00	-1,94E-03	
1,00E-03	-9,60E+00	5,80E-01	-3,60E-03	-5,57E+00	-2,20E-03	
1,50E-03	-1,44E+01	4,80E-01	-9,54E-03	-6,91E+00	-5,30E-03	
2,00E-03	-2,00E+01	3,80E-01	-1,82E-02	-7,60E+00	-8,96E-03	
3,00E-03	-2,88E+01	1,40E-01	-4,29E-02	-4,03E+00	-1,52E-02	
3,50E-03	-3,28E+01	4,00E-02	-5,85E-02	-1,31E+00	-1,65E-02	
4,00E-03	-3,60E+01	-1,00E-01	-7,59E-02	3,60E+00	-1,61E-02	
5,00E-03	-4,08E+01	-2,80E-01	-1,15E-01	1,14E+01	-8,72E-03	
5,50E-03	-4,08E+01	-3,60E-01	-1,35E-01	1,47E+01	-1,89E-03	
6,00E-03	-3,84E+01	-4,00E-01	-1,55E-01	1,54E+01	6,31E-03	
7,00E-03	-3,28E+01	-5,60E-01	-1,90E-01	1,84E+01	2,44E-02	
7,50E-03	-2,96E+01	-5,80E-01	-2,06E-01	1,72E+01	3,33E-02	
8,00E-03	-2,64E+01	-6,80E-01	-2,20E-01	1,80E+01	4,19E-02	
9,00E-03	-1,60E+01	-6,80E-01	-2,41E-01	1,09E+01	5,62E-02	
9,50E-03	-8,80E+00	-6,60E-01	-2,48E-01	5,81E+00	6,04E-02	
1,00E-02	-1,60E+00	-6,40E-01	-2,50E-01	1,02E+00	6,20E-02	
1,10E-02	9,60E+00	-5,40E-01	-2,46E-01	-5,18E+00	5,95E-02	
1,20E-02	2,00E+01	-3,40E-01	-2,31E-01	-6,80E+00	5,31E-02	
1,30E-02	3,04E+01	-1,20E-01	-2,05E-01	-3,65E+00	4,74E-02	
1,40E-02	3,/6E+01	1,40E-01	-1,/1E-01	5,26E+00	4,/6E-02	
1,50E-02	4,16E+01	3,20E-01	-1,32E-01	1,33E+01	5,65E-02	
1,60E-02	4,00E+01	4,80E-01	-8,99E-02	1,92E+01	7,34E-02	
1,70E-02	3,44E+01	6,20E-01	-5,25E-02	2,13E+01	9,36E-02	

Tableau III.22 : Mesures et calculs pour V1=10V

<u>Chapitı</u>	re III		Etude expérimentale des perte				
t(s)	V20(t)	Vrh(t)	$\int V20(t)dt$	V20(t)*Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t)dt$	Pfer(w)	
0,00E+00	4,00E+00	9,20E-01	0,00E+00	3,68E+00	0,00E+00	9,40E-01	
1,00E-05	4,00E+00	9,20E-01	4,00E-05	3,68E+00	3,68E-05	_	
2,00E-05	4,00E+00	9,20E-01	8,00E-05	3,68E+00	7,36E-05		
3,00E-05	3,20E+00	9,20E-01	1,16E-04	2,94E+00	1,07E-04		
4,00E-05	3,20E+00	9,20E-01	1,48E-04	2,94E+00	1,36E-04		
5,00E-05	3,20E+00	9,20E-01	1,80E-04	2,94E+00	1,66E-04		
6,00E-05	2,40E+00	9,20E-01	2,08E-04	2,21E+00	1,91E-04		
7,00E-05	2,40E+00	9,20E-01	2,32E-04	2,21E+00	2,13E-04		
8,00E-05	2,40E+00	9,20E-01	2,56E-04	2,21E+00	2,36E-04		
9,00E-05	2,40E+00	9,00E-01	2,80E-04	2,16E+00	2,57E-04		
1,00E-04	2,40E+00	9,00E-01	3,04E-04	2,16E+00	2,79E-04		
1,50E-04	8,00E-01	9,00E-01	3,84E-04	7,20E-01	3,51E-04		
2,00E-04	0,00E+00	9,00E-01	4,12E-04	0,00E+00	3,76E-04		
2,50E-04	-8,00E-01	9,00E-01	3,92E-04	-7,20E-01	3,58E-04		
3,00E-04	-1,60E+00	8,80E-01	3,32E-04	-1,41E+00	3,05E-04		
3,50E-04	-2,40E+00	8,80E-01	2,24E-04	-2,11E+00	2,10E-04		
4,00E-04	-3,20E+00	8,60E-01	7,60E-05	-2,75E+00	8,13E-05		
5,00E-04	-4,80E+00	8,40E-01	-3,64E-04	-4,03E+00	-2,96E-04		
5,50E-04	-6,40E+00	8,40E-01	-6,52E-04	-5,38E+00	-5,40E-04		
6,00E-04	-7,20E+00	8,40E-01	-9,84E-04	-6,05E+00	-8,19E-04		
7,00E-04	-8,80E+00	8,20E-01	-1,78E-03	-7,22E+00	-1,47E-03		
8,00E-04	-1,04E+01	8,00E-01	-2,72E-03	-8,32E+00	-2,23E-03		
9,00E-04	-1,20E+01	7,60E-01	-3,82E-03	-9,12E+00	-3,09E-03		
9,50E-04	-1,28E+01	7,60E-01	-4,43E-03	-9,73E+00	-3,55E-03		
1,00E-03	-1,36E+01	7,40E-01	-5,08E-03	-1,01E+01	-4,04E-03		
1,50E-03	-2,16E+01	6,20E-01	-1,38E-02	-1,34E+01	-9,98E-03		
2,00E-03	-2,96E+01	4,80E-01	-2,65E-02	-1,42E+01	-1,70E-02		
3,00E-03	-4,32E+01	1,80E-01	-6,32E-02	-7,78E+00	-2,86E-02		
3,50E-03	-4,96E+01	2,00E-02	-8,65E-02	-9,92E-01	-3,08E-02		
4,00E-03	-5,44E+01	-1,40E-01	-1,13E-01	7,62E+00	-2,93E-02		
5,00E-03	-6,08E+01	-4,00E-01	-1,71E-01	2,43E+01	-1,41E-02		
5,50E-03	-6,16E+01	-5,00E-01	-2,01E-01	3,08E+01	-3,10E-04		
6,00E-03	-5,84E+01	-6,00E-01	-2,31E-01	3,50E+01	1,62E-02		
7,00E-03	-4,96E+01	-7,20E-01	-2,85E-01	3,57E+01	5,25E-02		
7,50E-03	-4,48E+01	-7,80E-01	-3,09E-01	3,49E+01	7,06E-02		
8,00E-03	-4,08E+01	-8,60E-01	-3,31E-01	3,51E+01	8,81E-02		
9,00E-03	-2,56E+01	-9,00E-01	-3,64E-01	2,30E+01	1,18E-01		
9,50E-03	-1,52E+01	-8,80E-01	-3,75E-01	1,34E+01	1,27E-01		
1,00E-02	-4,00E+00	-8,60E-01	-3,79E-01	3,44E+00	1,31E-01		
1,10E-02	1,28E+01	-7,20E-01	-3,75E-01	-9,22E+00	1,28E-01	_	
1,20E-02	2,88E+01	-4,60E-01	-3,54E-01	-1,32E+01	1,16E-01	_	
1,30E-02	4,32E+01	-1,40E-01	-3,18E-01	-6,05E+00	1,05E-01	_	
1,40E-02	5,44E+01	1,60E-01	-2,69E-01	8,70E+00	1,06E-01	_	
1,50E-02	6,16E+01	4,20E-01	-2,11E-01	2,59E+01	1,23E-01	_	
1,60E-02	5,92E+01	6,20E-01	-1,49E-01	3,67E+01	1,56E-01	_	
1,70E-02	5,04E+01	7,80E-01	-9,38E-02	3,93E+01	1,96E-01	_	
1,80E-02	4,16E+01	9,00E-01	-4,75E-02	3,74E+01	2,34E-01		

Tableau III.23 : Mesures et calculs pour V1=15V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	∫ V20(t)dt	V20(t)*Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t)dt$	Pfer(w)
0,00E+00	5,60E+00	1,04E+00	0,00E+00	5,82E+00	0,00E+00	1,25E+00
1,00E-05	4,80E+00	1,04E+00	5,20E-05	4,99E+00	5,41E-05	
2,00E-05	4,80E+00	1,04E+00	1,00E-04	4,99E+00	1,04E-04	
3,00E-05	4,00E+00	1,02E+00	1,44E-04	4,08E+00	1,49E-04	
4,00E-05	4,00E+00	1,04E+00	1,84E-04	4,16E+00	1,91E-04	
5,00E-05	4,00E+00	1,04E+00	2,24E-04	4,16E+00	2,32E-04	
6,00E-05	4,00E+00	1,04E+00	2,64E-04	4,16E+00	2,74E-04	
7,00E-05	3,20E+00	1,00E+00	3,00E-04	3,20E+00	3,11E-04	
8,00E-05	3,20E+00	1,02E+00	3,32E-04	3,26E+00	3,43E-04	
9,00E-05	3,20E+00	1,02E+00	3,64E-04	3,26E+00	3,76E-04	
1,00E-04	2,40E+00	1,02E+00	3,92E-04	2,45E+00	4,04E-04	
1,50E-04	1,60E+00	1,02E+00	4,92E-04	1,63E+00	5,06E-04	
2,00E-04	0,00E+00	1,00E+00	5,40E-04	0,00E+00	5,55E-04	
3,00E-04	-2,40E+00	9,80E-01	4,64E-04	-2,35E+00	4,80E-04	
3,50E-04	-3,20E+00	9,80E-01	3,40E-04	-3,14E+00	3,57E-04	
4,00E-04	-4,00E+00	9,80E-01	1,60E-04	-3,92E+00	1,81E-04	
5,00E-04	-6,40E+00	9,40E-01	-3,48E-04	-6,02E+00	-3,10E-04	
5,50E-04	-7,20E+00	9,60E-01	-6,80E-04	-6,91E+00	-6,26E-04	
6,00E-04	-8,00E+00	9,40E-01	-1,06E-03	-7,52E+00	-9,82E-04	
7,00E-04	-1,04E+01	9,20E-01	-1,97E-03	-9,57E+00	-1,83E-03	
7,50E-04	-1,12E+01	8,80E-01	-2,50E-03	-9,86E+00	-2,31E-03	
8,00E-04	-1,20E+01	8,80E-01	-3,08E-03	-1,06E+01	-2,83E-03	
9,00E-04	-1,36E+01	8,80E-01	-4,36E-03	-1,20E+01	-3,95E-03	
9,50E-04	-1,44E+01	8,60E-01	-5,07E-03	-1,24E+01	-4,56E-03	
1,00E-03	-1,60E+01	8,40E-01	-5,83E-03	-1,34E+01	-5,20E-03	
1,50E-03	-2,48E+01	6,80E-01	-1,60E-02	-1,69E+01	-1,30E-02	
2,00E-03	-3,44E+01	5,20E-01	-3,10E-02	-1,79E+01	-2,21E-02	
3,00E-03	-5,12E+01	1,80E-01	-7,39E-02	-9,22E+00	-3,69E-02	
3,50E-03	-5,76E+01	0,00E+00	-1,01E-01	0,00E+00	-3,93E-02	
4,00E-03	-6,32E+01	-1,60E-01	-1,32E-01	1,01E+01	-3,71E-02	
5,00E-03	-7,20E+01	-4,80E-01	-2,00E-01	3,46E+01	-1,63E-02	
5,50E-03	-7,20E+01	-6,00E-01	-2,35E-01	4,32E+01	2,12E-03	
6,00E-03	-6,88E+01	-6,80E-01	-2,71E-01	4,68E+01	2,43E-02	
7,00E-03	-5,84E+01	-8,40E-01	-3,35E-01	4,91E+01	7,29E-02	
7,50E-03	-5,28E+01	-9,00E-01	-3,62E-01	4,75E+01	9,69E-02	
8,00E-03	-4,80E+01	-9,20E-01	-3,88E-01	4,42E+01	1,20E-01	
9,00E-03	-3,04E+01	-1,04E+00	-4,27E-01	3,16E+01	1,60E-01	
9,50E-03	-1,76E+01	-1,00E+00	-4,39E-01	1,76E+01	1,72E-01	
1,00E-02	-4,80E+00	-9,80E-01	-4,45E-01	4,70E+00	1,78E-01	
1,10E-02	1,52E+01	-8,20E-01	-4,40E-01	-1,25E+01	1,74E-01	
1,20E-02	3,36E+01	-5,20E-01	-4,16E-01	-1,75E+01	1,58E-01	
1,30E-02	5,04E+01	-1,60E-01	-3,74E-01	-8,06E+00	1,45E-01	
1,40E-02	6,32E+01	1,80E-01	-3,16E-01	1,14E+01	1,46E-01	
1,50E-02	7,20E+01	4,80E-01	-2,48E-01	3,46E+01	1,68E-01	
1,60E-02	6,96E+01	7,00E-01	-1,76E-01	4,87E+01	2,11E-01	]

Tableau III.25 : Mesures et calculs pour V1=17,5 V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	$\int V20(t)dt$	V20(t)*Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t)dt$	Pfer(w)
0,00E+00	4,00E+00	1,12E+00	0,00E+00	4,48E+00	0,00E+00	1,32E+00
1,00E-05	4,00E+00	1,10E+00	4,00E-05	4,40E+00	4,44E-05	
2,00E-05	4,00E+00	1,12E+00	8,00E-05	4,48E+00	8,88E-05	
3,00E-05	2,00E+00	1,12E+00	1,10E-04	2,24E+00	1,22E-04	
4,00E-05	2,00E+00	1,10E+00	1,30E-04	2,20E+00	1,45E-04	
5,00E-05	2,00E+00	1,12E+00	1,50E-04	2,24E+00	1,67E-04	
6,00E-05	4,00E+00	1,10E+00	1,80E-04	4,40E+00	2,00E-04	
7,00E-05	2,00E+00	1,12E+00	2,10E-04	2,24E+00	2,33E-04	
8,00E-05	2,00E+00	1,12E+00	2,30E-04	2,24E+00	2,56E-04	
9,00E-05	2,00E+00	1,10E+00	2,50E-04	2,20E+00	2,78E-04	
1,00E-04	2,00E+00	1,10E+00	2,70E-04	2,20E+00	3,00E-04	
1,50E-04	0,00E+00	1,10E+00	3,20E-04	0,00E+00	3,55E-04	
2,00E-04	0,00E+00	1,10E+00	3,20E-04	0,00E+00	3,55E-04	
3,00E-04	-4,00E+00	1,06E+00	1,00E-04	-4,24E+00	1,18E-04	
3,50E-04	-4,00E+00	1,04E+00	-1,00E-04	-4,16E+00	-9,40E-05	
4,00E-04	-6,00E+00	1,04E+00	-3,90E-04	-6,24E+00	-3,99E-04	
5,00E-04	-8,00E+00	1,02E+00	-1,04E-03	-8,16E+00	-1,07E-03	
5,50E-04	-1,00E+01	1,02E+00	-1,45E-03	-1,02E+01	-1,49E-03	
6,00E-04	-1,00E+01	1,00E+00	-1,95E-03	-1,00E+01	-1,99E-03	
7,00E-04	-1,20E+01	1,00E+00	-3,08E-03	-1,20E+01	-3,12E-03	
7,50E-04	-1,40E+01	9,60E-01	-3,73E-03	-1,34E+01	-3,75E-03	
8,00E-04	-1,40E+01	9,40E-01	-4,43E-03	-1,32E+01	-4,42E-03	
9,00E-04	-1,60E+01	9,20E-01	-5,98E-03	-1,47E+01	-5,86E-03	
9,50E-04	-1,80E+01	9,20E-01	-6,83E-03	-1,66E+01	-6,64E-03	
1,00E-03	-2,00E+01	9,00E-01	-7,74E-03	-1,80E+01	-7,46E-03	
1,50E-03	-3,00E+01	7,40E-01	-1,98E-02	-2,22E+01	-1,72E-02	
2,00E-03	-4,00E+01	5,60E-01	-3,70E-02	-2,24E+01	-2,84E-02	
3,00E-03	-5,80E+01	2,00E-01	-8,63E-02	-1,16E+01	-4,67E-02	
3,50E-03	-6,60E+01	0,00E+00	-1,17E-01	0,00E+00	-5,01E-02	
4,00E-03	-7,20E+01	-1,20E-01	-1,52E-01	8,64E+00	-4,81E-02	
5,00E-03	-8,00E+01	-4,40E-01	-2,28E-01	3,52E+01	-2,57E-02	
5,50E-03	-7,80E+01	-5,60E-01	-2,68E-01	4,37E+01	-5,64E-03	
6,00E-03	-7,40E+01	-6,80E-01	-3,06E-01	5,03E+01	1,83E-02	
7,00E-03	-6,20E+01	-8,40E-01	-3,74E-01	5,21E+01	7,05E-02	
7,50E-03	-5,60E+01	-9,60E-01	-4,04E-01	5,38E+01	9,70E-02	
8,00E-03	-5,00E+01	-1,00E+00	-4,30E-01	5,00E+01	1,23E-01	
9,00E-03	-2,80E+01	-1,08E+00	-4,70E-01	3,02E+01	1,65E-01	
9,50E-03	-1,20E+01	-1,10E+00	-4,80E-01	1,32E+01	1,76E-01	
1,00E-02	2,00E+00	-1,06E+00	-4,83E-01	-2,12E+00	1,79E-01	
1,10E-02	2,20E+01	-8,60E-01	-4,71E-01	-1,89E+01	1,68E-01	
1,20E-02	4,40E+01	-5,40E-01	-4,37E-01	-2,38E+01	1,44E-01	
1,30E-02	6,40E+01	-1,80E-01	-3,84E-01	-1,15E+01	1,25E-01	
1,40E-02	7,60E+01	1,60E-01	-3,13E-01	1,22E+01	1,25E-01	]
1,50E-02	8,60E+01	4,60E-01	-2,32E-01	3,96E+01	1,51E-01	
1,60E-02	8,20E+01	7,20E-01	-1,47E-01	5,90E+01	2,01E-01	
1,70E-02	6,80E+01	9,00E-01	-7,23E-02	6,12E+01	2,61E-01	
1,80E-02	5,60E+01	1,04E+00	-9,76E-03	5,82E+01	3,21E-01	

Tableau III.25 : Mesures et calculs pour V1=20V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	$\int V20(t) dt$	V20(t)*Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t)dt$	Pfer(w)
0,00E+00	6,00E+00	1,24E+00	0,00E+00	7,44E+00	0,00E+00	1,57E+00
1,00E-05	6,00E+00	1,24E+00	6,00E-05	7,44E+00	7,44E-05	
2,00E-05	6,00E+00	1,24E+00	1,20E-04	7,44E+00	1,49E-04	
3,00E-05	6,00E+00	1,24E+00	1,80E-04	7,44E+00	2,23E-04	
4,00E-05	6,00E+00	1,24E+00	2,40E-04	7,44E+00	2,98E-04	
5,00E-05	6,00E+00	1,24E+00	3,00E-04	7,44E+00	3,72E-04	
6,00E-05	6,00E+00	1,24E+00	3,60E-04	7,44E+00	4,46E-04	
7,00E-05	6,00E+00	1,24E+00	4,20E-04	7,44E+00	5,21E-04	
8,00E-05	4,00E+00	1,22E+00	4,70E-04	4,88E+00	5,82E-04	
9,00E-05	4,00E+00	1,24E+00	5,10E-04	4,96E+00	6,32E-04	
1,00E-04	4,00E+00	1,22E+00	5,50E-04	4,88E+00	6,81E-04	
1,50E-04	2,00E+00	1,22E+00	7,40E-04	2,44E+00	9,13E-04	
2,00E-04	2,00E+00	1,20E+00	8,40E-04	2,40E+00	1,03E-03	
3,00E-04	-2,00E+00	1,20E+00	8,00E-04	-2,40E+00	9,86E-04	
3,50E-04	-2,00E+00	1,20E+00	7,00E-04	-2,40E+00	8,67E-04	
4,00E-04	-4,00E+00	1,18E+00	5,30E-04	-4,72E+00	6,65E-04	
5,00E-04	-6,00E+00	1,16E+00	-2,00E-05	-6,96E+00	2,60E-05	
5,50E-04	-8,00E+00	1,14E+00	-4,10E-04	-9,12E+00	-4,21E-04	
6,00E-04	-8,00E+00	1,12E+00	-8,30E-04	-8,96E+00	-8,99E-04	
7,00E-04	-1,20E+01	1,08E+00	-1,91E-03	-1,30E+01	-2,10E-03	
7,50E-04	-1,40E+01	1,10E+00	-2,52E-03	-1,54E+01	-2,77E-03	
8,00E-04	-1,40E+01	1,08E+00	-3,22E-03	-1,51E+01	-3,53E-03	
9,00E-04	-1,60E+01	1,06E+00	-4,79E-03	-1,70E+01	-5,19E-03	
9,50E-04	-1,80E+01	1,04E+00	-5,64E-03	-1,87E+01	-6,08E-03	
1,00E-03	-1,80E+01	1,00E+00	-6,54E-03	-1,80E+01	-7,00E-03	
1,50E-03	-3,00E+01	8,40E-01	-1,90E-02	-2,52E+01	-1,85E-02	
2,00E-03	-4,20E+01	6,60E-01	-3,75E-02	-2,77E+01	-3,24E-02	
3,00E-03	-6,40E+01	2,60E-01	-9,13E-02	-1,66E+01	-5,61E-02	
3,50E-03	-7,20E+01	6,00E-02	-1,26E-01	-4,32E+00	-6,15E-02	
4,00E-03	-8,00E+01	-1,20E-01	-1,64E-01	9,60E+00	-6,03E-02	
5,00E-03	-9,00E+01	-4,80E-01	-2,49E-01	4,32E+01	-3,57E-02	
5,50E-03	-9,00E+01	-5,80E-01	-2,94E-01	5,22E+01	-1,22E-02	
6,00E-03	-8,40E+01	-7,20E-01	-3,38E-01	6,05E+01	1,65E-02	
7,00E-03	-7,20E+01	-9,20E-01	-4,16E-01	6,62E+01	8,11E-02	
7,50E-03	-6,40E+01	-1,02E+00	-4,50E-01	6,53E+01	1,14E-01	
8,00E-03	-5,80E+01	-1,08E+00	-4,81E-01	6,26E+01	1,46E-01	
9,00E-03	-3,40E+01	-1,22E+00	-5,28E-01	4,15E+01	2,00E-01	
9,50E-03	-1,80E+01	-1,20E+00	-5,41E-01	2,16E+01	2,16E-01	
1,00E-02	-2,00E+00	-1,20E+00	-5,46E-01	2,40E+00	2,22E-01	
1,10E-02	2,20E+01	-1,00E+00	-5,36E-01	-2,20E+01	2,11E-01	
1,20E-02	4,80E+01	-6,40E-01	-5,00E-01	-3,07E+01	1,83E-01	
1,30E-02	6,80E+01	-2,40E-01	-4,42E-01	-1,63E+01	1,58E-01	
1,40E-02	8,60E+01	1,20E-01	-3,65E-01	1,03E+01	1,55E-01	
1,50E-02	9,60E+01	4,80E-01	-2,75E-01	4,61E+01	1,83E-01	
1,60E-02	9,20E+01	7,60E-01	-1,79E-01	6,99E+01	2,42E-01	

Tableau III.26 : Mesures et calculs pour V1=22,5V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	$\int V20(t)dt$	V20(t)*Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t)dt$	Pfer(w)
0,00E+00	8,00E+00	1,36E+00	0,00E+00	1,09E+01	0,00E+00	1,89E+00
1,00E-05	8,00E+00	1,34E+00	8,00E-05	1,07E+01	1,08E-04	
2,00E-05	8,00E+00	1,34E+00	1,60E-04	1,07E+01	2,15E-04	
3,00E-05	6,00E+00	1,36E+00	2,30E-04	8,16E+00	3,10E-04	
4,00E-05	6,00E+00	1,34E+00	2,90E-04	8,04E+00	3,91E-04	
5,00E-05	6,00E+00	1,34E+00	3,50E-04	8,04E+00	4,71E-04	
6,00E-05	6,00E+00	1,34E+00	4,10E-04	8,04E+00	5,51E-04	
7,00E-05	6,00E+00	1,34E+00	4,70E-04	8,04E+00	6,32E-04	
8,00E-05	6,00E+00	1,34E+00	5,30E-04	8,04E+00	7,12E-04	
9,00E-05	4,00E+00	1,36E+00	5,80E-04	5,44E+00	7,80E-04	
1,00E-04	4,00E+00	1,36E+00	6,20E-04	5,44E+00	8,34E-04	
1,50E-04	4,00E+00	1,34E+00	8,20E-04	5,36E+00	1,10E-03	
2,00E-04	2,00E+00	1,32E+00	9,50E-04	2,64E+00	1,27E-03	
3,00E-04	-2,00E+00	1,30E+00	9,70E-04	-2,60E+00	1,30E-03	
3,50E-04	-2,00E+00	1,30E+00	8,70E-04	-2,60E+00	1,17E-03	
4,00E-04	-6,00E+00	1,28E+00	6,70E-04	-7,68E+00	9,14E-04	_
5,00E-04	-8,00E+00	1,28E+00	6,00E-05	-1,02E+01	1,34E-04	_
5,50E-04	-8,00E+00	1,26E+00	-3,40E-04	-1,01E+01	-3,71E-04	
6,00E-04	-1,00E+01	1,24E+00	-8,30E-04	-1,24E+01	-9,81E-04	
7,00E-04	-1,20E+01	1,22E+00	-1,96E-03	-1,46E+01	-2,37E-03	
7,50E-04	-1,40E+01	1,20E+00	-2,65E-03	-1,68E+01	-3,20E-03	
8,00E-04	-1,60E+01	1,18E+00	-3,40E-03	-1,89E+01	-4,09E-03	_
9,00E-04	-1,80E+01	1,16E+00	-5,11E-03	-2,09E+01	-6,08E-03	_
9,50E-04	-2,00E+01	1,14E+00	-6,06E-03	-2,28E+01	-7,16E-03	_
1,00E-03	-2,00E+01	1,12E+00	-7,06E-03	-2,24E+01	-8,29E-03	_
1,50E-03	-3,40E+01	9,40E-01	-2,08E-02	-3,20E+01	-2,22E-02	_
2,00E-03	-4,60E+01	7,20E-01	-4,14E-02	-3,31E+01	-3,91E-02	_
3,00E-03	-7,20E+01	3,00E-01	-1,01E-01	-2,16E+01	-6,81E-02	_
3,50E-03	-8,20E+01	6,00E-02	-1,39E-01	-4,92E+00	-7,48E-02	_
4,00E-03	-8,80E+01	-1,00E-01	-1,82E-01	8,80E+00	-7,38E-02	_
5,00E-03	-1,00E+02	-4,80E-01	-2,77E-01	4,80E+01	-4,49E-02	_
5,50E-03	-1,00E+02	-6,60E-01	-3,27E-01	6,60E+01	-1,72E-02	_
6,00E-03	-9,40E+01	-7,80E-01	-3,76E-01	7,33E+01	1,74E-02	_
7,00E-03	-8,00E+01	-1,00E+00	-4,64E-01	8,00E+01	9,53E-02	_
7,50E-03	-7,20E+01	-1,10E+00	-5,02E-01	7,92E+01	1,35E-01	_
8,00E-03	-6,40E+01	-1,16E+00	-5,36E-01	7,42E+01	1,74E-01	_
9,00E-03	-4,00E+01	-1,32E+00	-5,89E-01	5,28E+01	2,41E-01	_
9,50E-03	-2,00E+01	-1,36E+00	-6,04E-01	2,72E+01	2,61E-01	
1,00E-02	-4,00E+00	-1,30E+00	-6,10E-01	5,20E+00	2,69E-01	
1,10E-02	2,60E+01	-1,10E+00	-5,99E-01	-2,86E+01	2,56E-01	
1,20E-02	5,20E+01	-7,00E-01	-5,61E-01	-3,64E+01	2,22E-01	-
1,30E-02	7,60E+01	-2,80E-01	-4,97E-01	-2,13E+01	1,92E-01	-
1,40E-02	9,40E+01	1,20E-01	-4,12E-01	1,13E+01	1,88E-01	-
1,50E-02	1,06E+02	4,80E-01	-3,12E-01	5,09E+01	2,20E-01	4
1,60E-02	1,02E+02	8,00E-01	-2,06E-01	8,16E+01	2,89E-01	

Tableau III.28 : Mesures et calculs pour V1=25V

t(s)	V20(t)	Vrh(t)	$\int V20(t)dt$	V20(t)*Vrh(t)	$\int V20(t) * Vrh(t)dt$	Pfer(w)
0,00E+00	8,00E+00	1,50E+00	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00	2,34E+00
1,00E-05	8,00E+00	1,50E+00	8,00E-05	1,20E+01	1,20E-04	,
2.00E-05	8.00E+00	1.48E+00	1.60E-04	1.18E+01	2.39E-04	-
3.00E-05	8.00E+00	1.50E+00	2.40E-04	1.20E+01	3.58E-04	-
4.00E-05	6.00E+00	1.50E+00	3.10E-04	9.00E+00	4.63E-04	-
5.00F-05	6.00F+00	1.50F+00	3.70F-04	9.00F+00	5.53E-04	-
6.00F-05	6.00F+00	1.50F+00	4.30F-04	9.00F+00	6.43F-04	-
7.00E-05	6.00E+00	1.46E+00	4.90E-04	8.76E+00	7.32E-04	-
8.00E-05	6.00E+00	1.50E+00	5.50E-04	9.00E+00	8.21E-04	-
9.00E-05	6.00E+00	1.50E+00	6.10E-04	9.00E+00	9.11E-04	-
1.00F-04	6.00F+00	1.48F+00	6.70F-04	8,88F+00	1.00F-03	-
1,50E-04	4.00F+00	1,48F+00	8,80F-04	5,92E+00	1.31E-03	-
2 00F-04	2 00F+00	1 48F+00	1 01F-03	2 96E+00	1 51E-03	_
3 00E-04	-2.00E+00	1,10E+00	9 90F-04	-2 92F+00	1 /18F-03	-
3,00E-04	-2,00E+00	1,402100	9,50L-04	-2,52L+00	1,40L-03	-
3,30L-04	-4,00L+00	1,402+00	6 EOE 04	-3,84L+00	0.865.04	
4,00E-04	-0,00E+00	1,44E+00		-6,04E+00	9,00E-04	-
5,00E-04	-8,00E+00	1,38E+00	-4,00E-05	-1,10E+01	8,40E-06	-
5,50E-04	-1,00E+01	1,38E+00	-5,30E-04	-1,38E+01	-6,82E-04	
6,00E-04	-1,20E+01	1,38E+00	-1,08E-03	-1,66E+01	-1,44E-03	
7,00E-04	-1,60E+01	1,34E+00	-2,42E-03	-2,14E+01	-3,27E-03	-
7,50E-04	-1,60E+01	1,32E+00	-3,22E-03	-2,11E+01	-4,33E-03	-
8,00E-04	-1,80E+01	1,30E+00	-4,09E-03	-2,34E+01	-5,48E-03	-
9,00E-04	-2,20E+01	1,28E+00	-6,05E-03	-2,82E+01	-8,01E-03	-
9,50E-04	-2,20E+01	1,26E+00	-7,15E-03	-2,77E+01	-9,40E-03	_
1,00E-03	-2,40E+01	1,24E+00	-8,32E-03	-2,98E+01	-1,09E-02	
1,50E-03	-4,00E+01	1,02E+00	-2,41E-02	-4,08E+01	-2,86E-02	
2,00E-03	-5,40E+01	8,00E-01	-4,75E-02	-4,32E+01	-4,98E-02	
3,00E-03	-8,00E+01	3,20E-01	-1,15E-01	-2,56E+01	-8,63E-02	_
3,50E-03	-9,20E+01	1,00E-01	-1,59E-01	-9,20E+00	-9,48E-02	_
4,00E-03	-1,02E+02	-1,40E-01	-2,07E-01	1,43E+01	-9,38E-02	
5,00E-03	-1,14E+02	-5,20E-01	-3,15E-01	5,93E+01	-5,84E-02	
5,50E-03	-1,14E+02	-6,60E-01	-3,72E-01	7,52E+01	-2,40E-02	
6,00E-03	-1,08E+02	-8,60E-01	-4,27E-01	9,29E+01	1,88E-02	
7,00E-03	-9,00E+01	-1,12E+00	-5,27E-01	1,01E+02	1,16E-01	
7,50E-03	-8,20E+01	-1,20E+00	-5,70E-01	9,84E+01	1,66E-01	
8,00E-03	-7,20E+01	-1,32E+00	-6,08E-01	9,50E+01	2,14E-01	
9,00E-03	-4,40E+01	-1,46E+00	-6,68E-01	6,42E+01	2,99E-01	
9,50E-03	-2,40E+01	-1,50E+00	-6,86E-01	3,60E+01	3,24E-01	
1,00E-02	-4,00E+00	-1,46E+00	-6,93E-01	5,84E+00	3,35E-01	
1,10E-02	2,80E+01	-1,20E+00	-6,81E-01	-3,36E+01	3,19E-01	
1,20E-02	5,80E+01	-7,80E-01	-6,38E-01	-4,52E+01	2,77E-01	1
1,30E-02	8,60E+01	-3,00E-01	-5,66E-01	-2,58E+01	2,39E-01	1
1.40E-02	1.06E+02	1.40E-01	-4.71E-01	1.48E+01	2.33E-01	1
1.50F-02	1.20F+02	5.40F-01	-3.58F-01	6.48F+01	2.71F-01	-
1.60F-02	1.16F+02	8.60F-01	-2.39F-01	9,98F+01	3.55F-01	1
1,000 02	1,100.02	0,000 01	2,350 01	5,500.01	5,552 01	J

Tableau III.28 : Mesures et calculs pour V1=28V
Les résultats des pertes fer évaluées sont consignées dans les tableaux III.29 pour le transformateur PHYWE.

$V_l(V)$	10	15	17,5	20	22,5	25	28
$V_1^2(V^2)$	100	225	306,25	400	506,25	625	784
Pfer(W)	0,452	0,94	1,25	1,32	1,57	1,89	2,34

#### Tableau III.29 : Résultats des pertes fer

Les courbes des pertes fer en fonction de la tension d'alimentation et en fonction du carré de la tension d'alimentation sont représentées sur les figures III.11 et III.12.



Fig. III.11 : Evolution des pertes fer en fonction de la tension d'alimentation (Transformateur PHYWE)



Fig. III.12 : Evolution des pertes fer en fonction du carré de la tension d'alimentation (Transformateur PHYWE)

### III.4.2.4. Interprétations des résultats

L'observation des figures III.8, III.10 et III.12 montrent que les courbes  $Pfer(V_1^2)$  sont pratiquement des droites. Nous pouvons dire que les pertes fer évoluent proportionnellement au carré de la valeur efficace de la tension d'alimentation  $V_I$  des transformateurs étudiés. En effet, les courbes  $Pfer(V_1)$  illustrées sur les figures III.7, III.9 et III.11 ont bien une allure parabolique.

Or en négligeant les chutes de tensions à vide ohmiques et inductives primaires (fig. III.6), la tension d'alimentation  $V_I$  est proportionnelle à l'amplitude de l'induction  $B_m$  dans le circuit magnétique des transformateurs (formule de Boucherot). Donc, comme nous l'avons étudié théoriquement, les pertes magnétiques sont proportionnelles à  $B_m^2$ , ce qui est pratiquement vérifié pour les tôles de fer silicium à grains orientés étudiées (les circuits magnétiques des transformateurs sont formés par un assemblage de tôles de FeSi à grains orientés d'épaisseur 0,3 à 0.35 mm).

La comparaison des tôles utilisées dans les trois transformateurs nécessitent la connaissance de la qualité de celles-ci. Or la qualité des tôles est définie, pour une induction maximale  $B_m = 1,0$  T, par le rapport des pertes correspondante par le poids de ces tôles. De même la connaissance de l'amplitude de l'induction  $B_m$  nécessite la connaissance du nombre de spires secondaires  $N_2$  et de la section droite S des tôles. Nous pouvons dire que les tôles sont de bonne qualité si elles présentent des pertes inférieures à 1.0 W/kg pour une induction maximale  $B_m = 1,0$  T.

Au vue des résultats obtenus, le transformateur Delorenzo semble avoir un circuit magnétique constitué de tôles sensiblement de meilleure qualité que celles qui composent celui du transformateur Anonyme. Ces deux transformateurs possèdent des poids de même ordre de grandeur environ, mais le transformateur Delorenzo présente des pertes légèrement inférieures à celles du transformateur anonyme. Quant au transformateur PHYWE, les essais ont été réalisés pour des états magnétiques situés loin de la saturation.



# Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons caractérisé les tôles fer silicium qui équipent les circuits magnétiques de transformateurs monophasés.

Pour accomplir cette tache, nous avons døabord effectué une recherche bibliographique nous permettant la compréhension des notions physiques de base du magnétisme à différentes échelles, et du comportement des matériaux ferromagnétiques. Nous avons ensuite effectué des essais expérimentaux sur les circuits magnétiques de transformateurs monophasés didactiques fonctionnant à vide, alimentés par des tensions primaires variables. Nous avons relevé les signaux nécessaires à la caractérisation des tôles de ces transformateurs. Ces signaux étant celui de la tension  $V_{Rh}(t)$  aux bornes døune résistance parcourue par le courant primaire qui représente le champ H(t), et le signal de la tension secondaire  $V_{20}(t)$  qui est proportionnelle à la dérivée par rapport au temps de løinduction B(t). Nous avons exploité ces mesures pour le calcul des pertes fer en se servant du logiciel Microsoft Excel.

Léétude expérimentales nous a permis de constater que les allures des tensions  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  sont proches de celle de la tension  $V_I$  délivrée par la source déalimentation pour des valeurs de cette tension faibles devant les valeurs nominales des tensions primaires des transformateurs essayés, ce qui correspond à la partie linéaire de la courbe de magnétisation B(H) des tôles des circuits magnétiques. En revanche les tensions  $V_{Rh}(t)$  et  $V_{20}(t)$  sont déautant déformées que léon séapproche de la saturation de ces tôles (tension  $V_I$  voisine de la tension nominale des transformateurs essayés).

Løétude expérimentale nous a également révélé que la variation des pertes magnétiques dans les tôles de fer silicium, en fonction de la tension

døalimentation, suit une allure parabolique, ce qui est en accord avec la théorie. Cependant nous nøavons pas pu déterminer la qualité des tôles utilisées dans les circuits magnétiques des transformateurs étudiés pour des raisons que nous ignorons les caractéristiques des enroulements de ces derniers ainsi que les données géométriques de leurs circuits magnétiques. Il serait donc intéressant de compléter ce travail par une étude døidentification des paramètres électriques et géométriques de transformateurs.

Nous souhaitons que ce modeste travail puisse apporter intérêt à tous ceux qui auront à le consulter.



# BIBLIOGRAPHIE

#### [1] P.Brissonneau,

« Magnétisme et matériaux magnétiques pour løélectrotechnique », Edition Hermès, Paris, 1997.

#### [2] S. Chikazumy,

« Physique of magnetism », John Wiley and Sons, New York 1964.

#### [3] P. Robert,

« Matériaux de løélectrotechnique », Traité døélectricité, Edition Dunod, Paris, 1979.

#### [4] J.E. Thomson

« The magnetic properties of materials » ; Edition Newnes Books, New York, 1968.

### [5] R.H.Pry and C.P.Bean,

« Calulation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model »,

J. Appl. Phys. vol.29, N°:3, pp532-533, 1958.

### [6] G. Bertotti,

«General proprieties of power losses in soft ferromagnetic materials » IEE Tans. on magn., vol .24, N°:1, pp621-630,1988.

#### [7] J.B.Barth, M.N.E.F

« Alternating electromagnetic field, eddy current and power loss in solid iron », PROC.IEE.VOL.120,N°11, N° 11, Novembre 1973.

#### [8] J. Baranger,

« Introduction à løanalyse numérique », Edition Hermann, Paris, 1997.