



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Réseaux électrique

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme:**

**MASTER**

***Thème***

**Etude des transformateurs sous fréquences  
élevées**

**Présenté par :**  
**Bouharkat Mekki**  
**Soutenu le : 05 Juin 2017**

**Devant le jury composé de :**

**Mr. Rouina Abd Elhafid**

**MCA**

**Président**

**Mme. Khelili Fatiha**

**MAA**

**Encadreur**

**Mr. Mimoune Souri Mohamed**

**Pr.**

**Co-Encadreur**

**Mme. Ben yahia Naima**

**MAA**

**Examineur**

**Année universitaire: 2016 / 2017**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Electrotechnique

Option : Réseaux électrique

**Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:**

**MASTER**

***Thème***

**Etude des transformateurs sous fréquences élevées**

**Présenté par :**

*-Mr. Bouharkat Mekki*

**Avis favorable de l'encadreur :**

*Mme. Khelili Fatiha*

*signature*

**Avis favorable du Président du Jury**

**Mr.Rouina abd elhafid**

*Signature*

**Cachet et signature**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Réseaux électrique

## *Thème :*

### **Etude des transformateurs sous fréquences élevées**

**Présenté par: Mr. Bouharkat Mekki.**  
**Dirigé par: Mr. Khelili Fatiha.**

#### **RESUMES**

Nous allons entrer dans cette mémoire, comment un changement de fréquence affecte les transformateurs et la tension électrique dans son proper été et la surveillance du comportement des transformateurs en changeant la fréquence de 50 Hz à 200 kHz et de travailler sur elle sans charge utile et la charge utile (résistance, résistance avec l'inductance et le changement dans les valeurs résistantes et l'inductance et l'observation de la différence entre eux et la comparaison finale avec la tension à vide.

#### **ملخص**

سنتطرق في هذه الذاكرة , الي كيفية تاثير تغير في التواتر علي المحولات و علي الجهد الكهربائي بصرفه خاصة و مراقبة سلوك المحولات وذلك ب تغير التواتر من 50 هرتز الي 200 كيلوهرتز و العمل عليه بدون الحمولة و بالحمولة ( المقاومة , المقاومة مع الوشيعه و التغير في القيم المقاومة و الوشيعه و ملاحظة الفرق بينهما و مقارنة النهائية مع الجهد في الفراغ ).

## إهداء:

اهدي هذه المذكرة إلي  
والدي العزيزين  
أبي وأمي  
وأخوتي الأعزاء (زكرياء  
وإسلام وأسامة وأمين)  
وجميع أفراد عائلتي  
والي مؤطرتي فتيحة خليلي  
والأستاذ محمد سوري ميمون  
والأستاذ روية عبد الحفيظ  
والأستاذة نعيمة بن يحي  
والذين كان لهما الفضل في  
انجاز مذكرتي  
جميع أصدقائي الأعزاء)  
السعيد وإسماعيل و نجم الدين  
وعبد الرحمان و عبد الكريم  
ومحمد و صلاح و جيلاني  
جميع الطلاب شبكات  
كهربائية  
وكل من دعمني وكان في  
سندي في انجاز مذكرة  
تخرجي

# تشكرات

نوجه بالشكر أولاً إلى الله سبحانه و تعالي الذي منحنا نعمة العقل و الصحة , هو الذي أمرنا بالعلم وأعرب عن امتناني الكبير إلي والديا الأعرء علي الجهد المبذول و التعب من اجل إن أتعلم و اربقي لي مكان اعلي و اسما في العلم و علي التشجيع الدائم.

واشكر كل من مؤطرتي خليلي فتيحة و سوري محمد ميمون و الاستاذ روية عبد الحفيظ و الاستاذة بن يحي نعيمة الذين يناقشون معي مذكرة تخرجي و علي ما قدموه لي من معلومات و كل من علمني .

واشكر أيضا كل من ساهم و دعم في انجاز هذا العمل و اشكرا قسم الهندسة الكهربائية و كلية علوم و تكنولوجيا و إدارة علي الجهود المبذولة.

## **Liste de tableaux**

<b>Tableau.III.1- Les valeur de tension de transformateur d'ampliation (abuseur).....</b>	<b>27</b>
<b>Tableau.III.2- Les valeur de tension de transformateur d'ampliation (élevateur).....</b>	<b>27</b>
<b>Tableau.III.3- Les valeur de tension de transformateur de puissance (élevateur) .....</b>	<b>28</b>
<b>Tableau.III.4- Les valeur de tension de transformateur de puissance (abuseur) .....</b>	<b>29</b>
<b>Tableau.III.5- Les valeur de tension de transformateur de puissance (élevateur) .....</b>	<b>30</b>
<b>Tableau.III.6- Les valeur de tension de transformateur de puissance (abuseur) .....</b>	<b>31</b>
<b>Tableau.III.7- Les valeur de tension de transformateur de puissance (élevateur) .....</b>	<b>31</b>
<b>Tableau.III.8- Les valeur de tension de transformateur de puissance (abuseur) .....</b>	<b>32</b>
<b>Tableau.III.9- Les valeur de tension de transformateur de puissance (élevateur) .....</b>	<b>33</b>
<b>Tableau.III.10- Les valeur de tension de transformateur de puissance (élevateur) .....</b>	<b>34</b>
<b>Tableau.III.11- Les valeur de tension de transformateur de puissance (élevateur) .....</b>	<b>35</b>
<b>Tableau.III.12- Les valeur de tension de transformateur de puissance (élevateur) .....</b>	<b>36</b>
<b>Tableau.III.13- Les valeur de tension de transformateur de puissance (abuseur) .....</b>	<b>37</b>
<b>Tableau.III.14- Les valeur de tension de transformateur de puissance (abuseur) .....</b>	<b>38</b>
<b>Tableau.III.15- Les valeur de tension de transformateur de puissance (abuseur) .....</b>	<b>39</b>
<b>Tableau.III.16- Les valeur de tension de transformateur de puissance (abuseur) .....</b>	<b>40</b>

---

## LISTE DE FIGURES

---

Fig.1. Michael Faraday .....	4
Fig. I.2 magnétique en monophasé Circuit.....	5
Fig. I.3 Circuit magnétique .....	6
Fig. I.4 Analogie entre circuit électrique (a) et circuit magnétique (b).....	7
Fig. I.5 enroulement de transformateur .....	9
Fig. I.6 Auto transformateur.....	16
Fig. I.7 transformateur variable.....	17
Fig. I.8 transformateur d'isolement.....	17
Fig. I.9 Transformateur HVDC.....	19
Fig. I.10 Transformateur de distribution avec vue de l'intérieur .....	21
Fig. I.11 Transformateur de distribution sec.....	22
Fig. I.12 Schéma électrique d'un transformateur déphaseur.....	24
Fig. I.13 Le transformateur d'évacuation d'énergie.....	25
Fig. II.1 Le transformateur.....	28
Fig.II.2 Circuit équivalent du transformateur idéal.....	29
Fig.II.3 Le transformateur à vide.....	29
Fig.II.4 Circuit équivalent du transformateur à vide.....	30
Fig.II.5 Le transformateur en charge.....	31
Fig.II.6 Circuit équivalent du transformateur idéal.....	31
Fig.II.7 Circuit équivalent du transformateur idéal, en charge. ....	31
Fig.II.8 Circuit équivalent du transformateur.....	33
Fig.II.9 Circuit équivalent du transformateur avec charge au secondaire.....	34
Fig.II.10 Circuit équivalent du transformateur vu du primaire. ....	35
Fig.II.11 Diagramme vectoriel des tensions et courants du transformateur.....	35

---

<b>Fig.II.12</b>	<b>Circuit équivalent simplifié du transformateur.....</b>	<b>35</b>
<b>Fig.II.13</b>	<b>Diagramme vectoriel des tensions et courants du transformateur simplifié. ....</b>	<b>36</b>
<b>Fig.II.14</b>	<b>Essai à vide d'un transformateur.....</b>	<b>38</b>
<b>Fig.II.15</b>	<b>Essai en court-circuit d'un transformateur.....</b>	<b>39</b>
<b>Fig.III.1</b>	<b>Le transformateur d'impulsions.....</b>	<b>42</b>
<b>Fig.III.2</b>	<b>Le transformateur de la puissance T2.....</b>	<b>43</b>
<b>Fig.III.3</b>	<b>Le transformateur de la puissance T3.....</b>	<b>45</b>
<b>Fig.III.4</b>	<b>les tensions V2 du transformateur T1. ....</b>	<b>48</b>
<b>Fig.III.5</b>	<b>les tensions V2 du transformateur T1. ....</b>	<b>49</b>
<b>Fig.III.6</b>	<b>les tensions V2 de transformateur T2 en disposition élévateur. ....</b>	<b>50</b>
<b>Fig.III.7</b>	<b>les tensions V2 du transformateur T2 en disposition abaisseur. ....</b>	<b>51</b>
<b>Fig.III.8</b>	<b>les tensions V2 du transformateur T2 en disposition élévateur. ....</b>	<b>52</b>
<b>Fig.III.9</b>	<b>les tensions V2 du transformateur T2 en disposition abaisseur. ....</b>	<b>53</b>
<b>Fig.III.10</b>	<b>les tensions V2 du transformateur T3 en disposition élévateur. ....</b>	<b>55</b>
<b>Fig.III.11</b>	<b>la tension V2 de transformateur T3 en disposition abaisseur. ....</b>	<b>56</b>
<b>Fig.III.12</b>	<b>la tension V charge1 de transformateur T2 en disposition élévateur.....</b>	<b>57</b>
<b>Fig.III.13</b>	<b>la tension V charge2 de transformateur T2 en disposition élévateur. ....</b>	<b>58</b>
<b>Fig. III.14</b>	<b>la tension V charge3 du transformateur T2 en disposition élévateur. ....</b>	<b>60</b>
<b>Fig.III.15</b>	<b>la tension Vs charge4 du transformateur T2 en disposition élévateur.....</b>	<b>61</b>
<b>Fig.III.16</b>	<b>La comparaison Entre la tension de charge et à vide de transformateur T2 en disposition élévateur.....</b>	<b>62</b>

---

**Fig.III.17** la tension V charge5 du transformateur T2 en disposition abaisseur. ....63

**Fig.III.18** la tension V charge6 du transformateur T2 en disposition abaisseur. ....64

**Fig.III.19** la tension V charge7 du transformateur T2 en disposition abaisseur. ....65

**Fig.III.20** la tension V charge8 du transformateur T2 en disposition abaisseur. ....67

**Fig.III.21** La comparaison Entre la tension de charge et à vide de transformateur T2 en disposition abaisseur.....67

**Fig.III.22** la tension V chargeRL1, 2,3 du transformateur T2 en disposition élévateurs. ....70

**Fig.III.23** La comparaison entre la tension  $V_2$  de charge RL1, 2,3 et à vide de transfo T2 en disposition élévateur.....70

**Fig.III.24** la tension V chargeRL4, 5,6 du transformateur T2 en disposition abaisseurs..... 72

**Fig.III.25** La comparaison Entre la tension de charge RL4, 5,6 et à vide de transformateur T2 en disposition abaisseur. ....73

---

**LISTES DES SYMBOLES ET ACRONYMES**

$\mathcal{J}$	force magnétomotrice
$H$	lente site de champ magnétique
$B$	densité de champ magnétique
$\mu$	Perméabilité
$\phi$	Flux élémentaire
$\lambda$	Flux de liaison
$L, L1, L2$	inductance
$\mathfrak{R}$	Reluctance
$\Lambda, \Lambda1$	Permane
$\mu_0$	Perméabilité d l'aire
$n$	nombre de spires
$A$	section de noyau
$N_1$	Nombre de spires primaire
$N_2$	Nombre de spires secondaire
$m, \alpha$	rapport de transformateur
$w$	pulsation angulaire
$l$	longueur du noyau
$f$	fréquence
$Z_L$	Impédance inductive
$Z_C$	Impédance capacitive
$V, v1, v2,$	tension
$I, I1, I2, i$	courant

<b>E</b>	<b>Intensité de champ électrique</b>
<b>D</b>	<b>densité de champ électrique</b>
<b>R</b>	<b>résistance</b>
<b>P</b>	<b>puissance active</b>
<b>Q</b>	<b>puissance réactive</b>
<b>t</b>	<b>tempe</b>
<b>S</b>	<b>puissance apparent</b>
<b><math>\sigma</math></b>	<b>conductivité</b>
<b>T</b>	<b>période</b>
<b>N</b>	<b>nombre des segments</b>
<b>v1</b>	<b>la tension du entré</b>
<b><math>\frac{d\phi}{dt}</math></b>	<b>La drivai de flux</b>
<b>e1, e2</b>	<b>la tension aux bornes du noyau</b>
<b><math>\phi_m</math></b>	<b>Le flux maximum</b>
<b>Z1, Z2</b>	<b>L'impédance</b>
<b>Req</b>	<b>Résistance équivalent</b>
<b>Xeq</b>	<b>Inductance équivalent</b>
<b>I'2</b>	<b>Le courant du la bobine secondaire</b>
<b>I0</b>	<b>Le courant du circuit magnétique</b>
<b><math>\eta</math></b>	<b>Le rendement</b>
<b>reg</b>	<b>Le facteur de régulation</b>
<b>P1<math>\nu</math></b>	<b>LA puissance active du transformateur à vide</b>

***Q1v***      **LA puissance réactive du transformateur à vide**

***P1cc***      **LA puissance active du transformateur à cc**

***Q1cc***      **LA puissance réactive du transformateur à cc**

## SOMMAIRE

Dédicaces	
Remerciements	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des symboles et acronymes	
Résumé	
Sommaire	
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur le transformateur</b>	
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>I.1.1. Historique des transformateurs .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2Présentation de transformateur .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.1 Loi d'Hopkins on .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.2 Loi de Lenz.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 Constitution.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.1 Circuit magnétique.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.2 Equations Magnétiques.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.3 Circuit électrique.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.4 Disposition des enroulements .....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.5 La disposition concentrique .....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.6 La disposition alternée .....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.7 La partie mécanique.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4 Constitution interne des transformateurs .....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.1Enroulement.....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.1.1 Prises de réglage.....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.2Calage.....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.3 Cuve et dispositifs de réfrigération.....</b>	<b>8</b>
<b>I.4.4 Ventilation forcée .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.5 Aéroréfrigérants .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.6 Circulation forcée de l'huile .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.7 Utilisation de l'eau .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.8 Bornes ou traversées .....</b>	<b>9</b>
<b>I-5 D'autres accessoires.....</b>	<b>10</b>
<b>I.6 Utilisation de transformateur.....</b>	<b>12</b>
<b>I.7 Les différents types de transformateur .....</b>	<b>13</b>
<b>I.7.1 Auto transformateur .....</b>	<b>14</b>
<b>I.7.2 Transformateur variable.....</b>	<b>14</b>
<b>I.7.3 Transformateur d'isolement .....</b>	<b>15</b>

I.7.4 Transformateur d'impédance .....	15
I.7.5 Transformateur d'intensité .....	16
I.7.6 Transformateur de tension.....	16
I.7.7 Transformateur pour four à arc .....	16
I.7.8 Transformateurs pour convertisseurs à thyristors .....	17
I.7.9 Transformateurs pour convertisseurs à IGBT.....	18
I.7.10 Transformateurs supraconducteur.....	18
I.7.11 Transformateurs de transmission.....	19
I.7.12 Transformateurs de distribution et de type s e c .....	19
I.7.13 Transformateurs de traction.....	21
I.7.14 Transformateurs déphaseurs.....	22
I.7.15 Transformateur d'évacuation d'énergie.....	22
I.7.16 Transformateur d'impulsion .....	23
I.7.17 Transformateur triphasé.....	23
I.8 Conclusion.....	24

## Chapitre II : Les comportements du transformateur de fréquence Industriel

II.1 Introduction.....	25
II.2.1 Principe de fonctionnement.....	25
II.2.2 Transformateur idéal.....	26
II.2.3 Fonctionnement à vide.....	27
II.2.4 Fonctionnement en charge du transformateur idéal.....	28
II.2.5 Modèle du transformateur idéal.....	29
II.2.6 Transformateur idéal en régime sinusoïdal permanent.....	30
II.3 Transformateur réel.....	30
II.3.1 Circuit équivalent du transformateur réel.....	31
II.3.2 Transformateur en régime sinusoïdal permanent .....	32
II.3.3 Notion de charge d'un transformateur .....	34
II.3.4 Rendement d'un transformateur .....	35
II.3.5 Facteur de régulation d'un transformateur.....	35
II.4 Détermination des paramètres du transformateur.....	35
II.5 Conclusions .....	38

## Chapitre III: Les comportements du transformateur en haute fréquence

III.1. Introduction.....	39
III.2. Descriptions des transformateurs utilisés.....	39
III.2.1. Le transformateur T1.....	39
III.2.2. Le transformateur T2.....	40
III.2.3. Le transformateur T3.....	43

<b>III.3. La valeur de tension de sortie (à vide) .....</b>	<b>45</b>
<b>III.3.1. Transformateur d'impulsion T1.....</b>	<b>45</b>
<b>III.3.1.1. le transformateur en direct.....</b>	<b>45</b>
<b>III.3.1.2. le transformateur en indirect.....</b>	<b>45</b>
<b>III.3.2. Les valeur de la tension du transformateur de puissance T2.....</b>	<b>46</b>
<b>III.3.2.1. Les valeur de la tension V3 du transfo T2 en disposition élévateur. ....</b>	<b>47</b>
<b>III.3.2.2. Les valeur de la tension V4 du transfo T2 en disposition abaisseur.....</b>	<b>48</b>
<b>III.3.3. La valeur de la tension du transformateur de puissance T2.....</b>	<b>49</b>
<b>III.3.3.1. La valeur de la tension V5 du transfo T2 en disposition élévateur.....</b>	<b>50</b>
<b>III.3.3.2. La valeur de la tension V6 du transfo T2 en disposition abaisseur.....</b>	<b>50</b>
<b>III.3.4. La valeur de la tension du transformateur de puissance T3 .....</b>	<b>51</b>
<b>III.3.4.1. La valeur de la tension V7 du transfo T3 en disposition élévateur.....</b>	<b>52</b>
<b>III.3.4.2. La valeur de la tension V8 du transfo T3 en disposition abaisseur.....</b>	<b>53</b>
<b>III.4. La valeur de tension de sortie (une charge R) .....</b>	<b>54</b>
<b>III.4.1 La valeur de la tension V du transformateur de puissance T2.....</b>	<b>55</b>
<b>III.4.1.1 La valeur de Vch1 du T2 en disposition élévateur avec une charge R.....</b>	<b>55</b>
<b>III.4.1.2 La valeur de Vch2 du T2 en disposition élévateur avec une charge R.....</b>	<b>56</b>
<b>III.4.1.3 La valeur de Vch3 du T2 en disposition élévateur avec une charge R.....</b>	<b>57</b>
<b>III.4.1.4 La valeur de Vch4 du T2 en disposition élévateur avec une charge R.....</b>	<b>58</b>
<b>III.4.1.5 La comparaison entre la tension de charge et à vide de dessin.....</b>	<b>59</b>
<b>III.4.2 La valeur de la tension du transformateur de puissance T2 .....</b>	<b>60</b>
<b>III.4.2.1 La valeur de Vch5 du T2 en disposition abaisseur avec une charge R.....</b>	<b>60</b>
<b>III.4.2.2 La valeur de Vch6 du T2 en disposition abaisseur avec une charge R.....</b>	<b>61</b>
<b>III.4.2.3 La valeur de Vch7 du T2 en disposition abaisseur avec une charge R.....</b>	<b>62</b>
<b>III.4.2.4 La valeur de Vch8 du T2 en disposition abaisseur avec une charge R.....</b>	<b>64</b>
<b>III.4.2.5 La comparaison entre la tension de charge et à vide de dessin.....</b>	<b>65</b>
<b>III.5. La valeur de tension de sortie T2 (une charge RL) .....</b>	<b>66</b>
<b>III.5.1.1 La valeur de VRL1 du T2 en disposition élévateur avec une charge RL.....</b>	<b>66</b>
<b>III.5.1.2 La valeur de VRL2 du T2 en disposition élévateur avec une charge RL.....</b>	<b>66</b>
<b>III.5.1.3 La valeur de VRL3 du T2 en disposition élévateur avec une charge RL.....</b>	<b>67</b>
<b>III.5.2.1 La valeur de VRL4 du T2 en disposition abaisseur avec une charge RL.....</b>	<b>68</b>
<b>III.5.2.2 La valeur de VRL5 du T2 en disposition abaisseur avec une charge RL .....</b>	<b>69</b>
<b>III.5.2.3 La valeur de VRL6 du T2 en disposition abaisseur avec une charge RL.....</b>	<b>69</b>
<b>III.7 Concluions .....</b>	<b>71</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>72</b>
<b>Bibliographie</b>	

**Introduction**

**Générale**

### **Introduction générale**

Le réseau électrique est constitué de plusieurs composants pour assurer une bonne transmission de l'énergie vers différents utilisateurs. Parmi ces composants, on trouve le transformateur. Ce dernier doit être dimensionné selon le besoin et selon les évènements rencontrés.

Le monde connaît des changements dans la technologie de l'électricité. Les transformateurs sont d'un emploi très répandu dans plusieurs domaines, de la basse puissance dans l'électronique jusqu'à la haute puissance dans le réseau de transport. De ce fait le comportement de ces transformateurs à la fréquence industrielle est bien connu dans le monde que ce soit industriel ou pédagogique par contre le comportement est moins connu si on s'éloigne de cette fréquence industrielle. On peut avoir un comportement bizarre d'une inductance qui se comporte comme une capacitance au-delà de sa fréquence de résonance. Les applications des transformateurs en haute fréquence sont très répandues surtout dans l'électronique de commande et de réglage. Ces applications partent du domaine de la puissance 'commande de machines industrielles de puissance dans les navires et les sous-marins' jusqu'au domaine de la faible puissance 'électronique de commande et de réglage'.

Pour cela, il s'est avéré pour notre part autant qu'électrotechnicien de s'aventurer dans le domaine des hautes fréquences pour voir réellement ce comportement et laisser aux intéressés une base de données qui sera utile que ce soit pour le domaine pédagogique qu'industriel.

Pour cela, nous avons utilisé trois types de transformateurs : le premier transformateur est d'impulsion à base de ferrite appelé T1, les deux autres sont des transformateurs à base de tôles en fer silicium feuilletés T2, T3. La description de chaque transformateur est donnée par la suite.

Ce travail est présenté sous trois chapitres :

Le premier chapitre: les généralités sur le transformateur.

Le deuxième chapitre: Les Comportement des transformateurs industriels.

Le troisième chapitre : Les Comportement des transformateurs en haute fréquence.

# **Chapitre 1**

## **Généralité Sur**

### **Le Transformateur**

## I.1 Introduction:

Le transformateur est un appareil électrique qui transfère de l'énergie d'un circuit à un autre par un couplage magnétique sans partie mobile. Un transformateur comprend 2 ou plusieurs enroulements couplés ou encore un seul enroulement à prises et, dans la plupart des cas, un noyau magnétique pour concentrer le flux magnétique. Un changement de courant dans un enroulement (l'enroulement primaire) crée un flux magnétique variable dans le temps dans le noyau, ce qui induit une tension dans l'(les) autre(s) enroulement(s) (enroulement secondaire). le transformateur est l'un des appareils électriques les plus simples et pour autant les modèles et matériaux des transformateurs sont toujours améliorés.

En matière de taille, les transformateurs vont de la taille d'un ongle, pour un transformateur caché dans un microphone de scène, jusqu'à d'énormes unités en gigawatt employées pour relier de grands pans du réseau électrique national. Tous fonctionnent cependant selon les mêmes principes et présentent de nombreuses similitudes de construction.

### I.1.1. Historique des transformateurs :

Michael Faraday construisit le premier transformateur en 1831. Il ne l'employa cependant que pour démontrer le principe de l'induction électromagnétique et n'en imagina pas les usages auxquels il serait finalement destiné.

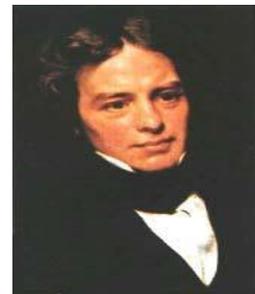


Fig I.1 : Michael Faraday

L'ingénieur Russe Pavel Yablochkov inventa en 1876 un système d'éclairage basé sur un jeu de bobines d'induction, dans lequel les enroulements primaires étaient connectés à une source de courant alternatif et les enroulements secondaires pouvaient être reliés à plusieurs « bougies électriques ». Comme le mentionnait le brevet, un tel système « permet[tait] de fournir une alimentation indépendante à plusieurs dispositifs d'éclairage, sous différentes intensités lumineuses, à partir d'une seule source d'alimentation électrique ». De toute évidence, la bobine d'induction fonctionnait dans ce système comme un transformateur. Lucien Galard et John Dixon Gibbs présentèrent les premiers un appareil dit « générateur secondaire » à Londres en 1881 puis vendirent l'idée à la société américaine Westinghouse. Ce peut avoir été là le premier transformateur de puissance pratique. Ils présentèrent également l'invention à Turin en 1884, où elle fut adoptée comme un système électrique d'éclairage. Les premiers appareils employaient un noyau ouvert de fer, qui fut rapidement abandonné pour un noyau circulaire plus efficace, présentant un circuit magnétique fermé. William Stanley, ingénieur de Westinghouse, construisit le premier appareil pratique en 1885 après l'achat par George Westinghouse des brevets de Galard et Gibbs. Le noyau était constitué de plaques de fer à enclenchement en forme de E. Cette version fut commercialisée pour la première fois en 1886. Les ingénieurs hongrois Károlyi Zipernowsky, Otto Bláthy et Miksa Décri, de la société Ganz de Budapest en 1885, créèrent le modèle très efficace ZBD basé sur le modèle de Galard et

Gibbs. L'ingénieur Russe Mikhaïl D'olive-Dobrovolsky développa en 1889 le premier transformateur triphasé [1].

## I.2Présentation de transformateur :

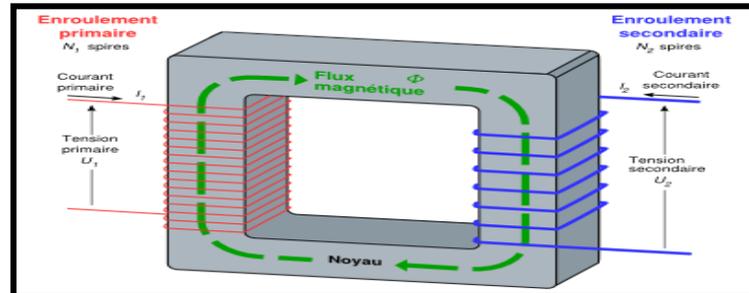


Fig. I.2 magnétique en monophasé Circuit

### I.2.1 Loi d'Hopkins on :

La formule d'Hopkins on est une équation d'électromagnétisme qui permet de calculer la Force magnétomotrice dans un générateur électrique.

$$\mathfrak{J} = nI = \mathfrak{R} \cdot \phi \quad (\text{I.1})$$

### I.2.2 Loi de Lenz :

Un courant sinusoïdal dans - spires bobinées sur un matériau magnétique fermé crée un flux magnétique sinusoïdal. Dans ce cas on a :

$$\phi(t) = \frac{ni(t)}{\mathfrak{R}} \quad (\text{I.2})$$

Une variation de flux magnétique dans une spire provoque l'apparition d'une tension (f.e.m) créant un courant dont les effets s'opposent au flux. C'est la loi de Lenz : [1]

$$\mathbf{u}(t) = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{I.3})$$

Donc :

$$\mathbf{u}(t) = \frac{n^2}{\mathfrak{R}} \frac{di(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{I.4})$$

L : l'inductance de la bobine.

**I.3 Constitution :**

En Monophasé et Triphasé :

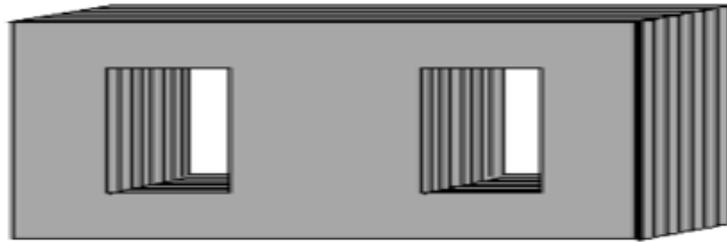
**I.3.1 Circuit magnétique:**

Fig. I.3 Circuit magnétique

Un circuit magnétique est un circuit généralement réalisé en matériau ferromagnétique au travers duquel circule un flux de champ magnétique. Le champ magnétique est généralement créé soit par des enroulements enserrant le circuit magnétique et traversés par des courants, soit par des aimants contenus dans le circuit magnétique. Le concept du circuit magnétique est de confiner le flux produit par des enroulements. [1]

**I.3.2 Equations Magnétiques :**

Les principales formules de magnétisme sont représentées dans le tableau I.1 :

Nom	Symbole	Equation
Force magnétomotrice (fmm)	$\mathfrak{F}$ [A – t]	$\mathfrak{F} = nI$
Intensité de champ magnétique	$H$ [A – t/m]	$H = nI/l$
Densité de champ magnétique	$B$ [T][Wb/m <sup>2</sup> ]	$B = \mu H$
Perméabilité	$\mu$ [Wb/A. m]	$\mu = \mu_0 \mu_r$
Flux	$\phi$ [Wb]	$\phi = BA$
Flux de liaison	$\lambda$ [Wb-t] [V. s]	$\lambda = n\phi$
Inductance	$L$ [H]	$L = \lambda/I = n^2/\mathfrak{R} = n^2\Lambda$
Reluctance	$\mathfrak{R}$ [A.turns/Wb][H]	$\mathfrak{R} = 1/\Lambda$
Perméance	$\Lambda$ [H]	$\Lambda = \mu_0\mu_r A/l$

Tab. I.1- Les principales formules de magnétisme

- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ : Perméabilité de l'air.
- $\mu_r$ : Perméabilité relative de matériau ferromagnétique (comprise entre  $10^3$  et  $10^5$ ).
- $l$ : Longueur du noyau.
- $n$ : Nombre de spires.
- $A$ : Section de noyau.

**I.3.3 Circuit électrique:**

Il comporte essentiellement l'enroulement primaire, secondaire et leur isolation. Ces deux enroulements ont toujours un nombre de spires différent, celui avec le plus grand nombre est appelé **enroulement HT**, et celui avec un nombre inférieur est appelé **enroulement BT**.

Le tableau I.2 montre une similitude entre les grandeurs magnétiques et électriques.

Cette analogie est la base de principe de dualité indiqué à la section. [2]

Paramètres électriques	Paramètres magnétiques
Intensité de champ électrique $E$ , (v/m)	Intensité de champ magnétique $H$ , (A. turns/ m)
Tension $V$ , (v)	Force magnétomotrice $\mathfrak{F}$ , (A.turns)
Courant $I$ , (A)	Flux magnétique $\phi$ (Wb)
Densité de champ électrique $D$ , (V/m <sup>2</sup> )	Densité de champ magnétique $B$ , (Wb/m <sup>2</sup> )
Resistance $R$ , ( $\Omega$ )	Reluctance $\mathfrak{R}$ (A.turns/Wb)
Conductivité $\sigma$ , (1/ $\Omega \cdot m$ )	Perméabilité $\mu$ (Wb/A. m)
Loi d'Ohm $V=RI$	Loi d'Hopkinson $\mathfrak{F} = nI = \mathfrak{R} \phi$

Tab. I.2- analogie entre circuit électrique et circuit magnétique

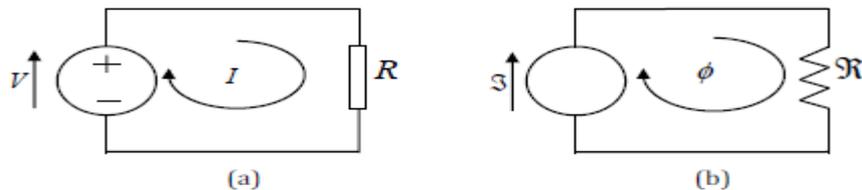


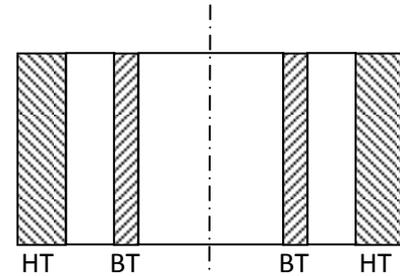
Fig. I.4 Analogie entre circuit électrique (a) et circuit magnétique (b).

### I.3.4 Disposition des enroulements :

Les enroulements sont disposés de façon à avoir des coefficients de self de fuite les plus faibles possible, pour cela, deux dispositions sont adoptées:

### I.3.5 La disposition concentrique :

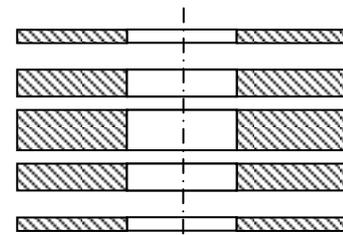
Dans laquelle, les enroulements sont placés l'un à l'intérieure de l'autre. Ce type de bobinage convient aux transformateurs de puissance relativement faible, quelques centaines de KVA, à cause de la surtension entre spires de deux couches successives [3].



Enroulements concentriques

### I-3-6 La disposition alternée :

Dans laquelle, les enroulements sont coupés en tronçons et sont placés dans le sens axial alternativement, c'est-à-dire: tronçon BT puis HT etc. on place un demi tronçon en extrémité pour réduire la réactance de fuite. Il convient essentiellement aux bobinages HT. [4]



Enroulements alternés.

### I-3-7 La partie mécanique:

La partie mécanique dans un transformateur est: **la cuve** et **le couvercle**. Ils sont constitués par des tôles en acier soudées pour qu'ils soient rigides, résistants et étanches. Leur utilité est qu'ils:

- Assurent la protection mécanique de la partie active (HT, BT et masse).
- Servent comme contenu du diélectrique ainsi que son moyen de refroidissement.
- Servent comme support du circuit magnétique.
- Fixent les traversées.
- Facilitent la manutention (anneau de levage).

#### I-4 Constitution interne des transformateurs :

##### I-4-1 Enroulement:

Le transformateur comporte essentiellement 2 à 3 enroulements : l'enroulement basse tension et l'enroulement haute tension.

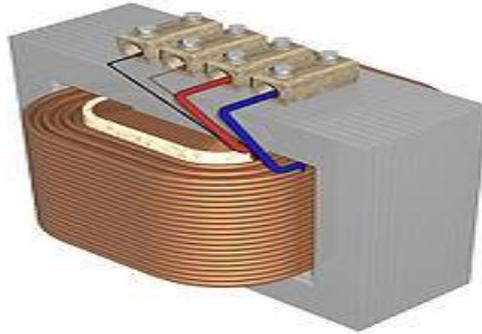


Fig. I.5 enroulement de transformateur

##### I-4-1-1 Prises de réglage

L'enroulement HT comporte quelques spires de réglage sur chaque phase, avec un couplage en étoile. Il est facile d'ajouter ou de retrancher ces spires, et pour cela, on ne peut manœuvrer que hors tension avec un réglage à vide. Mais tous les transformateurs sont munis d'un régleur qui fonctionne en charge, appelé régleur en charge.

Ces prises sont le plus souvent placées sur l'enroulement HT qui présente l'avantage d'un courant plus faible et d'un plus grand nombre de spires.

Pour les gammes étendues, on prévoit un enroulement spécial avec prise disposée sur chaque phase coté neutre, les prises sont reliées à un commutateur pour réglage hors tension ou en charge.

Pour ajuster le rapport de transformation des transformateurs, ces derniers sont munis de prises prévues sur l'un des enroulements, d'un réglage généralement demandé de  $\pm 10$  à 20% en plusieurs échelons avec changement de prises en charge. [4]

##### I-4-2 Calage

De grandes quantités de calages isolants sont utilisées dans les transformateurs, leur rôle est de

- Maintenir en toutes circonstances les canaux de circulation d'huile de façon que le refroidissement du transformateur s'y fasse toujours dans les meilleures conditions. Ces

canaux sont disposés entre enroulement haute tension et basse tension, entre bobines ou galettes, entre noyaux et enroulement.

Eviter toute déformation ou déplacement des bobines, haute tension et basse tension sous l'effet :

- De courts-circuits donnant lieu a des efforts électrodynamiques très élevés, provoqués par les courants intenses circulant dans les conducteurs.
- Des vibrations en service normal ou, des chocs en cours de transport.
- Du tassement éventuel des enroulements.
- Les enroulements une fois placés sur le circuit magnétique doivent être convenablement maintenus de façon que toutes les distances entre enroulement et masse et entre enroulements ne varient pas en cours de fonctionnement, comme il a été dit plus haut.

#### **I-4-3 Cuve et dispositifs de réfrigération:**

Un transformateur en service est le siège de pertes, mécanique, Fer, et hystérésis. Il est convenable d'évacuer ces pertes afin de maintenir les différentes parties du transformateur à des températures convenables. Pour les petits appareils, la cuve constitue un échangeur suffisant de la chaleur. C'est un ensemble de chaudronné constitué de tôles de pièces de renfort le plus souvent en fer profilé.

Elle est supportée par un châssis équipé éventuellement de galets de roulement et pouvant supporter le poids de l'appareil, sans déformation des parois. Elle est formée à la partie supérieure par un couvercle de forme généralement bombée pour éviter l'accumulation des eaux de pluie, pour les appareils installés à l'extérieur. Sur ce couvercle sont disposées les bornes de sorties de l'appareil. Le couvercle est fixé sur les parois de la cuve par des boulons suffisamment rapprochés et serrant un joint étanche à l'huile. Lorsqu'il est nécessaire d'inspecter la partie active d'un transformateur, il faut l'extraire de la cuve après vidange de l'huile. Cette opération nécessite un engin de levage relativement puissant et de hauteur sous crochet suffisante. Cet inconvénient peut être évité par l'emploi de certains types de cuve, en particulier les cuves en cloche ou les cuves à virole. L'opération de décuillage d'une cuve de type cloche, par exemple, ne nécessite que l'enlèvement de la cloche seule, bien plus légère que la partie active. On l'utilise pour la fabrication des transformateurs cuirassés. Par ailleurs, la cuve doit résister au vide interne pour permettre le traitement de l'huile [3].

Pour les appareils de puissance, la cuve doit contenir un équipement de réfrigération. Le refroidissement des transformateurs de puissance s'effectue par transfert de la chaleur dégagée, du fait des pertes, du transformateur à l'air ambiant par l'intermédiaire de l'huile et de la cuve munie de radiateurs. Pour accélérer la transmission de la chaleur à évacuer, on utilise les dispositifs suivants, afin de ne pas être contraints d'augmenter outre mesure le volume de la cuve et des réfrigérants :

**I-4-4 Ventilation forcée :**

Au de là de 10 MVA environ, les radiateurs classiques à ventilation naturelle n'assurent plus un refroidissement suffisant de l'huile ; pour activer les échanges de chaleur, on emploie des ventilateurs qui soufflent l'air frais sur les parois des radiateurs. Les transformateurs ainsi équipés sont dits « à refroidissement par ventilation forcée »[3].

**I-4-5 Aéroréfrigérants :**

Les aéroréfrigérants disposés en batteries et fixés sur le pourtour de la cuve des transformateurs se composent d'un faisceau de tubes échangeurs parcourus par l'huile chaude et au travers duquel on fait passer un flux d'air grâce à un jeu de ventilateurs. L'huile, après refroidissement dans le faisceau, est renvoyée dans le transformateur [3].

**I-4-6 Circulation forcée de l'huile :**

Pour augmenter la vitesse de l'huile dans les radiateurs et ainsi activer les échanges de chaleur, on emploie des pompes de circulation intercalée dans le circuit d'huile.

Ce système est employé pratiquement sur tous les appareils de puissance supérieure ou égale à 10MVA [3].

**I-4-7 Utilisation de l'eau :**

Dans quelques cas, très peut répandus, l'huile est refroidie :

- Soit par des serpentins parcourus par de l'eau froide et logés dans la cuve du transformateur.
- Soit par des batteries de radiateurs séparés de la cuve et refroidis par circulation forcée d'eau (hydro réfrigérants) [3].

**I.4.8 Bornes ou traversées:**

Le raccordement d'un transformateur s'effectue sur des bornes qui assurent l'isolation par rapport à la cuve de la connexion de traversée et de la prise de courant. Elles

---

sont généralement fixées sur le couvercle de la cuve au moyen d'une collerette vissée, sur laquelle, est scellée une porcelaine vernissée, shuntée par un éclateur qui crée volontairement un point où l'isolement à la masse est le plus faible et soutenant une pièce d'extrémité qui porte la prise de courant [3].

Nous pouvons distinguer deux types de bornes, suivant le diélectrique constituant l'isolant interne de la borne:

- **Bornes à l'huile:** qui peut ou non être en communication avec l'huile du transformateur.
- **Bornes condensateurs:** généralement, du papier. Certaines surfaces sont métallisées de façon à contrôler les lignes équipotentielles du champ électrique et forment ainsi une série de condensateurs concentriques à la connexion.

#### **I-5 D'autres accessoires :**

Indépendamment des parties constructives essentielles, certains accessoires se trouvent systématiquement sur la plupart des transformateurs [3]:

##### ➤ **Réservoir d'expansion (conservateur) :**

Il contient un excédent d'huile d'immersion du transformateur et permet à celles-ci de se dilater librement suivant la température, par respiration à travers un as sécheur destiné à assécher chimiquement l'air en contact avec le niveau supérieur de l'huile. Un niveau visible du sol permet d'apprécier la quantité d'huile dans le conservateur. On utilise aussi de l'azote pour éviter le contact air huile, en compensant la dilatation de l'huile par la variation de volume de ballons de caoutchouc remplis d'azote, extérieurs au transformateur et reliés au conservateur.

##### ➤ **Tubulure d'explosion :**

En cas d'amorçages internes accidentels, de grandes quantités de gaz prennent naissance presque instantanément. Afin d'éviter des surpressions internes importantes de l'huile, on prévoit une tuyauterie de fort diamètre éjectant hors du couvercle et des bornes. Cette tubulure est normalement fermée par un diaphragme destiné à se déchirer pour une surpression déterminée.

##### ➤ **Les tuyauteries**

Les transformateurs sont dotés de vannes et d'autres accessoires pour la vidange, la purge, l'aération, le contrôle et la prise d'échantillon d'huile.

---

➤ **Les galets de roulement**

Les transformateurs ne posent sur la voie qu'à l'aide des galets munis d'un système de blocage sur les railles.

➤ **Clapet automatique**

Au cas où, par suite d'une rupture mécanique (par exemple rupture d'un scellement de borne), se produirait une fuite d'huile importante dans l'appareil, toute l'huile contenue dans le conservateur serait répandue. Pour pallier cet inconvénient, les constructeurs placent un dispositif sur la tubulure reliant le conservateur à la cuve, entre Buchholz et conservateur. Ce dispositif se compose d'un clapet maintenu soulevé en position ouverte par la pression de l'huile et retombant sur un orifice qu'il obstrue lors d'un écoulement rapide de l'huile.

➤ **Thermostats**

Ils sont utilisés pour la commande des ventilateurs et des groupes de circulation d'huile suivant la température atteinte. Ils servent aussi à transmettre une alarme ou à provoquer le déclenchement par suite d'échauffement excessif.

➤ **Régleur en charge**

C'est un dispositif destiné à changer les connexions aux prises d'un enroulement lorsque le transformateur est sous tension et en charge.

Il peut faire varier le nombre de spires d'un enroulement du transformateur et donc son rapport de transformation sans interrompre le courant de charge. Ainsi, la tension d'un des enroulements de ce transformateur peut varier sans la variation de celle de l'autre enroulement.

➤ **Selection de price**

Il est immergé dans la cuve du transformateur, son rôle c'est établir le contacte entre la prise choisie et le commutateur et de préparer la connexion de la prise voisine à ce même commutateur lors de la manœuvre suivante. Il ne possède qu'une fonction d'aiguillage et travaille toujours sans DDP à ses bornes.

➤ **Commutation**

Il assure le passage d'une prise à la prise voisine, en charge et sous tension, précédemment préparé par le sélecteur. Comme ce dernier, le commutateur possède des contacts fixes auxquels aboutissent les connexions venants des bagues collectrices du

---

sélecteur et des contacts mobiles reliés à la traversée du neutre du transformateur. La manœuvre s'effectue sans interruption du courant de charge en un temps très court, et généralement provoquée par la détente d'un ressort préalablement bondé par un arbre solidaire du sélecteur.

La commande électrique est regroupée dans une armoire de commande fixée sur la cuve du transformateur. Elle contient tous les organes nécessaires au bon fonctionnement du changeur de prises;

➤ **L'éclateur**

Il permet d'éliminer, à une valeur connue, la tension pouvant apparaître sur une borne.

➤ **Parafoudre :** Sont connectés entre conducteurs de phase et terre pour protéger le transformateur contre les surtensions.

**I-6 Utilisation de transformateur [4]:**

Transformateur sont principalement utilisés pour convertir une tension à l'autre. Le processus d'augmentation de la tension est appelé « intensification », tout en diminuant la tension appelée « démission ».

La plupart des équipements électriques ont besoin d'un transformateur pour abaisser la tension à un niveau utilisable.

Les transformateurs se trouvent également dans les adaptateurs de puissance et les chargeurs de batterie

Inversés sont de transformateur de mesure d'une faible tension à une tension plus élevée, ce qui permet une tension d'alimentation d'équipements pour fonctionner sur une batterie. Circuits supplémentaires est nécessaire pour changer la batterie en courant alternatif en courant.

Les transformateurs sont utilisés pour distribution de l'électricité afin de réduire au minimum les pertes d'énergie sur de longues distances.

Des tensions supérieures permettent de réduit les courants, ce qui réduit les pertes causées par la résistance.

Transformateur joue un rôle important dans le transport et la distribution de l'énergie électrique. En effet, si l'on s'intéresse aux pertes en ligne lors d'un transport de puissance électrique, et plus particulièrement aux pertes Joule, ces-dernières sont, quel que soit le conducteur, d'autant plus importantes que le courant électrique est élevé. Or, à

---

puissance transportée constante, l'utilisation d'une tension plus élevée implique un courant électrique plus faible puisque, d'une manière générale et quel que soit le nombre phases utilisées, la puissance électrique  $P_{elec}$  est proportionnelle au produit de la tension  $V$  par le courant  $I$ .

De fait, afin de limiter au maximum les pertes en ligne, il faut transporter un courant aussi faible que possible: quand les distances deviennent importantes, le transport de l'énergie électrique ne peut se faire qu'à très haute tension. Il est donc nécessaire d'élever la tension fournie par les générateurs avant de la transporter, et pour cela d'utiliser des transformateurs.

D'un autre côté, les tensions élevées demandent une maîtrise plus importante. Pour des raisons de sécurité, tournant notamment autour de problèmes d'isolation des conducteurs, ou lorsqu'il n'est pas nécessaire de transporter l'énergie sur de longues distances, on n'a pas toujours recours à l'utilisation des hautes tensions. En particulier, il n'est pas envisageable de câbler les bâtiments avec des tensions très élevées :

Une fois le transport effectué, l'énergie électrique doit être distribuée sous la forme de basses tensions et l'on doit par conséquent avoir là aussi recours à un transformateur.

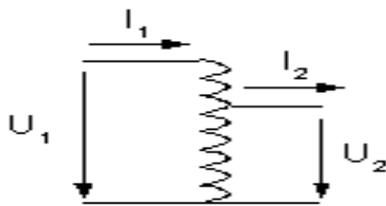
En résumé, le transformateur permet à l'énergie électrique d'être transportée à longue distance de façon économique et distribuée dans les industries et les habitations.

Les transformateurs sont utilisés dans les domaines suivants:

- ❖ Distribution industrielle modification de la tension
- ❖ RADIO TV alimentation tube image
- ❖ Sécurité : transformateur de séparation galvanique
- ❖ Adaptation de l'impédance en télécommunication (translateur)
- ❖ Réglage de la tension pour poste à souder
- ❖ Mesure - transformateur de courant TI ou de tension TP
- ❖ Petit appareil lumineux

### **I-7 Les différents types de transformateur :**

Ces distinctions sont souvent liées aux très nombreuses applications possibles des transformateurs.

**I-7-1 Auto transformateur :**

Symbole d'un autotransformateur.

1 : indique le primaire

2 : le secondaire

Fig. I.6 Auto transformateur

Transformateur sans isolement entre primaire et secondaire (auto - transformateur). Le secondaire est une partie de l'enroulement primaire. Le courant alimente le transformateur parcourt le primaire en totalité et, une dérivation à un point donné de celui-ci détermine la sortie du secondaire. Le rapport tension d'entrée/sortie est identique à celui du type isolé.

A rendement égal, un autotransformateur occupe moins de place qu'un transformateur cela est dû au fait qu'il n'y a qu'un seul bobinage, et que la partie commune de bobinage unique est parcourue par la différence des courants primaire et secondaire, l'autotransformateur n'est intéressant que lorsque les tensions d'entrée et de sortie sont du même ordre de grandeur : par exemple 230 V/115 V. une de ces principales applications est pour utiliser dans un pays un matériel électronique prévu pour un pays où la tension de secteur est différente (Etat Unis, Japon etc.) [5].

**I-7-2 Transformateur variable :**

Comme le précédent c'est un autotransformateur, il ne comporte qu'un seul bobinage. La dérivation de sortie du secondaire peut se déplacer grâce à un contact glissant sur les spires du primaire.



Fig .I.7 transformateur variable

### I-7-3 Transformateur d'isolement:



Fig .I.8 transformateur d'isolement

Le transformateur d'isolement est uniquement destiné à créer un isolement électrique entre plusieurs circuits pour des raisons bien souvent de sécurité ou de résolution des problèmes techniques.

- Tous les transformateurs à enroulement primaire isolé du secondaire peuvent être considérés comme des transformateurs d'isolement.
- Ce nom désigne fréquemment des transformateurs dont la tension de sortie a la même valeur efficace que celle de l'entrée.
- Ils sont très utilisés dans les blocs opératoires, par exemple « un transformateur par salle d'opération », pour qu'un défaut dans une des salles n'entraîne pas un arrêt ou une gêne dans une autre [6] .

### I-7-4 Transformateur d'impédance :

Le transformateur est toujours un transformateur d'impédance, mais les électroniciens donnent ce nom aux transformateurs qui ne sont pas utilisés dans des circuits

d'alimentation. Le transformateur d'impédance est principalement destiné à adapter l'impédance de sortie d'un amplificateur à sa charge [7].

#### **I-7-5 Transformateur d'intensité:**

Ce type de transformateur, appelé aussi transformateur de courant est dédié à l'adaptation des courants mis en jeu dans des circuits différents, mais interdépendant pour leur fonctionnement.

Ce transformateur est l'un des moyens pour mesurer les forts courants en alternatif. Il fonctionne grâce à une spire au primaire, et plusieurs spires au secondaire selon le rapport de transformation du T.I, ce qui provoque une diminution de l'intensité au secondaire qui peut être mesurée par un ampèremètre classique. On peut donc mesurer des courants s'exprimant en kilo Ampère (KA) [7] .

#### **I-7-6 Transformateur de tension :**

Ce transformateur est l'un des moyens pour mesurer élevées en alternatif. Il s'agit d'un transformateur qui a la particularité d'avoir un rapport de transformation étalonné avec précision, mais prévu pour ne délivrer qu'une très faible charge au secondaire, correspondant à un voltmètre. On peut donc mesurer des tensions s'exprimant en kilo volts (KV). On le rencontre en HTA et HTB. Transformateur haute fréquence

Les pertes par courant de Foucault au sein du circuit magnétique sont directement proportionnelles au carré de la fréquence mais inversement proportionnelles à la résistivité du matériau qui le constitue. Afin de limiter ces pertes, le circuit magnétique des transformateurs HF est réalisé à l'aide de matériaux ferromagnétiques isolants [7].

#### **I-7-7 Transformateur pour four à arc :**

Un transformateur pour four à arc doit fournir un courant extrêmement élevé, allant jusqu'à 200 kA. Ils ont en général une puissance allant de 10 à 100 MVA mais peuvent exceptionnellement atteindre les 200 MVA. Pour fournir cette puissance, ces transformateurs sont typiquement reliés au réseau 33 ou 66 kV. Afin de limiter le courant dans la bobine basse tension, une connexion en triangle est choisie, cela impose de placer l'enroulement basse tension à l'extérieur de celui haute tension.

Les courants étant très élevés, les transformateurs pour four à arc combiné à ces derniers ont une impédance totale approchant les 50 %. Ces courants créent également des

---

forces importantes, requérant une conception très solide pour les enroulements. Par ailleurs, l'état du métal changeant, la tension du four change fortement. Un changeur de prises est donc nécessaire. Une conception adaptée doit être choisie, pour éviter que la densité de flux dans le circuit magnétique ne devienne trop importante. En outre les changements de prises sont beaucoup plus fréquents que pour un transformateur de puissance connecté au réseau [8].

### **I-7-8 Transformateurs pour convertisseurs à thyristors:**



Fig. I.9 Transformateur HVDC

Les transformateurs connectés entre les lignes à courant alternatif et les convertisseurs utilisant des thyristors des stations HVDC ont des caractéristiques très différentes des transformateurs de puissance ordinaires. Les lignes à courant continu transportant de grandes puissances, les transformateurs HVDC sont également de fortes puissances. Pour permettre leur transport, ils sont en général monophasés. Ils comportent 2 ou 3 enroulements, le premier est connecté au réseau à courant alternatif, le ou les autres aux convertisseurs. Afin de limiter la production d'harmoniques, un banc de transformateur est connecté en triangle, l'autre en étoile, un déphasage de  $30^\circ$  est ainsi obtenu entre les deux. Dans le cas des transformateurs à 3 enroulements, l'un est connecté en étoile, l'autre en triangle. Un seul design de transformateur est nécessaire pour l'ensemble de la station. Si des transformateurs à deux enroulements sont utilisés, deux designs sont nécessaires : l'un pour le banc en étoile, l'autre pour celui en triangle.

Au-delà de cette construction particulière, les transformateurs HVDC ont une isolation conçue de manière différente d'un transformateur ordinaire. Une tension continue

---

se superpose en effet à la tension alternative dans les enroulements. De plus, lors d'un changement de direction du flux d'énergie dans la liaison HVDC, la polarité de sa tension est inversée. Le champ continu dans l'isolation est donc inversé, les contraintes également. La phase transitoire est particulièrement contraignante pour l'isolation.

Les convertisseurs créent un courant continu dans les enroulements causant également un surplus de nuisance sonore pour ces transformateurs.

En outre, la grande quantité d'harmoniques contenues dans le courant vient saturer et chauffer le circuit magnétique, qui doit être dimensionné en conséquence.

Enfin une haute résistance au court-circuit est nécessaire [6].

#### **I-7-9 Transformateurs pour convertisseurs à IGBT :**

Dans le cas de la technologie VSC, utilisant des IGBT les transformateurs sont beaucoup plus classiques. Avec des convertisseurs à IGBT multi-niveaux, des transformateurs standards peuvent être utilisés sans contrainte spécifique de tenue au courant continu ou aux courants harmoniques .

#### **I-7-10 Transformateurs supraconducteur :**

Les transformateurs utilisant des supraconducteurs sont en phase de recherche et développement, ils semblent constituer un objectif long terme pour l'industrie électrotechnique. L'usage de supraconducteurs dans la fabrication des transformateurs permettrait de réduire les pertes et de limiter les courants de court-circuit (la résistance de la bobine augmente subitement si le courant critique du supraconducteur est dépassé), deux propriétés très intéressantes. Sur le principe, les enroulements en matériau supraconducteur refroidis à l'azote liquide permettent de transporter une forte densité de courant. Ils sont donc plus petits, plus courts et plus légers. Le noyau magnétique n'a lui pas besoin d'être refroidi et est relativement standard. Koehler déclare que ce type de transformateur doit réduire les pertes de 30 % et le poids de 50 % en comparaison avec les transformateurs de puissance actuels.

Un partenariat industriel de recherche entre ABB, EDF et ASC avait vers la fin des années 1990 permis d'avoir des connaissances plus précises sur l'état de la technologie. Un prototype de 10 MVA avait été construit. S'il remplissait la plupart des objectifs fixés, l'impossibilité technique de réaliser correctement des bobines en supraconducteur de longueur suffisante pour atteindre des tensions plus hautes empêchait d'envisager de

réaliser des modèles de plus forte puissance où une telle technique aurait pu trouver son marché. Les recherches ont donc été interrompues.

Le rapport du comité transformateur du CIGRÉ de 2008, indique que des progrès substantiels ont été réalisés dans le domaine des supraconducteurs. L'usage de supraconducteur à haute température fait en YBCO refroidi par azote liquide est prometteur [10] .

#### **I-7-11 Transformateurs de transmission :**

Les transformateurs de transmission sont utilisés dans le réseau de transport électrique pour l'interface entre les différents niveaux de haute tension. En Europe, ce sont surtout des transformateurs triphasés, ayant un noyau à 5 colonnes. Le système de refroidissement est en général un ONAN/ODAF. Un enroulement de réglage est connecté au primaire. Pour la redondance, deux transformateurs sont connectés en parallèle. Le couplage est normalement en étoile/ étoile afin d'économiser en isolation électrique. Un tertiaire connecté en triangle est également présent pour limiter l'impédance homopolaire.

#### **I-7-12 Transformateurs de distribution et de type s e c:**



Fig. I.10 Transformateur de distribution avec vue de l'intérieur

Les transformateurs de distribution sont les transformateurs de plus faible puissance, moins de 2 500 kVA en triphasé. Ils servent, comme leur nom l'indique, à alimenter le réseau de distribution, c'est-à-dire à transformer la moyenne tension en basse tension (230 volts). Ils sont de fait beaucoup plus nombreux que ceux de grande puissance, leur production est donc réalisée en série. C'est également un secteur très concurrentiel, les modèles sont optimisés autant que possible[7] .

La plupart utilisent de l'huile minérale pour l'isolation et le refroidissement. Leur noyau magnétique utilise des technologies semblables à celles des transformateurs de plus grande puissance avec chevauchement, acier orienté et absence totale de boulon. Les pertes fer sont d'autant plus importantes pour les transformateurs de distribution que leur charge n'est pas constante, or les pertes fer ne dépendent pas de la charge contrairement aux pertes cuivre. Pour réduire ces pertes depuis le début des années 1980, des tôles en métal dit amorphe sont utilisées dans certains transformateurs de distribution, principalement aux États-Unis. Elles ont l'avantage de générer beaucoup moins de pertes fer grâce à une épaisseur de tôle très faible et grâce à une magnétisation et démagnétisation très facile

Au niveau des enroulements, les conducteurs sont ronds, ou sous forme de feuilles. Cette dernière méthode consiste à enrouler des feuilles conductrices aussi larges que le noyau et de faire autant de tours que nécessaire. Cette méthode de fabrication a le mérite de la simplicité. On peut également évoquer les enroulements cross over : au lieu d'avoir une longue bobine en un seul bloc, on la divise en sous-blocs avec un nombre de spires constant qu'il suffit d'assembler au besoin. Les transformateurs de distribution sont souvent hermétiques afin d'éviter toute maintenance. Des changeurs de prises hors-circuit sont de plus en plus souvent montés sur ces transformateurs [7].

**Transformateurs type s e c :**

**Fig .I.11 Transformateur de distribution sec**

Un transformateur de type sec est un « transformateur pour lequel le circuit magnétique et les enroulements ne sont pas immergés dans un liquide isolant ». Concrètement, ses enroulements sont isolés à l'aide de gaz ou d'isolation solide, comme du verni, du papier ou de la résine. Cela ne change pas fondamentalement la façon dont sont conçus ces transformateurs en comparaison de ceux immergés dans l'huile. Ils ont pour

---

principal avantage d'être plus légers et surtout non inflammables. Ils sont donc tout particulièrement indiqués dans les lieux où le risque d'incendie n'est pas acceptable, comme les bureaux. L'interdiction des PCB, qui sont également ininflammables, dans les années 1970 a permis à ce type de transformateur de s'imposer. Le fait que l'air ou la résine

soient des bien moins bons conducteurs thermiques que l'huile limite leur usage à de relativement basse puissance : pour les transformateurs de distribution.

Une des grandes familles de transformateurs de type sec est les transformateurs faits en résine. L'enroulement haut tension est enrobé de résine qui l'isole alors électriquement. Une des difficultés de la technique est de maintenir l'adhérence résine/enroulement, pour avoir des coefficients de dilatation proche, les enroulements en aluminium sont préférés.

Un des défauts de cette technique est de ne pas permettre de surcharge importante, la constante de temps n'étant pas si grande que pour un transformateur immergé dans l'huile. Sa résistance au court-circuit est également limitée.

Des transformateurs isolés au gaz existent également, typiquement à l'aide de SF<sub>6</sub>. Toutefois, ce gaz n'est pas un aussi bon conducteur thermique que l'huile, est à effet de serre et le prix de ces transformateurs est nettement plus élevé.

Les transformateurs de type sec isolés avec du papier ont le défaut d'être sensibles à l'humidité. Ils ont par contre un meilleur comportement lors des surcharges et des courts-circuits, ainsi que des pertes plus réduites[6] .

### **I-7-13 Transformateurs de traction :**

Les transformateurs de traction sont utilisés dans les trains électriques. Ils ont une puissance allant de 5 à 18 MVA. Leur impédance de court-circuit est relativement élevée avec une valeur allant de 8 à 12 %. Leur courant varie très rapidement entre 0 et 2 fois le courant nominal, un changeur de prise en charge n'est pas installé, celui-ci devrait changer de prise extrêmement souvent ce qui l'userait prématurément. Leur tension est en général inférieure à 50 kV et leur fréquence est 16,7, 50 ou 60 Hz selon les cas. Ils sont construits avec 1 ou 2 colonnes bobinées dans le second cas un enroulement est connecté en série, l'autre en parallèle pour une répartition égale de la charge entre bobines[7] .

### **I.7.14 Transformateur déphaseur :**

Les transformateurs déphaseurs permettent de créer un déphasage entre leur tension d'entrée et de sortie. Cela a pour objectif de soulager un réseau surchargé. Le réseau de

transport d'électricité est maillé ; l'électricité emprunte naturellement et préférentiellement les lignes de moindre résistance électrique. Cela explique que certaines lignes peuvent être saturées alors que d'autres lignes desservant la même zone peuvent être sous-utilisées.

En « forçant » le passage de l'électricité sur une ligne électrique plutôt que sur une autre, le transformateur déphaseur permet d'optimiser les lignes les moins empruntées et donc de soulager les lignes saturées. Grâce à cette meilleure répartition des transits sur les lignes, le réseau de transport d'électricité peut être exploité au maximum de ses capacités techniques.

Sur le plan technique, un transformateur déphaseur est constitué d'un transformateur connecté en triangle et en parallèle aux systèmes d'entrée et d'un transformateur connecté en série. Les deux ont des noyaux magnétiques séparés et des cuves séparées.

Un changeur de prises permet de régler le déphasage souhaité. [9]

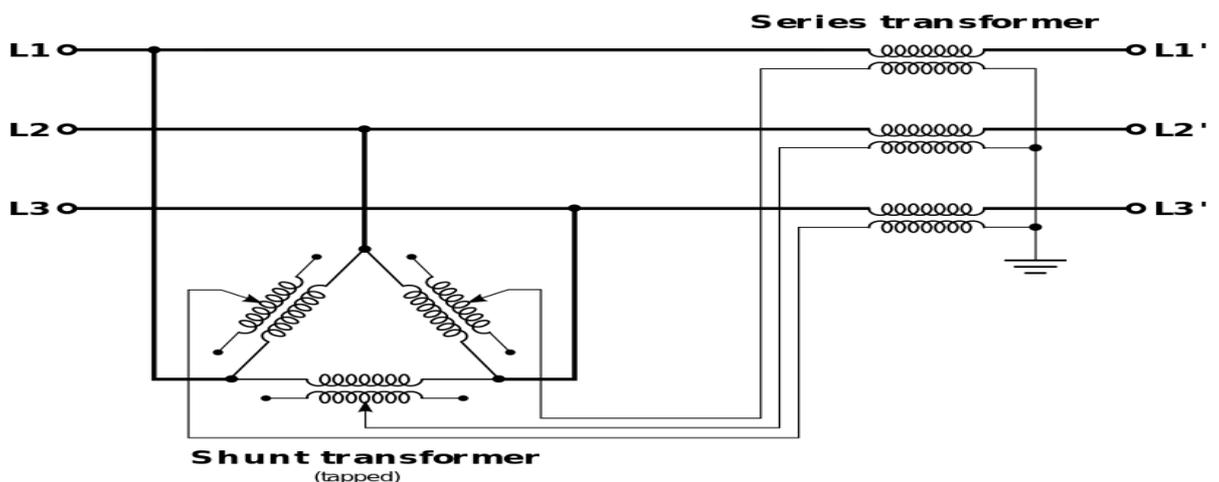


Fig. I.12 Schéma électrique d'un transformateur déphaseur

#### I-7-15 Transformateur d'évacuation d'énergie:

Les transformateurs d'évacuation d'énergie forment une catégorie à part dans les transformateurs de puissance. Ce sont des transformateurs reliés directement aux générateurs des centrales électriques, d'une puissance élevée (quelques centaines de MVA). Plus la tension est élevée côté générateur plus ce dernier a besoin d'isolation, il devient donc plus gros et plus cher. À l'inverse, une tension trop basse implique l'usage de courants très élevés. Un compromis est en général trouvé entre 11 et 30 kV. Côté ligne, la tension doit être élevée pour permettre le transport de l'énergie avec un minimum de perte, une valeur typique est de 400 kV. Les transformateurs d'évacuation d'énergie sont donc

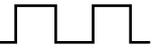
caractérisés par une tension élevée au primaire, un courant élevé au secondaire et un rapport de transformation élevé. Par ailleurs, ils doivent être dimensionnés pour pouvoir résister aux conséquences d'un déclenchement de la charge. C'est-à-dire que, si pour une raison quelconque, la charge qu'alimente le générateur tombe à 0, une surtension apparaît à ses bornes, donc au secondaire du transformateur. La norme CEI prévoit que ces transformateurs doivent pouvoir supporter une surtension de 140 % pour une période de 5 s. [10]



Fig .I.13 Le transformateur d'évacuation d'énergie

À cause de leurs fortes puissances, les transformateurs d'évacuation d'énergie sont souvent monophasés. Un transformateur triphasé dépasse en général les gabarits maximaux pour le transport [11] .

#### **I-7-16 Transformateur d'impulsion:**

Utilisé pour la commande de gâchette des thyristors, il transforme signal carré  en signal  $I_m$  pulsionnel. 

#### **I-7-17 Transformateur triphasé :**

Dans les réseaux électriques triphasés, on pourrait parfaitement envisager d'utiliser trio 3 transformateurs, un par phase. Dans la pratique, l'utilisation de transformateurs triphasés (un seul appareil regroupe les 3 phases) est généralisée. En effet cette solution permet la conception de transformateurs bien moins coûteux, avec en particulier des économies au niveau du circuit magnétique. Les transformateurs monophasés ne sont en fait guère utilisés, sauf pour de très grosses puissances apparentes (typiquement supérieure à 500

MVA), ou le transport d'un gros transformateur triphasé étant problématique, on préfère utiliser 3 unités monophasées. Indice de couplage

Les systèmes triphasés de tension sont : « triangle » (D ou d) et « étoile » (Y ou y). La première lettre de l'indice de couplage est toujours en majuscule et indique le système triphasé à tension la plus élevée ; la deuxième lettre est en minuscule et indique le système à tension la plus basse. Dans le système « étoile » le « neutre » (point centrale de l'étoile) peut être sorti au bornier du transformateur : ceci est indiqué par la présence de la lettre N (ou n) dans l'indice de couplage. [6]

**I-8 Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre une définition du transformateur, ensuite on a présenté des différents éléments essentiels qui le compose, comme :

- ✓ Circuit magnétique.
- ✓ Circuit électrique.
- ✓ Constitution interne des transformateurs.
- ✓ D'autres accessoires.
- ✓ Utilisation de transformateur.

En fin on a représenté les différents types des transformateurs par exemple transformateur déphaseur, Transformateur d'évacuation d'énergie, Transformateurs de traction.....etc.

Dans le chapitre suivant on a représenté la comportant de transformateur dans le réseau électrique

**Chapitre 2**

**Les Comportements**

**Du transformateur**

**De fréquence**

**Industriel**

**II.1 Introduction**

Les transformateurs permettent le transfert d'énergie de la source à la charge, tout en changeant la valeur de tension de la tension peut augmenter ou diminuer en fonction du niveau de tension de sortie, que nous obtenons grâce à un champ magnétique qui nous produit passage du flux entre la bobine qui se déplace de la bobine primaire à secondaire à travers le champ magnétique circuit et aussi l'air et nous lui obtenons la tension ainsi que le courant et qui représentent la puissance effective des transformateurs

Parmi les applications des transformateurs, on note :

**1. Electronique :**

- (a) alimentation à basse tension
- (b) adaptation d'impédance

**2. Electrotechnique :**

- (a) transformation de la tension pour le transport et la distribution d'électricité
- (b) alimentation à basse tension (par exemple, lampes halogènes)

**3. Mesure :**

- (a) transformateurs d'intensité de courant
- (b) transformateurs de potentiel

Il y a deux types principaux de transformateurs, le type cuirassé et le type à colonnes.

Dans le type cuirassé, on utilise un circuit magnétique à trois branches, et les enroulements sont autour de la branche centrale. Dans le type à colonnes, un circuit magnétique à deux colonnes est utilisé [13].

**II.1.1 Principe de fonctionnement**

Le transformateur est constitué de deux enroulements (ou plus) couplés sur un noyau magnétique, comme à la figure II.1.

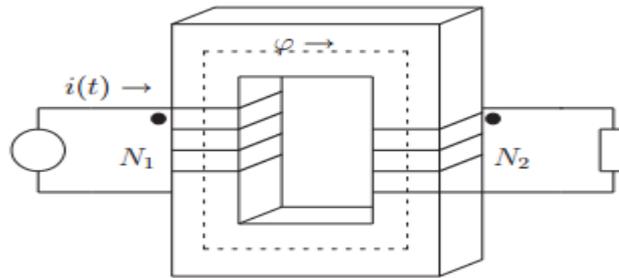


Fig. (II.1) Le transformateur

Le côté de la source est appelé le primaire. Le côté de la charge est appelé le secondaire.

Le flux  $\phi$  est le flux mutuel. Le "•" indique la polarité des tensions. Par convention, un courant

qui entre dans un "•" indique un flux positif.

Il faut remarquer qu'il n'existe aucune connexion électrique entre le primaire et le secondaire.

Tout le couplage entre les deux enroulements est magnétique.

Lorsqu'on applique une tension alternative à la source, ceci crée un flux alternatif dans

le noyau magnétique. Selon la loi de Faraday, ce flux crée des forces électromotrices dans

les bobines. La force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de tours dans la

bobine et au taux de variation du flux. Selon le rapport du nombre de tours entre le primaire

et le secondaire, le secondaire alimente la charge avec une tension différente de celle de la source [13].

### II.1.2 Transformateur idéal

Si on reprend la bobine de la figure 2.1, on définit un transformateur idéal ayant les

caractéristiques suivantes [13] :

1. La résistance dans les fils (au primaire et secondaire) est nulle.
2. Le noyau magnétique est parfait ( $\mu r = \infty, \rho = 0$ ).

Si on étudie les implications de ces simplifications, on voit que la réluctance du noyau sera Nulle, et donc il n'y a pas de fuite. Le flux est donc totalement contenu à l'intérieur du noyau.

Le couplage magnétique entre le primaire et le secondaire est parfait ; tout le flux du primaire

se rend au secondaire. [Un paramètre de couplage,  $K$  est défini dans le cas non-idéal ; pour

Un transformateur idéal  $K = 1$  ]

Le circuit équivalent du transformateur idéal est donné dans la figure II.2 :

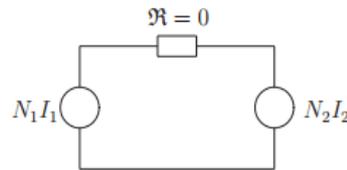


Fig.II.2 – Circuit équivalent du transformateur idéal

Selon le circuit précédent, on a :

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = R \phi = 0 \tag{II.1}$$

### II.1.3 Fonctionnement à vide

Le fonctionnement à vide du transformateur est obtenu lorsqu'on ne branche aucune

charge au secondaire. Ceci nous donne le circuit suivant :

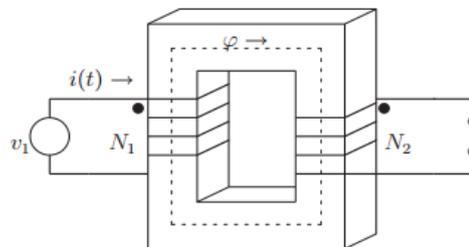


Fig.II.3 – Le transformateur à vide

Dans ce cas, on obtient la relation suivante :

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \tag{II.2}$$

Qu'on peut réarranger pour obtenir :

$$\varphi = \frac{1}{N_1} \int v_1 dt \quad (\text{II.3})$$

Le flux magnétique total couplé au secondaire est proportionnel au nombre de tours  $N_2$  :

$$\Lambda_2 = N_2 \varphi = N_2 \left\{ \frac{1}{N_1} \int v_1 dt \right\} \quad (\text{II.4})$$

La force électromotrice induite dans la bobine secondaire est donnée par la loi de Faraday :

$$e_2 = \frac{d\Lambda_2}{dt} = \frac{N_2}{N_1} \frac{d}{dt} \left\{ \int v_1 dt \right\} = \frac{N_2}{N_1} v_1 \quad (\text{II.5})$$

( $e_2$  Représente la tension aux bornes du noyau, entre les deux bornes de l'enroulement. Si la Résistance du fil de cuivre est nulle,  $e_2 = v_2$ ). La force électromotrice induite dans le primaire est :

$$e_1 = \frac{d\Lambda_1}{dt} = \frac{d}{dt} \{n_1 \varphi\} = \frac{d}{dt} \left\{ N_1 \frac{1}{N_1} \int v_1 dt \right\} = v_1 \quad (\text{II.6})$$

On obtient donc :

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{II.7})$$

On définit le rapport de transformation  $\alpha$  comme étant le rapport du nombre de tours du transformateur. Donc :

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{II.8})$$

Le circuit équivalent du transformateur à vide est (figure II.4) :

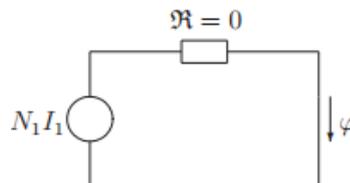


Fig.II.4 – Circuit équivalent du transformateur à vide

Le flux magnétique  $\varphi$  est différent de zéro mais la force magnétomotrice de la bobine au primaire est nulle, puisque  $N_1 I_1 = R \varphi = 0$ . Le courant dans la bobine au primaire est nul [13].

### II.1.4 Fonctionnement en charge du transformateur idéal

Lorsqu'on branche une charge au secondaire, avec une source sinusoïdale, on obtient le

Circuit suivant (figure II.5) :

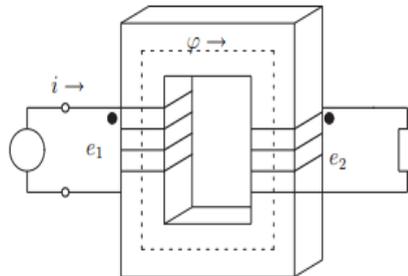


Fig.II.5 – Le transformateur en charge

On obtient le circuit équivalent suivant (figure II.6) :

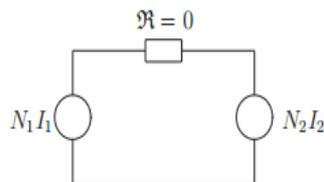


Fig.II.6 – Circuit équivalent du transformateur idéal

La réluctance est nulle parce que la perméabilité est infinie. Donc, on obtient :

$$N1I1 - N2I2 = R\phi = 0 \quad (\text{II.9})$$

D'où on retrouve :

$$\frac{I1}{I2} = \frac{N2}{N1} = \frac{1}{\alpha} \quad (\text{II.10})$$

La puissance instantanée est :

$$v1i1 = v2i2 \quad (\text{II.11})$$

### II.1.5 Modèle du transformateur idéal

Un transformateur peut être représenté par le circuit de la figure II.7 [14].

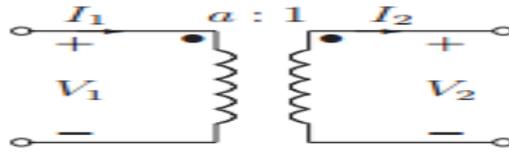


Fig.II.7 – Circuit équivalent du transformateur idéal, en charge

Dans ce circuit, on a :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (\text{II.12})$$

### II.1.6 Transformateur idéal en régime sinusoïdal permanent

Si on considère le cas où  $v_1 = V_m \cos(\omega t)$ , le flux dans le noyau sera :

$$\varphi(t) = \frac{1}{N_1} \int v_1 dt = \frac{1}{N_1} \int V_m \cos(\omega t) dt = \frac{V_m}{N_1 \omega} \sin(\omega t) \varphi_m \sin(\omega t) \quad (\text{II.13})$$

Le flux maximum dans le noyau est :

$$\varphi_m = \frac{V_m}{N_1 \omega} = 0.225 \frac{V_1}{N_1 f} \quad (\text{II.14})$$

Où  $V_1$  est la valeur efficace de  $v_1$  et  $f$  est la fréquence de  $v_1$ .

En régime sinusoïdal permanent, on peut représenter les tensions et courants par des phasors. On obtient donc les relations suivantes :

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 = \alpha V_2 \quad (\text{II.15})$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{I_2}{\alpha} \quad (\text{II.16})$$

On sait que :

$$V_2 = Z_2 I_2 \quad (\text{II.17})$$

Si on relie la tension et le courant au primaire :

$$\frac{V_1}{I_1} = \alpha^2 \frac{V_2}{I_2} = \alpha^2 Z_2 \quad (\text{II.18})$$

Ceci veut dire que l'impédance vue au primaire est  $\alpha^2 Z_2$ , ou  $\alpha^2$  fois l'impédance de la charge.

D'une autre façon, on peut dire que le transformateur a transformé l'impédance par un facteur de  $\alpha^2$  [14].

## II.2 Transformateur réel

Le transformateur réel ne possède pas des caractéristiques parfaites comme le transformateur idéal. On doit tenir compte de :

1. Noyau magnétique. Le noyau possède une caractéristique  $B(H)$  non-linéaire, avec

Hystérésis, et une perméabilité non-infinie ( $\mu r_6 = \infty$ ).

2. Bobinages. Les bobinages sont en cuivre, ayant une résistivité non-nulle ( $\rho_6 = 0$ ).

Compte tenu de ces caractéristiques, on peut déduire six sources de pertes dans le transformateur :

1. Puisque la perméabilité du noyau est non-infinie, la réluctance du noyau ne sera pas

Nulle. Il y a par conséquent des fuites de flux :

(a) au primaire

(b) au secondaire

2. On a déjà vu qu'il existait des fuites par hystérésis et des fuites par courants de Foucault.

3. La résistivité des fils de cuivre implique une résistance interne au primaire et au secondaire.

Les conséquences de ces phénomènes parasites sont :

– Le rendement du transformateur est inférieur à 100%.

– Le rapport de tension entre le primaire et le secondaire ne sera pas exactement égal au rapport du nombre de tours. La tension au secondaire variera aussi en fonction de la charge [13].

### II.2.1 Circuit équivalent du transformateur réel

Avec tous les phénomènes parasites vus dans la section précédente, on peut représenter

Ces pertes par des éléments de circuit équivalent de la figure II.8. On regardera ensuite la raison pour chacun de ces éléments

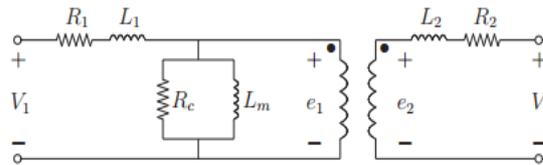


Fig.II.8 – Circuit équivalent du transformateur

### Effet de $\mu$

Puisque la perméabilité du noyau est finie, la réluctance sera non-nulle. Par conséquent,

Pour créer le flux  $\varphi$  dans le noyau, il faut un courant  $im$ . Ceci peut être représenté par une Inductance  $Lm$ , qu'on appelle une inductance magnétisante.

### Pertes dans le noyau

On représente les pertes dans le noyau par une résistance  $Rc$  en parallèle avec l'inductance Magnétisante  $Lm$ .

Fuites au primaire et secondaire

On représente ces pertes par des inductances  $L1$  et  $L2$ , pour le primaire et le secondaire, Respectivement.

Résistance des fils

On représente la résistance des fils de cuivre par des résistances  $R1$  et  $R2$  pour le primaire Et le secondaire, respectivement [14].

### II.2.2 Transformateur en régime sinusoïdal permanent

Si on branche une charge au secondaire, on a le circuit suivant (figure II.9) :

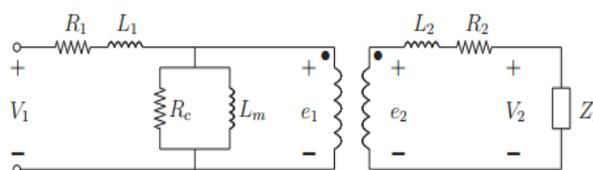


Fig.II.9 – Circuit équivalent du transformateur avec charge au secondaire

Pour faciliter l'analyse du circuit, on ramène les impédances du secondaire au primaire. On obtient alors le circuit de la figure II.10.

De ce circuit, on définit :

$$X'2 = \alpha^2 X2 \quad R'2 = \alpha^2 R2 \quad I'2 = \frac{I2}{\alpha} \quad V'2 = \alpha^2 V2 \quad (II.19)$$

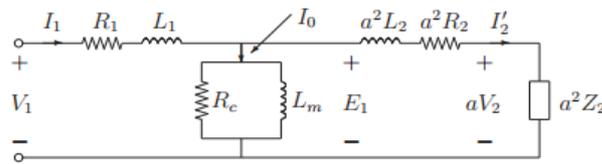


Fig.II.10 – Circuit équivalent du transformateur vu du primaire.

On obtient alors les relations suivantes :

$$V1 = R1 I1 + jX1 I1 + E1$$

$$E1 = R'2 I'2 + jX'2 I'2 + V'2$$

$$I0 = Ic + Im$$

$$I1 = I0 + I'2$$

On peut représenter ces relations par un diagramme vectoriel (figure II.11)

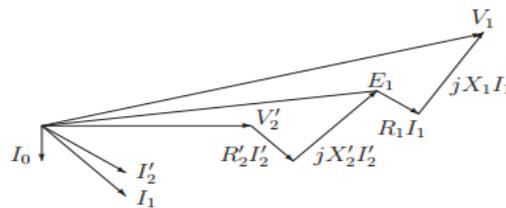


Fig.II.11 – Diagramme vectoriel des tensions et courants du transformateur.

Dans un transformateur typique, le courant **I0** est seulement 2 à 4% de la valeur du courant **I1**. Pour simplifier l'analyse, on peut donc négliger le courant **I0**. On va donc supposer que le noyau a des pertes Fer négligeables et une perméabilité élevée [14].

On obtient alors le circuit suivant :

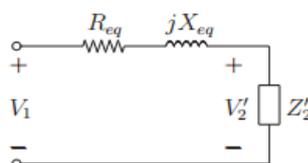


Fig.II.12 – Circuit équivalent simplifié du transformateur.

Ou

$$R_{eq} = R_1 + R'_2 = R_1 + \alpha^2 R_2 \quad (II.19)$$

$$X_{eq} = X_1 + X'_2 = X_1 + \alpha^2 X_2 \quad (II.20)$$

On obtient alors les relations suivantes :

$$V_1 = R_{eq}I_1 + jX_{eq}I_1 + V'_2 \quad (II.21)$$

$$I'_2 = I_1 \quad (II.22)$$

Et ainsi un diagramme vectoriel simplifié

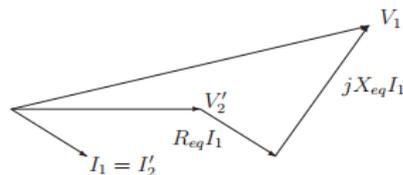


Fig.II.13 – Diagramme vectoriel des tensions et courants du transformateur simplifié.

### II.2.3 Notion de charge d'un transformateur

La charge d'un transformateur est définie en fonction du courant au secondaire, **I2**. La différence entre la charge d'un transformateur et l'impédance de charge d'un transformateur est donnée dans le tableau suivant [13] :

Charge	Courant au secondaire   <b>I2</b>	Impédance de charge   <b>Z2</b>
Pleine charge	<b>I2</b> (nominal)	<b>Z2</b> (nominal)
3/4 charge	0.75 <b>I2</b> (nominal)	1.33 <b>Z2</b> (nominal)
1/2 charge	0.50 <b>I2</b> (nominal)	2 <b>Z2</b> (nominal)
1/4 charge	0.25 <b>I2</b> (nominal)	4 <b>Z2</b> (nominal)
Sans charge (à vide)	0	$\infty$

Tension au secondaire en fonction de la charge

Dans un transformateur, la tension au secondaire varie selon la nature de la charge.

- Charge résistive : la tension  $V'2$  et le courant  $I'2$  sont en phase.
- Charge inductive : le courant  $I'2$  est en retard par rapport à la tension  $V'2$ .
- Charge capacitive : le courant  $I'2$  est en avance par rapport à la tension  $V'2$ .

#### II.2.4 Rendement d'un transformateur

Le rendement ( $\eta$ ) d'un transformateur est défini comme le rapport de la puissance active au secondaire sur la puissance active au primaire.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{II.23})$$

Ceci donne :

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_1 I_1 \cos \varphi_1} = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + \text{Pertes (Fer)} + \text{Pertes (Cuivre)}} \quad (\text{II.24})$$

$$= \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + \frac{V_1^2}{R_c} + \text{Req} (I'2)^2} \quad (\text{II.25})$$

$$= \frac{V'2 I'2 \cos \varphi_2}{V'2 I'2 \cos \varphi_2 + \frac{V_1^2}{R_c} + \text{Req} (I'2)^2} \quad (\text{II.26})$$

Pour trouver le rendement maximum, on dérive  $\eta$  par rapport au courant  $I'2$ , on trouve que

$$: \quad \frac{d\eta}{dI'2} = 0 \text{ lorsque } \frac{V_1^2}{R_c} = \text{Req} (I'2)^2 \quad (\text{II.27})$$

Ceci veut dire que le rendement d'un transformateur est maximum lorsque les pertes Fer sont égales aux pertes Cuivre

#### II.2.5 Facteur de régulation d'un transformateur

Le facteur de régulation d'un transformateur indique la variation relative de la tension au secondaire en fonction de la charge.

$$\text{reg} = \frac{V_2(\text{à vide}) - V_2(\text{charge nominale})}{V_2(\text{charge nominale})} \quad (\text{II.28})$$

Dans certains cas, on fixe la tension au secondaire à sa valeur nominale, et alors la tension au primaire est plus élevée que la valeur nominale. Dans ce cas, le facteur de régulation est

:

$$\text{reg} = \frac{V1(\text{charge}) - V1(\text{\`a vide})}{V1(\text{\`a vide})} \quad (\text{II.29})$$

### II.3 Détermination des paramètres du transformateur

On peut déterminer les paramètres physiques d'un transformateur à l'aide de trois tests Expérimentaux [14].

#### a. Essai à vide

On applique la tension nominale au primaire du transformateur.

On mesure :

- $V_{1v}$ , La tension au primaire (avec un voltmètre AC)
- $i_{1v}$ , Le courant à vide (avec un ampèremètre AC)
- $P_{1v}$ , La puissance dissipée à vide (avec un wattmètre AC)

A l'aide de ces mesures, on peut déterminer :

- La polarité du transformateur.

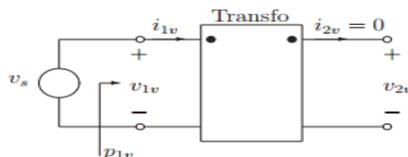


Fig.II.14 – Essai à vide d'un transformateur

– si  $V_{1v}$  et  $V_{2v}$  sont en phase, la polarité est bonne.

– sinon, inverser.

- rapport de transformation  $\alpha$ .

$$\alpha = \frac{e_1}{e_2} = \frac{e_1}{V_2} = \frac{V_{1v}}{V_{2v}} \quad (\text{II.30})$$

- valeurs de  $X_m$  et  $R_f$

– On suppose que  $X_m \gg X_1$  et  $R_c \gg R_1$ , donc :

$$P1v = \frac{v1v^2}{Rc} \Rightarrow Rc = \frac{v1v^2}{P1v} \quad (\text{II.31})$$

$$- S1v = v1v \cdot i1v$$

$$Q1v = \sqrt{S1v^2 - P1v^2} = \sqrt{(v1v \cdot i1v^*) - P1v^2} \quad (\text{II.32})$$

$$Q1v = \frac{v1v^2}{Xm} \Rightarrow Xm = \frac{v1v^2}{\sqrt{(v1v \cdot i1v) - P1v^2}} \quad (\text{II.33})$$

### b. Essai en court-circuit

On ajuste la tension  $v_s$  pour obtenir un courant  $i1cc$  qui est le courant nominal au primaire.

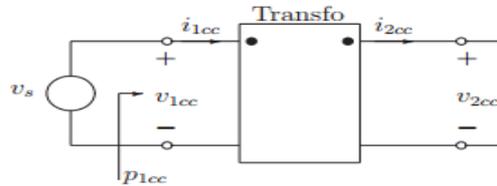


Fig.II.15 – Essai en court-circuit d'un transformateur

On mesure :

- $V1cc$ , La tension au primaire (avec un voltmètre AC)
- $i1cc$ , Le courant au primaire (avec un ampèremètre AC)
- $P1cc$ , La puissance dissipée à vide (avec un wattmètre AC)

Pour obtenir les paramètres, on suppose que  $Rc$  et  $Xm$  ont des effets négligeables. On obtient alors :

- Les résistances  $Req = R1 + \alpha^2 R2$ .

$$P1cc = i1cc^2 \cdot Req \Rightarrow Req = \frac{P1cc}{i1cc^2} \quad (\text{II.34})$$

- Les réactances équivalentes  $Xeq = X1 + \alpha^2 X2$ .

$$Q1cc = \sqrt{S1cc^2 - P1cc^2} = \sqrt{(v1cc \cdot i1cc)^2 - P1v^2} \quad (\text{II.35})$$

$$Q_{1cc} = i_{1cc}^2 \cdot X_{eq} \Rightarrow X_{eq} = \frac{\sqrt{(V_{1cc} \cdot i_{1cc})^2 - P_{1cc}^2}}{i_{1cc}^2} \quad (\text{II.36})$$

On suppose habituellement que  $X_1 = X'_2$ .

### c. Essai en courant continu

Si on applique une tension  $V_c$  continue au primaire du transformateur, on obtient que [16]:

$$R_1 = \frac{V_c}{i_1} \quad (\text{II.37})$$

Où  $i_1$  est le courant au primaire. On peut alors trouver  $R'_2$  :

$$R'_2 = R_{eq} - R_1 \quad (\text{II.38})$$

### Conclusions :

Nous avons détaillé dans ce chapitre à la fois les lois fondamentales électrotechnique et transformateur idéal et transformateur réel. Et les lois régissant les transferts de tension (à vide ou une charge) et les lois régissant les transferts de tension par circuit primaire à circuit secondaire, nous allons maintenant utiliser tous ces outils de mathématiques et de la physique et des relations afin d'assurer la distribution de l'énergie du transformateur au réseau électrique d'une bonne manière et une faible perte, nous étudions et sur les transformateur et faire une expérience sur eux et ce dans le chapitre III .

# **Chapitre3**

## **Les comportements Du transformateur**

### **En Haute Fréquence**

### III.1. Introduction

Les transformateurs sont d'un emploi très répandu dans plusieurs domaines, de la basse puissance dans l'électronique jusqu'à la haute puissance dans le réseau de transport. De ce fait le comportement de ces transformateurs à la fréquence industrielle est bien connu dans le monde que ce soit industriel ou pédagogique par contre le comportement est moins connu si on s'éloigne de cette fréquence industrielle. On peut avoir un comportement bizarre d'une inductance qui se comporte comme une capacitance au-delà de sa fréquence de résonance. Les applications des transformateurs en haute fréquence sont très répandues surtout dans l'électronique de commande et de réglage. Ces applications partent du domaine de la puissance 'commande de machines industrielles de puissance dans les navires et les sous-marins' jusqu'au domaine de la faible puissance 'électronique de commande et de réglage'.

Pour cela, il s'est avéré pour notre part autant qu'électrotechnicien de s'aventurer dans le domaine des hautes fréquences pour voir réellement ce comportement et laisser aux intéressés une base de données qui sera utile que ce soit pour le domaine pédagogique qu'industriel.

Nous avons utilisé trois types de transformateurs : le premier transformateur est d'impulsion à base de ferrite appelé T1, les deux autres sont des transformateurs à base de tôles en fer-silicium feuilletés T2, T3. La description de chaque transformateur est donnée par la suite.

### III.2. Descriptions des transformateurs utilisés

#### III.2.1. Le transformateur T1

Le transformateur d'impulsions est utilisé pour la commande de thyristors, triac et transistors. Il présente par rapport à l'opto-coupleur, les avantages suivants:

- fonctionnement possible à fréquence élevée,
- simplification du montage,
- possibilité de fournir un courant important,
- bonne tenue en tension.

Une bonne utilisation du transformateur implique une absence de saturation du fer:  $\Phi$  et  $i_0$  doivent toujours être inférieurs à  $\Phi_s$  et  $I_s$ . Ceci entraîne un respect du "produit V.T" (constante donnée par le constructeur) et une démagnétisation totale entre chaque cycle de fonctionnement (diode, diode Zener, V.D.R.).

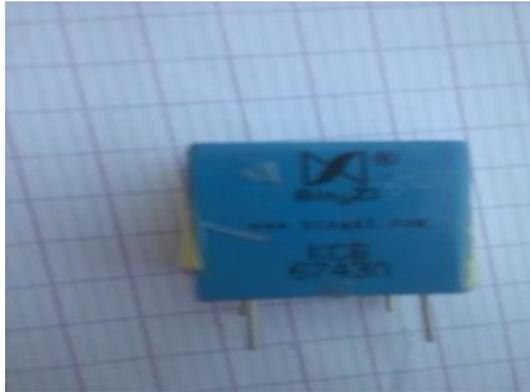
---

Le transformateur utilisé est représenté dans la figure suivante et les dimensions géométrique sont :

Hauteur=3cm

Longueur=3 cm

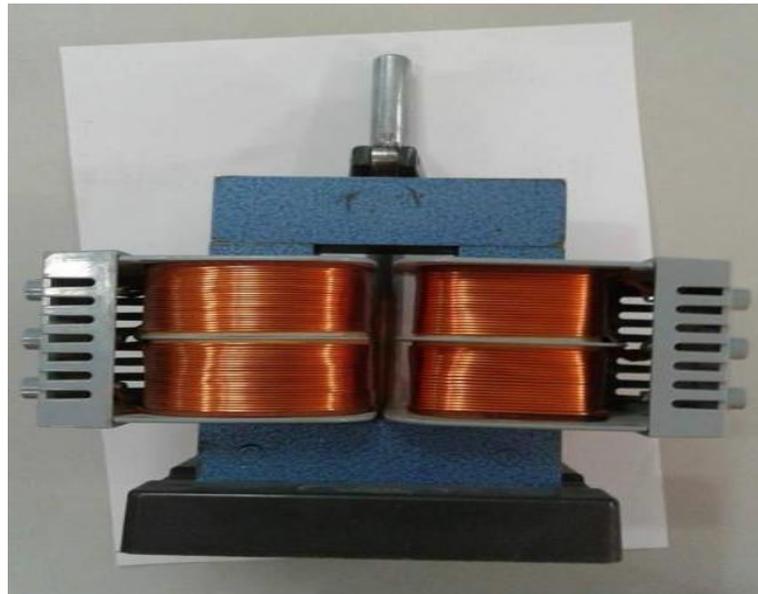
Largeur=3cm



**Fig.III.2.**Le transformateur d'impulsions

### III.2.2. Le transformateur T2

Le transformateur T2 est un transformateur utilisé à des fins pédagogiques dans l'université de Biskra. Il a été utilisé pour les applications des convertisseurs d'électronique de puissance soit comme une inductance de lissage ou de filtrage de courant à haute fréquence soit pour les alimentations à découpage variable jusqu'au 1 kHz. Le transfo T2 est représenté dans la figure suivante :



**Fig.III.2** Le transformateur de la puissance T2

Le transfo T2 est composé de deux bobines qui sont utilisées soit pour une disposition abaisseur ou eu disposition élévateur et un circuit magnétique formé de deux éléments un en forme de I et un en forme de U. Les caractéristiques de chaque élément sont représentées comme suit :

**La Bobine 1 :**

Les caractéristiques de la bobine 1 sont :

$R_1=0.8\text{ohm}$  ,

$I_1= 4\text{A}$ ,

$L_1=2\text{ mH}$ ,

Spires:  $s=300$



**La bobine2 :**

Les caractéristiques de la bobine 1 sont :

$R_2=2,5 \text{ ohm}$

$I_2=2\text{A}$

$L_2=9 \text{ mH}$

Spires  $s=600$

**Circuit électromagnétique :****La forme U :**

Les dimensions géométrique sont :

Hauteur=3cm ; Longueur=10.5cm ; Largeur =3cm

Dimensions intérieures : Hauteur=2.8cm ; Longueur=7.5cm ; Largeur =4.1cm

Matériel de fabrication : Ferromagnétique

**La forme I :**

Les dimensions géométrique sont :

Hauteur=3cm ; Longueur=10 cm ; Largeur =3cm

Matériel de fabrication : Ferromagnétique

### III.2.2. Le transformateur T3

Le transformateur T3 est un transformateur utilisé à des fins pédagogiques dans l'institut de formation professionnelle de Tôlga. Il peut être utilisé pour les applications des convertisseurs d'électronique de puissance soit comme une inductance de lissage ou filtrage de courant à haute fréquence soit pour les alimentations à découpage variable jusqu'à 1 kHz. Le transfo T2 est représenté dans la figure :



**Fig.III.3** Le transformateur de la puissance T3

Le transfo T3 est composé de deux bobines qui sont utilisées soit pour une disposition abaisseur ou eu disposition élévateur et un circuit magnétique formé de deux éléments un en forme de I et un en forme de U. Les caractéristiques de chaque élément sont représentées comme suit :

#### La Bobines 1:

Les caractéristiques de la bobine 1 sont :

**$R_1=0.8\text{ohm}$ ,  $I_1= 0.45\text{A}$ ,  $L_1=40\text{ mH}$  ,Spires:  $s_1=1100$**



**La Bobines 2:** **$R_2=2,5\text{ohm}$ ,  $I_2=0.8\text{A}$ ,  $L_2=12\text{ mH}$ , Spires:  $s_2=600$** **Circuit électromagnétique :****La forme U :**

Les dimensions géométrique sont :

Hauteur=3.5cm ; Longueur=9.5cm ; Largeur =3.5cm

Dimensions intérieures : hauteur=2.8cm ; Longueur=7.5cm ; Largeur =4.1cm

Matériel de fabrication : Ferromagnétique

**La forme I :**

Les dimensions géométrique sont :

Hauteur=3.5cm ; Longueur=11 cm ; Largeur =3 cm

Matériel de fabrication : Ferromagnétique



**Montage (1) :**

Le montage (1) du transformateur d'impulsion T1

Les expériences effectuées portent sur l'évaluation de la tension secondaire efficace à vide et en charge sous l'effet de la variation de la fréquence

**III.3. La valeur de tension de sortie (à vide)**

Les expériences effectuées ont porté sur l'évaluation de la tension secondaire efficace à vide sous l'effet de la variation de la fréquence

**III.3.1. Transformateur d'impulsion T1****III.3.1.1. le transformateur en direct**

Le transformateur T1 permet de séparer la commande de la puissance donc avec un rapport de transformation unitaire. La première utilisation est directe et la seconde est inverse par inversion des bornes. Pour le transfo T1 pour la position directe, les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10Vmax sont indiqués dans le tab.III.1 La **fig. III.1** montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	90	100	110	120	250
V2	<b>0.253</b>	0.213	0.171	0.229	0.186	0.310	0.288	0.310	0.291
f	300	350	400	450	500	550	600	650	700
V2	0.320	0.320	0.300	0.307	0.306	0.309	0.305	0.362	0.356
f	800	900	1000	2000	<b>3000</b>	4000	5000	6000	7000
V2	0.321	0.387	0.352	0.338	<b>0.686</b>	0.676	0.436	0.420	0.397
f	8000	9000	10000	20000	30000	40000	50000	60000	70000
V2	0.391	0.383	0.412	0.444	0.423	0.424	0.420	0.438	0.439
f	80000	90000	100000	110000	130000	150000	170000	<b>200000</b>	
V2	0.442	0.457	0.462	0.466	0.431	0.460	0.454	<b>0.451</b>	

Tableau.III.1- La valeur de tension secondaire du transformateur T1 (Position directe)

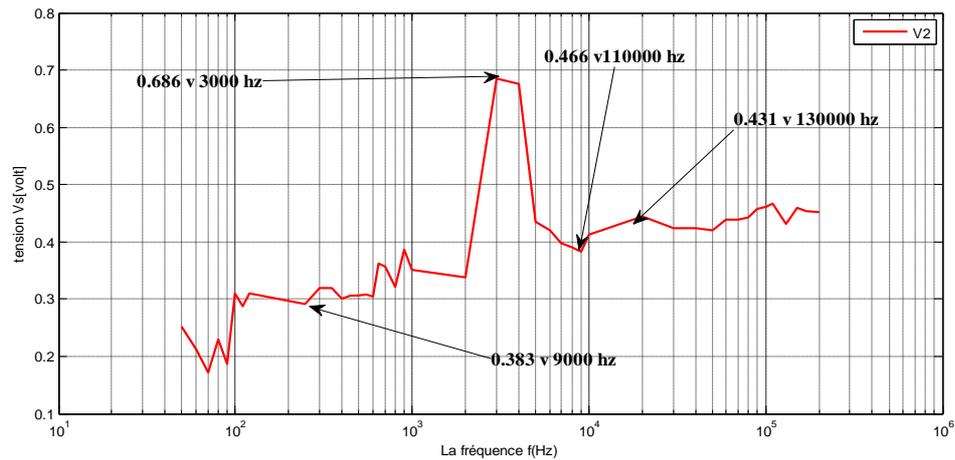


Fig.III.1: la tension V2 du transformateur T1.

On peut remarquer que la tension secondaire est égale 0.253 V à 50 Hz. Puis elle augmente jusqu'à la fréquence 3000 Hz pour atteindre la valeur de 0.686 V puis elle diminue brusquement et se stabilise à 0.4 V jusqu'au 200 kHz. La valeur maximale atteinte est liée à un phénomène de résonance qui est lié étroitement à l'ajout de capacités parasites. La théorie de ce phénomène sort de l'objectif de ce travail.

### III.3.1.2. le transformateur en indirecte

Le transformateur T1 permet de séparer la commande de la puissance donc avec un rapport de transformation unitaire. La première utilisation est indirecte et la seconde est inverse par inversion des bornes.

Pour le transformateur T1 pour la position indirecte, les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10Vmax sont indiqués dans le tableau.III.2 La figure III.2 montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	90	100	110	120	250
V3	<b>0.271</b>	0.286	0.302	0.310	0.412	0.440	0.480	0.455	0.637
f	300	350	400	<b>450</b>	500	550	600	650	700
V3	0.638	0.701	0.749	<b>0.756</b>	0.736	0.554	0.462	0.489	0.495
f	800	900	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
V3	0.506	0.487	0.477	0.481	0.488	0.477	0.484	0.492	0.483
f	8000	9000	10000	20000	30000	40000	50000	60000	70000
V3	0.489	0.487	0.476	0.483	0.489	0.488	0.492	0.493	0.531
f	80000	90000	100000	110000	130000	150000	170000	<b>200000</b>	
V3	0.540	0.386	0.396	0.389	0.393	0.394	0.394	<b>0.395</b>	

Tableau.III.2- La valeur de tension secondaire du transformateur T1 (Position indirecte)

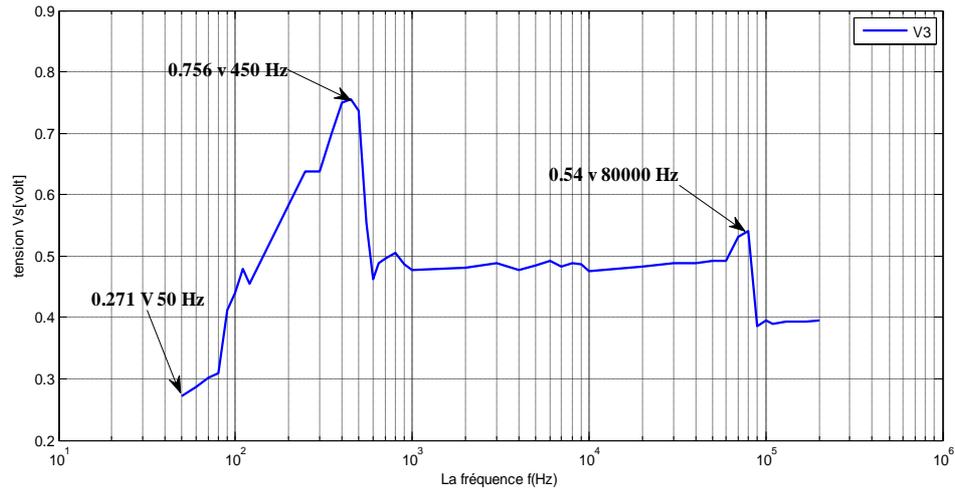


Fig.III.2 la tension V3 du transformateur T1.

On peut remarquer d'après cette figure que la tension secondaire est égale 0.271 V à 50 Hz puis elle augmente jusqu'à la fréquence 450 Hz pour atteindre la valeur de 0.756 V puis elle diminue brusquement et se stabilise à 0.5 V jusqu'au 60 kHz. Puis elle augmente légèrement puis elle diminue rapidement jusqu'à la fréquence 90 kHz. Après elle se stabilise à 0.4 V jusqu'à la fréquence 200 kHz. La valeur maximale atteinte est liée à un phénomène de résonance qui est lié étroitement à l'ajout de capacités parasites. La théorie de ce phénomène sort de l'objectif de ce travail.

### III.3.2. La valeur de la tension de transformateur de puissance T2

Les expériences effectuées portent sur l'évaluation de la tension secondaire efficace à vide et en charge sous l'effet de la variation de la fréquence

#### Montage (2) :



Le montage (2) de transformateur de la puissance T2

### III.3.2.1. La valeur de la tension $v_4$ du transformateur T2 en disposition élévateur

Pour le transformateur T2 pour la position élévateur, les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.3

La figure **III.3** montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	90	100	120	150	200
V4	<b>11.52</b>	11.74	11.91	12.04	12.15	12.23	12.36	12.49	12.61
f	250	300	350	400	500	550	600	700	800
V4	12.67	12.71	12.73	12.74	12.76	12.76	12.77	12.78	12.79
f	900	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
V4	12.80	12.81	13.15	13.80	14.71	15.80	17.05	18.40	19.84
f	9000	10000	20000	30000	40000	<b>41000</b>	42000	45000	47000
V4	22.6	24.4	45.8	68.8	90.4	<b>98.1</b>	86.4	69	52.3
f	48000	50000	55000	60000	70000	80000	90000	<b>100000</b>	
V4	43.8	28.9	7.2	1.4	0.2	0.1	0	<b>0</b>	

Tableau.III.3- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position élévateur)

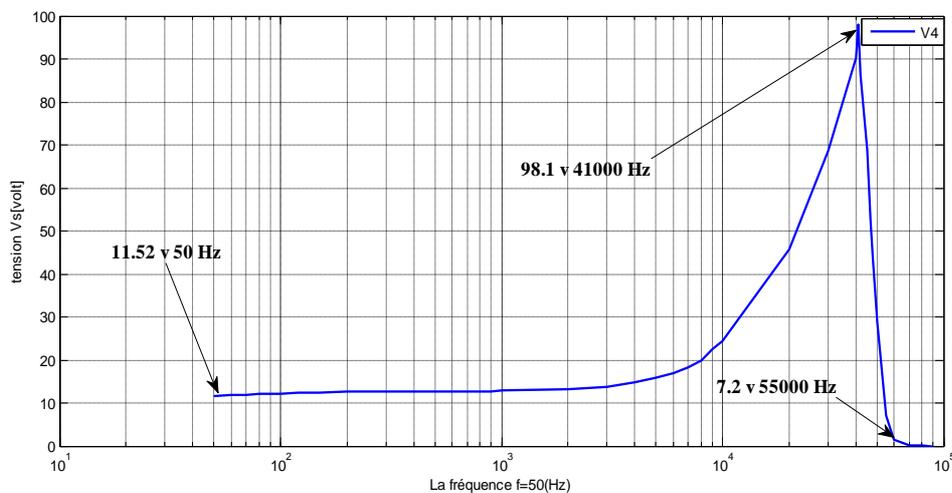


Fig.III.3 la tension V4 du transformateur T2 (Position élévateur).

On peut remarquer d'après cette figure que le transformateur 2 joue le rôle d'un transformateur élévateur. La tension secondaire qui doit être égale à 20 V est diminuée à cause des pertes et elle est égale 11.52 V. Le transformateur élévateur joue le rôle d'un élévateur jusqu'à la fréquence 3 kHz après la tension secondaire augment jusqu'à devenir égale à la tension primaire et la notion du rapport de transformation disparaît et devient égale à double à 9.81 fois est pour atteindre 40 kHz. Après cette dernière la tension secondaire diminue rapidement jusqu'à s'annuler à la fréquence 100 kHz après cette

fréquence le transfo devient inutilisable. Il faut signaler toujours que la valeur maximale atteinte est reliée à un phénomène de résonance qui est lié étroitement à l'ajout de capacités parasites.

### III.3.2.2. La valeur de la tension v5 du transformateur T2 en disposition abaisseur

Pour le transformateur T2 pour la position abaisseur, les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.4 La figure III.4 montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	90	200	300	400	500
V5	<b>3.22</b>	3.24	3.24	3.24	3.24	3.23	3.22	3.21	3.20
f	600	800	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
V5	3.19	3.18	3.18	3.24	3.38	3.59	3.83	4.11	4.40
f	8000	9000	10000	<b>20000</b>	30000	40000	50000	60000	80000
V5	4.71	5.02	5.33	<b>8.08</b>	8.77	7.22	4.99	3.65	2.45
f	90000	100000	200000	300000	<b>400000</b>				
V5	1.68	0.66	0.02	0.01	<b>0</b>				

Tableau.III.4- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position abaisseur)

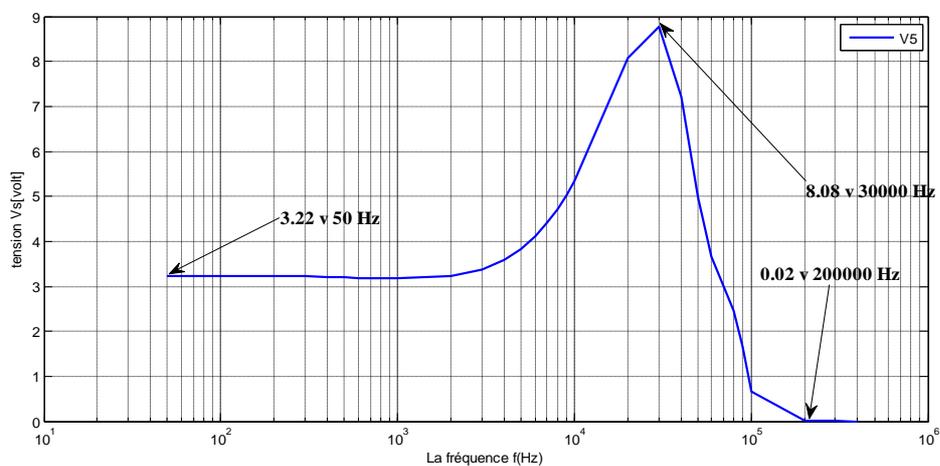


Fig.III.4 la tension V5 du transformateur T2 (Position abaisseur).

On peut remarquer d'après cette figure que le transformateur 2 joue le rôle d'un transformateur abaisseur. La tension secondaire qui doit être égale à 5 V est diminuée à cause des pertes et elle est égale 3.22 V. Le transformateur abaisseur joue le rôle d'un abaisseur jusqu'à la fréquence 10 kHz après la tension secondaire augment jusqu'à devenir égale à la tension primaire et la notion du rapport de transformation disparaît et devient égale à 0.808 proche 1 à 20 kHz. Après cette dernière la tension secondaire diminue

rapidement jusqu'à s'annuler à la fréquence 50 kHz après cette fréquence le transfo devient inutilisable. Il faut signaler toujours que la valeur maximale atteinte est reliée à un phénomène de résonance qui est lié étroitement à l'ajout de capacités parasites.

### III.3.3. La valeur de la tension du transformateur de puissance T2

#### III.3.3.1. La valeur de la tension $v_6$ du transformateur T2 en disposition élévateur

Pour le transformateur T2 pour la position élévateur, les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.5 La figure III. 5 montres la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	90	100	120	150	200
V6	<b>13.94</b>	14.99	15.84	16.56	17.17	17.70	18.56	19.3	20.4
f	250	300	350	400	500	550	600	700	800
V6	21.1	21.6	21.9	22.2	22.6	22.7	22.8	23	23.2
f	900	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
V6	23.3	23.4	24.6	26.2	28.4	30.9	33.8	36.90	40.1
f	9000	10000	20000	30000	<b>40000</b>	41000	42000	45000	47000
V6	43.5	47.1	88.5	141.7	<b>173.1</b>	167.7	160.3	127.7	102.5
f	49000	50000	55000	57000	59000	60000	70000	<b>80000</b>	
V6	79.6	69.7	29.8	18.5	10.7	7.9	0.6	<b>0</b>	

Tableau.III.5- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position élévateur)

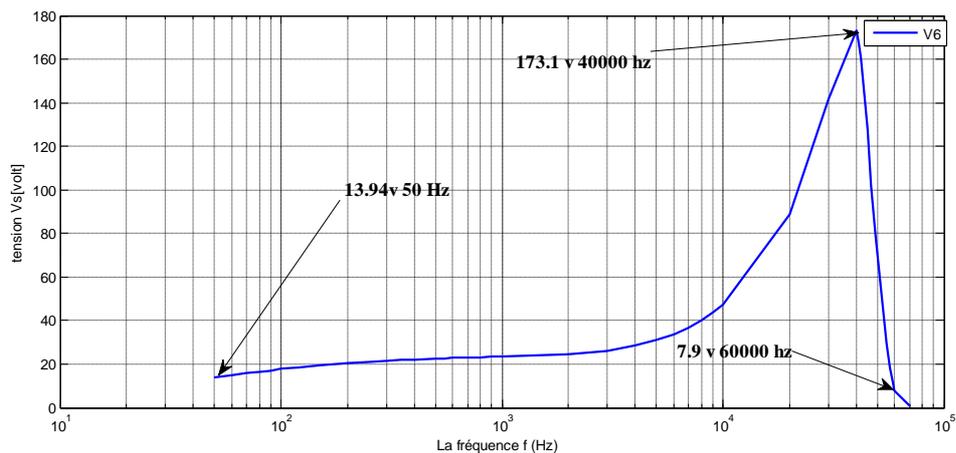


Fig.III.5 la tension V6 du transformateur T2 (Position élévateur).

On peut remarquer d'après cette figure que le transformateur 2 joue le rôle d'un transformateur élévateur. La tension secondaire qui doit être égale à 20 V est diminuée à cause des pertes et elle est égale 13.94 V. Le transformateur élévateur joue le rôle d'un élévateur jusqu'à la fréquence 2 kHz après la tension secondaire augment jusqu'à devenir

égale à la tension primaire et la notion du rapport de transformation disparaît et devient égale à double à 17.31 fois est pour atteindre 40 kHz. Après cette dernière la tension secondaire diminue rapidement jusqu'à s'annuler à la fréquence 80 kHz après cette fréquence le transfo devient inutilisable.

### III.3.3.2. La valeur de la tension $v_7$ du transformateur T2 en disposition abaisseur

Pour le transformateur T2 pour la position abaisseur, les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.6

La figure III.6 montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	90	100	120	150	200
V7	<b>5.4</b>	5.6	5.7	5.8	5.8	5.9	6	6.1	6.23
f	350	400	700	1000	2000	3000	4000	5000	6000
V7	6.24	6.23	6.24	6.36	6.63	7.01	7.48	8	8.55
f	7000	8000	9000	10000	<b>20000</b>	30000	40000	41000	43000
V7	9.13	9.72	10.31	15.47	<b>17.77</b>	16.7	16.44	15.94	15.41
f	45000	49000	50000	60000	70000	80000	90000	100000	110000
V7	14.85	14.30	14.05	11.9	10.16	8.42	5.77	2.63	0.68
f	120000	150000	<b>200000</b>						
V7	0.14	0	<b>0</b>						

Tableau.III.6- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position abaisseur)

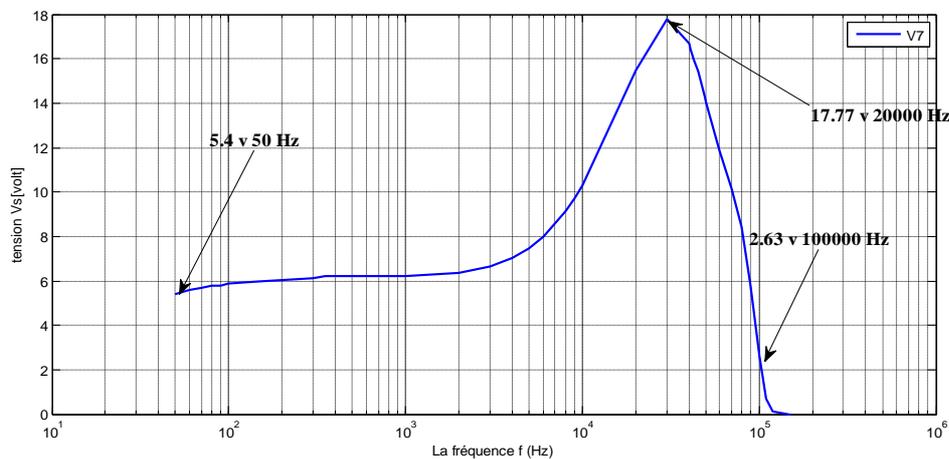


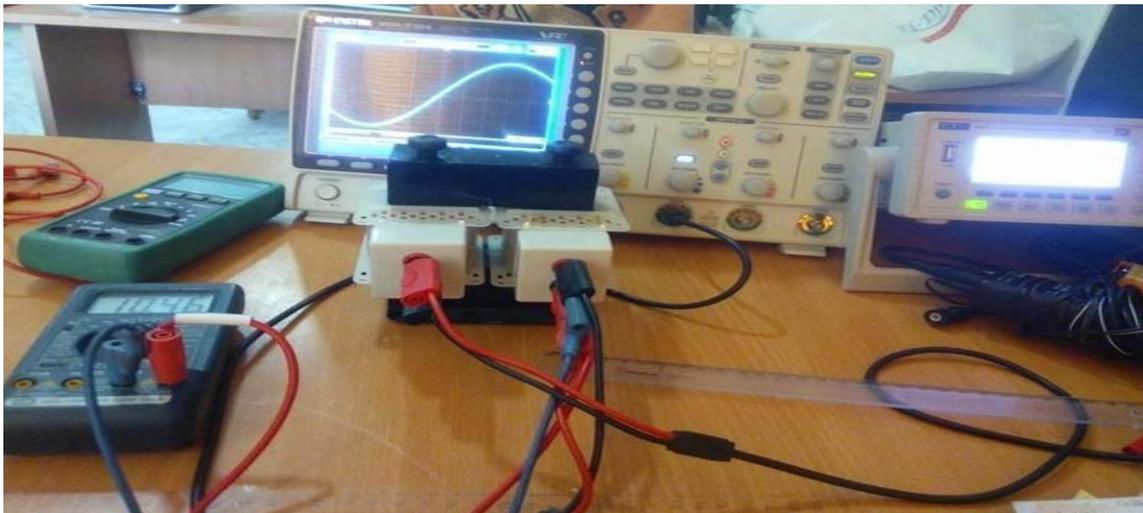
Fig.III.6 la tension V7 du transformateur T2 (Position abaisseur).

On peut remarquer d'après cette figure que le transformateur 2 joue le rôle d'un transformateur abaisseur. La tension secondaire qui doit être égale à 5 V est diminuée à cause des pertes et elle est égale 5.4 V. Le transformateur abaisseur joue le rôle d'un abaisseur jusqu'à la fréquence 2 kHz après la tension secondaire augmente jusqu'à devenir égale à la tension primaire et la notion du rapport de transformation disparaît et devient

égale à 1.78 proche 2 à est devenue égale à quatre fois doublé pour atteindre 30 kHz. Après cette dernière la tension secondaire diminue rapidement jusqu'à s'annuler à la fréquence 150 kHz après cette fréquence le transfo devient inutilisable. Il faut signaler toujours que la valeur maximale atteinte est reliée à un phénomène de résonance qui est lié étroitement à l'ajout de capacités parasites.

### III.3.4. La valeur de la tension de transformateur de puissance T3

#### Montage (3)



Le montage (3) de transformateur de la puissance T3

#### III.3.4.1. La valeur de la tension v8 du transformateur T3 en disposition élévateur :

Pour le transformateur T3 pour la position élévateur, les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.7 La figure III.7 montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

F	<b>50</b>	80	100	120	150	200	250	300	400
V8	<b>11.44</b>	11.47	11.47	11.45	11.42	11.35	11.28	11.20	11.04
F	500	550	600	700	800	900	1000	2000	3000
V8	10.89	10.81	10.74	10.59	10.46	10.34	10.23	9.59	9.57
F	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	20000	21000
V8	9.93	10.7	11.69	12.88	14.36	16.18	18.38	<b>28.9</b>	23.9
F	23000	25000	27000	29000	30000	35000	40000	<b>45000</b>	<b>50000</b>
V8	18.94	15.04	12.05	9.62	8.55	4.06	1.04	0.14	<b>0</b>

Tableau.III.7- La valeur de tension secondaire du transformateur T3 (Position élévateur)

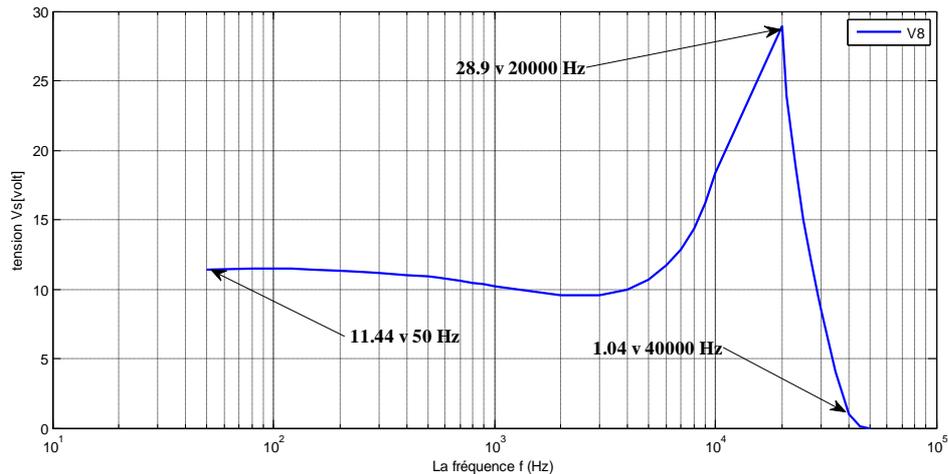


Fig.III.7 la tension V8 du transformateur T3 (Position élévateur).

On peut remarquer d'après cette figure que le transformateur 3 joue le rôle d'un transformateur élévateur. La tension secondaire qui doit être égale à 20 V est diminuée à cause des pertes et elle est égale 11.44 V. Le transformateur élévateur joue le rôle d'un élévateur jusqu'à la fréquence 1 kHz après la tension secondaire augment jusqu'à devenir égale à la tension primaire et la notion du rapport de transformation disparaît et devient égale à trois fois est pour atteindre 20 kHz. Après cette dernière la tension secondaire diminue rapidement jusqu'à s'annulée à la fréquence 50 kHz après cette fréquence le transfo devient inutilisable.

### III.3.4.2. La valeur de la tension v9 du transformateur T3 en disposition abaisseur

Pour le transformateur T3 pour la position abaisseur, les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.8 La figure III. 8 montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	80	100	120	150	200	250	300	400
V9	<b>3.52</b>	3.51	3.50	3.49	3.48	3.46	3.43	3.40	3.36
f	500	550	600	700	800	900	1000	2000	3000
V9	3.31	3.29	3.26	3.21	3.18	3.12	3.09	2.82	2.73
f	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	<b>20000</b>	30000
V9	2.83	2.96	3.12	3.31	3.51	3.73	6.52	<b>10.44</b>	9.71
f	40000	41000	43000	45000	47000	49000	50000	55000	<b>60000</b>
V9	8.74	6.54	4.34	2.63	1.43	1.01	0.02	0	<b>0</b>

Tableau.III.8- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position abaisseur)

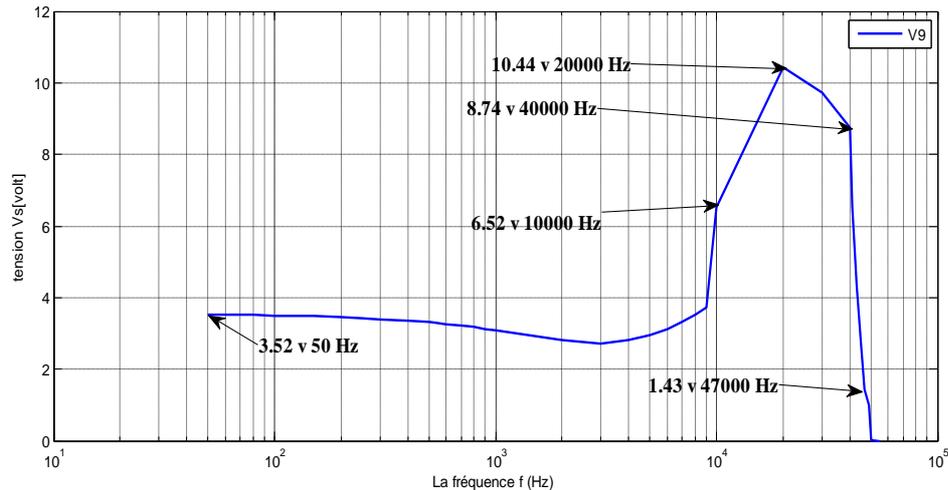


Fig.III.8 : la tension V9 du transformateur T3 (Position abaisseur).

On peut remarquer d'après cette figure que le transformateur 3 joue le rôle d'un transformateur abaisseur. La tension secondaire qui doit être égale à 5 V est diminuée à cause des pertes et elle est égale 3.52 V. Le transformateur abaisseur joue le rôle d'un abaisseur jusqu'à la fréquence 10 kHz après la tension secondaire augmente jusqu'à devenir égale à la tension primaire et la notion du rapport de transformation disparaît et devient égale à 1 à 20 kHz. Après cette dernière la tension secondaire diminue rapidement jusqu'à s'annuler à la fréquence 50 kHz après cette fréquence le transfo devient inutilisable.

#### III.4. La valeur de tension de sortie (une charge R)

##### Montage (4)



Le montage (4) de transformateur de la puissance T2 pour une charge R

**III.4.1 La valeur de la tension du transformateur de puissance T2**

**III.4.1.1 La valeur de la tension vcharge1 du transformateur T2 en disposition élévateur avec une charge résistive: résistance R=10 Ω**

Pour le transformateur T2 pour la disposition abaisseur en charge (R), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10Vmax sont indiqués dans le tableau.III.9. La figure montre la tension secondaire en fonction de la fréquence. La comparaison de la tension secondaire V charge 1 avec celle à vide est représentée sur la figure. **III.9.**

f	<b>50</b>	60	70	80	100	120	150	200	250
Vch <sub>1</sub>	<b>2.156</b>	2.121	2.085	2.052	1.973	1.804	1.753	1.548	1.324
F	300	400	500	600	700	800	900	1000	2000
Vch <sub>1</sub>	1.172	0.957	0.787	0.678	0.588	0.522	0.468	0.429	0.27
F	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	20000
Vch <sub>1</sub>	0.19	0.14	0.11	0.09	0.076	0.068	0.063	0.057	0.027
F	30000	40000	50000	60000	70000	80000	100000	<b>200000</b>	
Vch <sub>1</sub>	0.02	0.016	0.014	0.01	0.008	0.004	0.004	<b>0.004</b>	

Tableau.III.9- Les valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position élévateur)

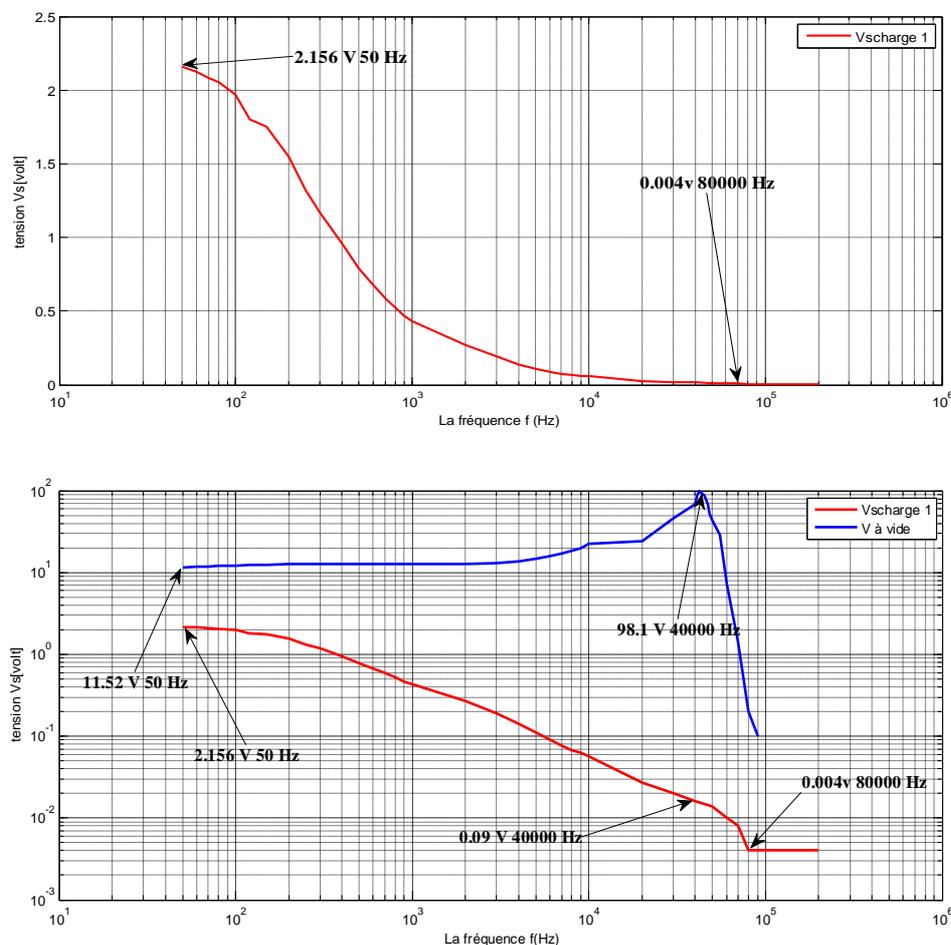


Fig.III.9 : la tension V charge1 du transformateur T2 (Position élévateur).

Avant l'utilisation de la charge, le transformateur T2 utilisé à vide délivre une tension à 50 Hz égale à 11.52 V. Le branchement de la charge de 10 ohm crée une chute de tension dans les bobines et on détecte une tension secondaire représentée dans la Fig.(III.9). La tension secondaire devient égale à 2,156 à 50 Hz puis elle chute avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à la fréquence de 40 kHz, où la valeur de la tension dans le vide 98V et la tension en charge est 0,016V, puis la tension diminue considérablement jusqu'à 0V. Après cette fréquence le transfo devient inutilisable. Il faut signaler toujours que la valeur maximale atteinte est reliée à un phénomène de résonance qui est lié étroitement à l'ajout de capacités parasites.

#### III.4.1.2 La valeur de la tension V charge2 du transformateur T2 en disposition élévateur avec une charge résistive: résistance $R=25 \Omega$

Pour le transformateur T2 pour la disposition élévateur en charge (R), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10Vmax sont indiqués dans le tab.III.10. La figure montre la tension secondaire en fonction de la fréquence. La comparaison de la tension secondaire v2 avec celle à vide est représentée sur fig. **III.10**.

f	<b>50</b>	60	70	80	100	120	150	200	250
Vch <sub>2</sub>	<b>4.58</b>	4.608	4.624	4.633	4.647	4.654	4.655	4.652	4.599
f	300	400	500	600	700	1000	2000	3000	4000
Vch <sub>2</sub>	4.590	4.576	4.562	4.549	4.536	4.506	4.433	4.377	4.327
f	5000	6000	7000	10000	20000	50000	60000	70000	80000
Vch <sub>2</sub>	4.288	4.247	4.21	4.069	3.835	3.724	3.834	3.966	4.175
f	90000	100000	<b>120000</b>	160000	180000	200000	250000	300000	350000
Vch <sub>2</sub>	4.476	4.710	<b>5.602</b>	4.770	3.644	2.618	0.968	0.46	0.202
F	400000	450000	<b>500000</b>						
Vch <sub>2</sub>	0.025	0.006	<b>0</b>						

Tableau.III.10- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position élévateur)

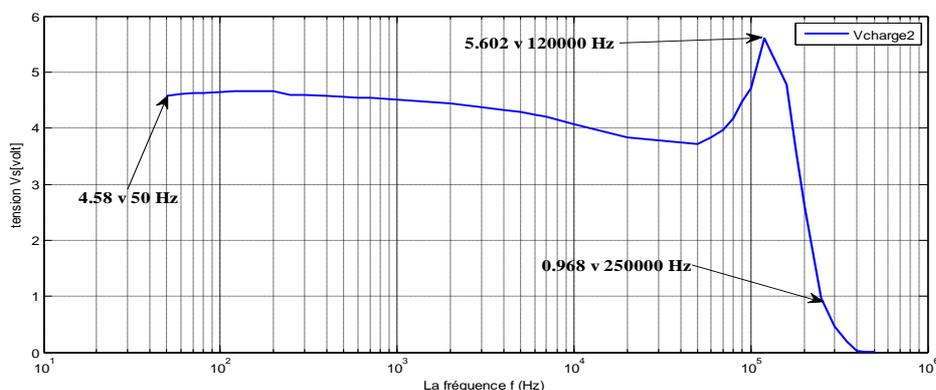


Fig.III.10 : la tension V charge2 du transformateur T2 (Position élévateur).

On peut remarquer d'après cette figure que le transformateur 2 joue le rôle d'un transformateur élévateur. La tension secondaire qui doit être égale à 20 V est diminuée à cause des pertes et elle est égale 4.58 V. Le transformateur élévateur joue le rôle d'un élévateur jusqu'à la fréquence 10 kHz après la tension secondaire augment jusqu'à devenir égale à la tension primaire et la notion du rapport de transformation disparaît et devient égale à trois fois est pour atteindre 120 kHz. Après cette dernière la tension secondaire diminue rapidement jusqu'à s'annuler à la fréquence 500 kHz après cette fréquence le transfo devient inutilisable. Il faut signaler toujours que la valeur maximale atteinte est reliée à un phénomène de résonance qui est lié étroitement à l'ajout de capacités parasites.

#### III.4.1.3 La valeur de la tension V charge<sup>3</sup> du transformateur T2 en disposition élévateur avec une charge résistive: résistance R<sub>2</sub>=70 Ω

Pour le transformateur T2 pour la disposition élévateur en charge (R), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V<sub>max</sub> sont indiqués dans le tableau.III.11. La figure montre la tension secondaire en fonction de la fréquence. La comparaison de la tension secondaire v<sub>2</sub> avec celle à vide est représentée sur la figure.

#### III.11.

F	<b>50</b>	60	<b>70</b>	80	100	120	150	200	250
V <sub>ch<sub>3</sub></sub>	<b>3.806</b>	3.816	<b>3.82</b>	3.818	3.807	3.753	3.742	3.627	3.467
F	300	400	500	550	600	700	800	900	1000
V <sub>ch<sub>3</sub></sub>	3.344	3.078	2.825	2.69	2.566	2.33	2.166	2.036	1.861
F	1500	2000	3000	4000	5000	6000	8000	10000	20000
V <sub>ch<sub>3</sub></sub>	1.391	1.09	0.784	0.619	0.528	0.451	0.381	0.333	0.269
F	30000	50000	70000	100000	200000	300000	400000	450000	500000
V <sub>ch<sub>3</sub></sub>	0.261	0.199	0.185	0.169	0.133	0.106	0.091	0.104	0.149
F	550000	600000	<b>700000</b>						
V <sub>ch<sub>3</sub></sub>	0.157	0.004	<b>0</b>						

Tableau.III.11- Les valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position élévateur)

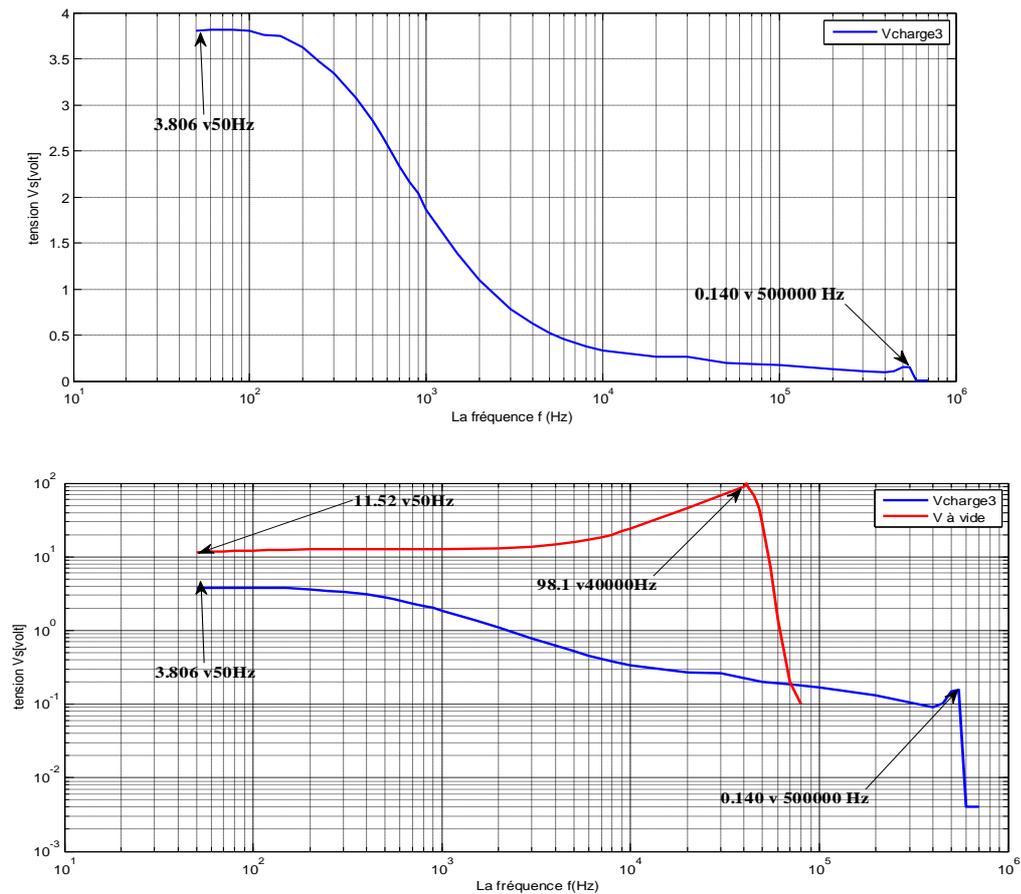


Fig.III.11 la tension V charge3 du transformateur T2 (Position élévateur).

Avant l'utilisation de la charge, le transformateur T2 utilisé à vide délivre une tension à 50 Hz égale à 11.52 V. Le branchement de la charge de 70 ohm crée une chute de tension dans les bobines et on détecte une tension secondaire représentée dans la figure **Fig.III.11**. La tension secondaire devient égale à 2,156 à 50 Hz puis elle chute avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à la fréquence de 40 kHz, où la valeur de la tension dans le vide est 98V et la tension en charge est 0,2 V, puis la tension diminue considérablement jusqu'à 0V. Après cette fréquence le transfo devient inutilisable. Il faut signaler toujours que la valeur maximale atteinte est liée à un phénomène de résonance qui est lié étroitement à l'ajout de capacités parasites.

#### III.4.1.4 La valeur de la tension Vcharge4 du transformateur T2 en disposition élévateur avec une charge résistive: résistance R2=121 Ω

Pour le transformateur T2 pour la disposition élévateur en charge (R), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.12. La figure montre la tension secondaire en fonction de la fréquence. La comparaison de la tension secondaire v2 avec celle à vide est représentée sur la figure.(III.12).

f	<b>50</b>	60	70	80	<b>100</b>	120	150	200	250
Vch <sub>4</sub>	<b>4.102</b>	4.167	4.144	4.155	<b>4.19</b>	4.157	4.13	4.08	3.993
f	300	400	500	550	600	700	800	900	1000
Vch <sub>4</sub>	3.924	3.774	3.593	3.516	3.421	3.258	3.095	2.953	2.808
f	1200	1500	1800	2000	2500	3000	4000	5000	6000
Vch <sub>4</sub>	2.515	2.279	1.958	1.806	1.546	1.329	1.069	0.897	0.779
f	7000	8000	9000	10000	15000	20000	30000	70000	100000
Vch <sub>4</sub>	0.707	0.646	0.601	0.56	0.489	0.438	0.417	0.350	0.325
F	300000	350000	<b>400000</b>	450000	500000	550000	600000	<b>700000</b>	
Vch <sub>4</sub>	0.399	0.642	<b>0.965</b>	0.771	0.244	0.018	0.005	<b>0</b>	

Tableau.III.12- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position élévateur)

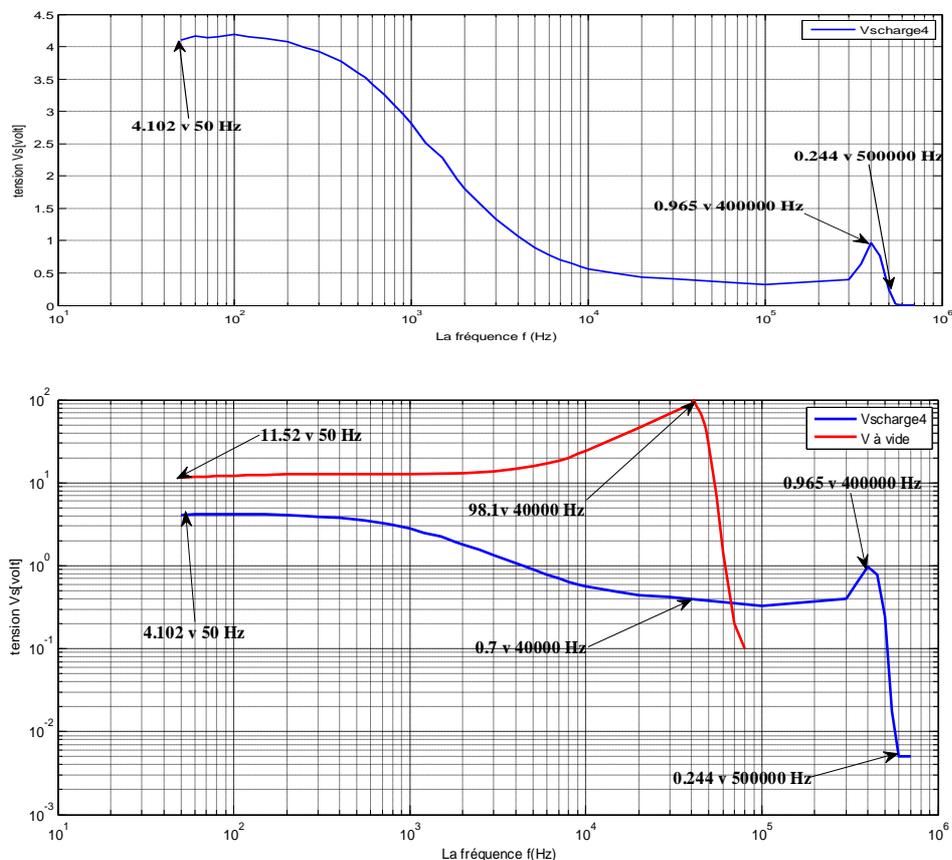


Fig.III.12 la tension Vs charge4 du transformateur T2 (Position élévateur).

Avant l'utilisation de la charge, le transformateur T2 utilisé à vide délivre une tension à 50 Hz égale à 11.52 V. Le branchement de la charge de 121 ohm crée une chute de tension dans les bobines et on détecte une tension secondaire représentée dans la figure **Fig.III.12**. La tension secondaire devient égale à 4.102 à 50 Hz puis elle chute avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à la fréquence de 40 kHz, où la valeur de la tension dans le vide est 98.1V et la tension en charge est 0.4 V, puis la tension diminue considérablement jusqu'à 0V. Après cette fréquence le transformateur devient inutilisable.

### III.4.3.1 La comparaison entre la tension de charge et à vide de dessin

Si on varie la charge, la figure montre la tension v2 pour les charges R= 10 ,70 ,121 ohm et la tension à vide.

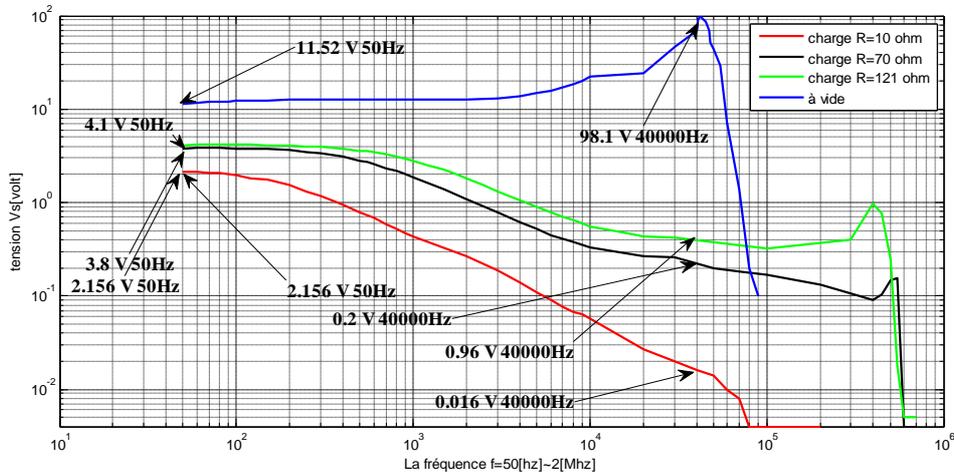


Fig.III.13 La comparaison Entre la tension de charge et à vide de transformateur élévateur.

Pour une utilisation en élévateur, on remarque que si on augmente la charge, la tension secondaire augmente.

### III.4.2 La valeur de la tension de transformateur de puissance T2

#### III.4.2.1 La valeur de la tension Vcharge5 du transformateur T2 en disposition abaisseur avec une charge résistive: résistance R=10 Ω

Pour le transformateur T2 pour la disposition abaisseur en charge (R), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tab.III.13. La figure montre la tension secondaire en fonction de la fréquence. La comparaison de la tension secondaire v2 avec celle à vide est représentée sur la fig.(III.14).

f	50	60	70	100	120	150	200	250	300
Vch <sub>5</sub>	1.023	1.017	1.003	0.981	0.972	0.945	0.9	0.8208	0.7265
f	400	500	600	700	800	1000	2000	3000	4000
Vch <sub>5</sub>	0.645	0.5773	0.5162	0.468	0.3913	0.218	0.1504	0.1146	0.0942
f	5000	6000	7000	8000	10000	12000	14000	20000	30000
Vch <sub>5</sub>	0.075	0.0656	0.06	0.0505	0.0435	0.0399	0.0339	0.03	0.0275
f	40000	50000	60000	70000	100000	200000	250000	300000	400000
Vch <sub>5</sub>	0.022	0.0196	0.0184	0.0155	0.0082	0.04	0.0009	0.0021	0.0006

Tableau.III.13- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position abaisseur)

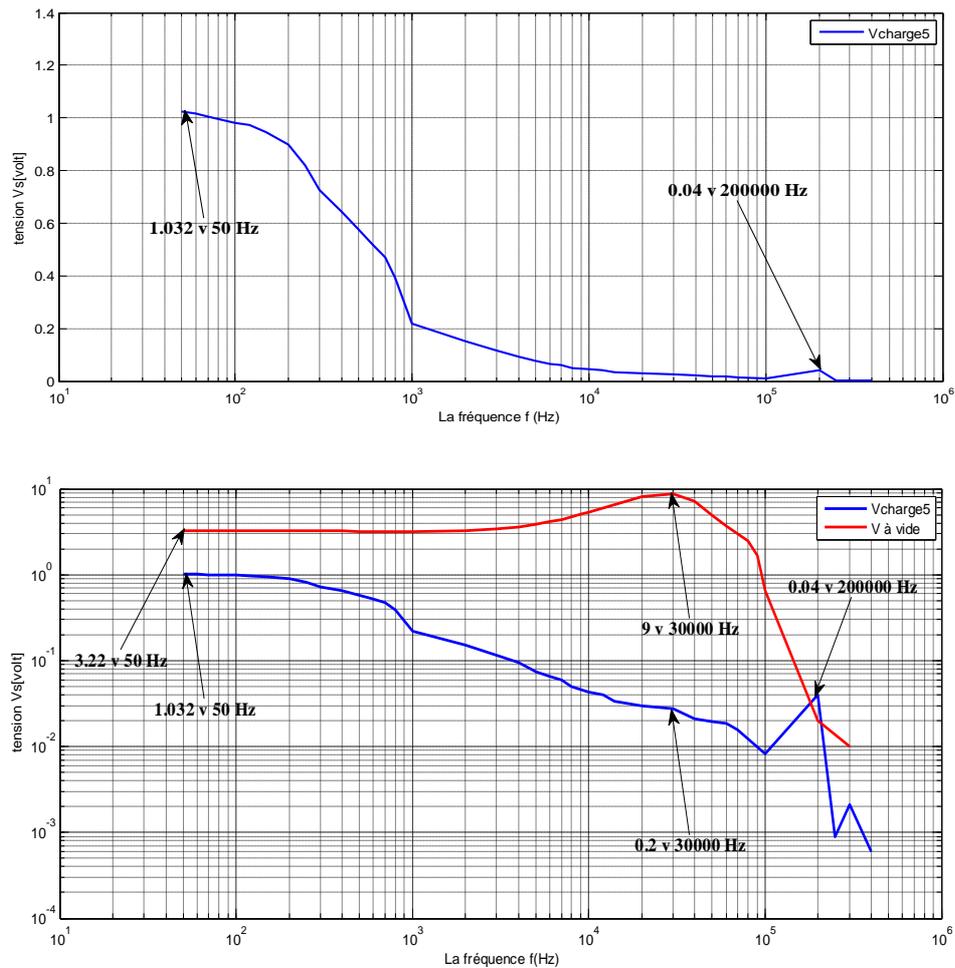


Fig.III.14 la tension V charge5 du transformateur T2 (Position abaisseur).

Avant l'utilisation de la charge, le transformateur T2 utilisé à vide délivre une tension à 50 Hz égale à 3.22 V. Le branchement de la charge de 10 ohm crée une chute de tension dans les bobines et on détecte une tension secondaire représentée dans la figure **Fig.III.14**. La tension secondaire devient égale à 1.023 à 50 Hz puis elle chute avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à la fréquence de 40 kHz, où la valeur de la tension dans le vide est 8.08 V et la tension en charge est 0,07V, puis la tension diminue considérablement jusqu'à 0V. Après cette fréquence le transfo devient inutilisable.

#### III.4.2.2 La valeur de la tension Vcharge6 du transformateur T2 en disposition abaisseur avec une charge résistive: résistance $R_2=25 \Omega$

Pour le transformateur T2 pour la position abaisseur, les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.14. La figure (III. 15) montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	90	100	120	150	200
Vch <sub>6</sub>	<b>15.73</b>	16.152	16.518	16.613	16.830	16.953	17.227	17.45	17.72
f	300	400	500	600	800	900	1000	2000	3000
Vch <sub>6</sub>	17.88	17.968	18.004	18.06	18	17.985	17.969	17.779	17.61
f	4000	5000	6000	7000	10000	20000	30000	35000	40000
Vch <sub>6</sub>	17.46	17.347	17.224	17.11	16.883	16.820	18.094	19.35	21.05
f	50000	<b>60000</b>	70000	80000	90000	100000	120000	140000	160000
Vch <sub>6</sub>	25.36	<b>29.9</b>	27.26	19.65	14.23	9.98	4.85	2.62	1.72
f	180000	200000	300000	<b>400000</b>					
Vch <sub>6</sub>	1.17	0.58	0.04	<b>0</b>					

Tableau.III.14- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position abaisseur)

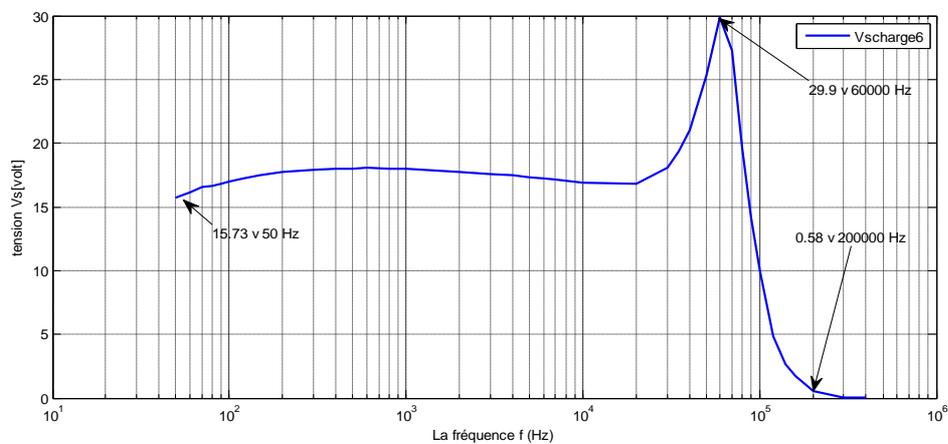


Fig.III.15 la tension Vs charge6 du transformateur T2 (Position abaisseur).

On peut remarquer d'après cette figure que le transformateur 2 joue le rôle d'un transformateur abaisseur. La tension secondaire qui doit être égale à 20 V est diminuée à cause des pertes et elle est égale 15.73 V. Le transformateur abaisseur joue le rôle d'un abaisseur jusqu'à la fréquence 20 kHz après la tension secondaire augmente jusqu'à devenir égale à la tension primaire et la notion du rapport de transformation disparaît et devient égale à 1.5 à 60 kHz. Après cette dernière la tension secondaire diminue rapidement jusqu'à s'annuler à la fréquence 400 kHz après cette fréquence le transfo devient inutilisable.

### III.4.2.3 La valeur de la tension Vscharge7 du transformateur T2 en disposition abaisseur avec une charge résistive: résistance R3=70 Ω

Pour le transformateur T2 pour la disposition abaisseur en charge (R), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.15. La figure montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

La comparaison de la tension secondaire  $v_2$  avec celle à vide est représentée sur la **fig. (III.16)**.

f	<b>50</b>	60	<b>70</b>	80	100	120	150	200	250
Vch <sub>7</sub>	<b>4.471</b>	4.490	<b>4.502</b>	4.494	4.412	4.376	4.334	4.173	3.9
f	300	400	500	550	600	700	800	1000	1200
Vch <sub>7</sub>	3.793	3.147	2.996	2.873	2.631	2.39	2.053	1.78	1.602
f	1400	2000	3000	4000	5000	6000	7000	10000	20000
Vch <sub>7</sub>	1.198	0.839	0.667	0.55	0.488	0.435	0.351	0.285	0.276
f	30000	40000	50000	70000	100000	120000	200000	300000	350000
Vch <sub>7</sub>	0.264	0.216	0.203	0.183	0.175	0.141	0.088	0.105	0.304
f	400000	450000	<b>500000</b>	550000	<b>600000</b>				
Vch <sub>7</sub>	0.493	0.864	<b>1.404</b>	0.473	<b>0</b>				

Tableau.III.15- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position abaisseur)

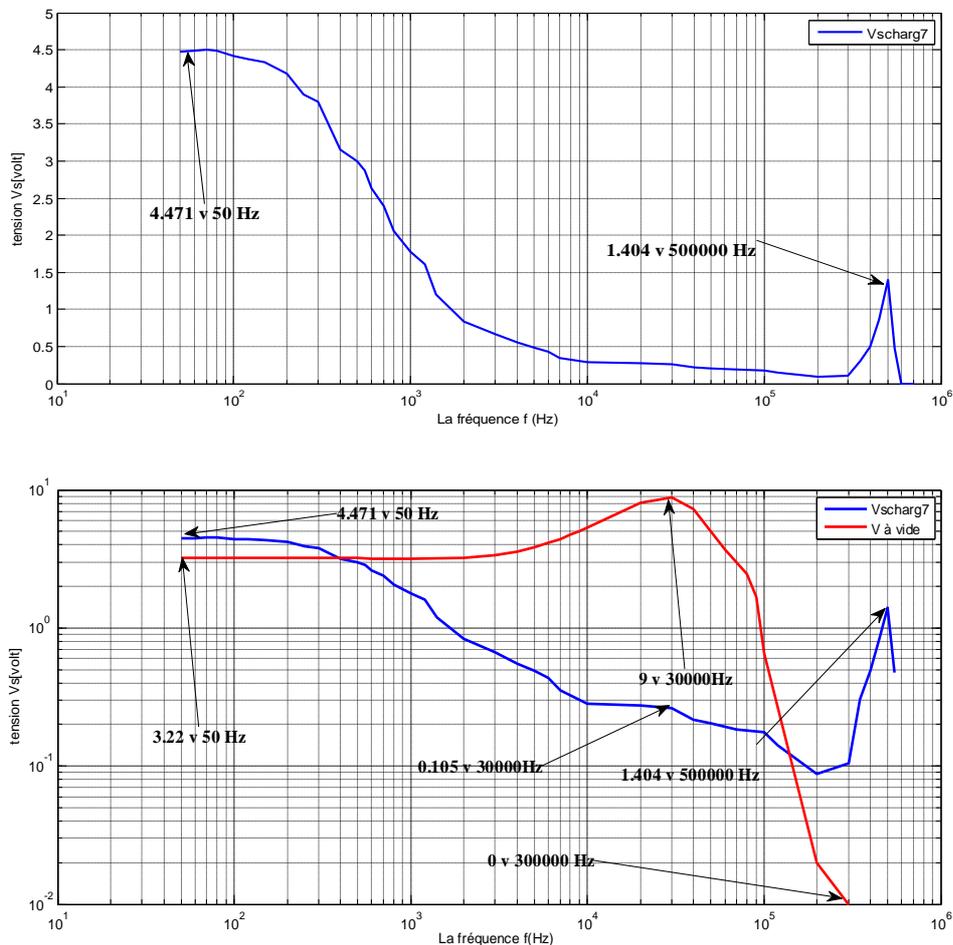


Fig.III.16 la tension  $V_s$  charge<sub>7</sub> du transformateur T2 (Position abaisseur).

Avant l'utilisation de la charge, le transformateur T2 utilisé à vide délivre une tension à 50 Hz égale à 3.22 V. Le branchement de la charge de 70 ohm crée une chute de tension dans les bobines et on détecte une tension secondaire représentée dans la figure **Fig.III.16**. La tension secondaire devient égale à 4.471 à 50 Hz puis elle chute avec

l'augmentation de la fréquence jusqu'à la fréquence de 30 kHz, où la valeur de la tension dans le vide 8.08 V et la tension en charge est 0.105 V, puis la tension diminue considérablement jusqu'à 0V. Après cette fréquence le transfo devient inutilisable. Il faut signaler toujours que la valeur maximale atteinte est reliée à un phénomène de résonance qui est lié étroitement à l'ajout de capacités parasites.

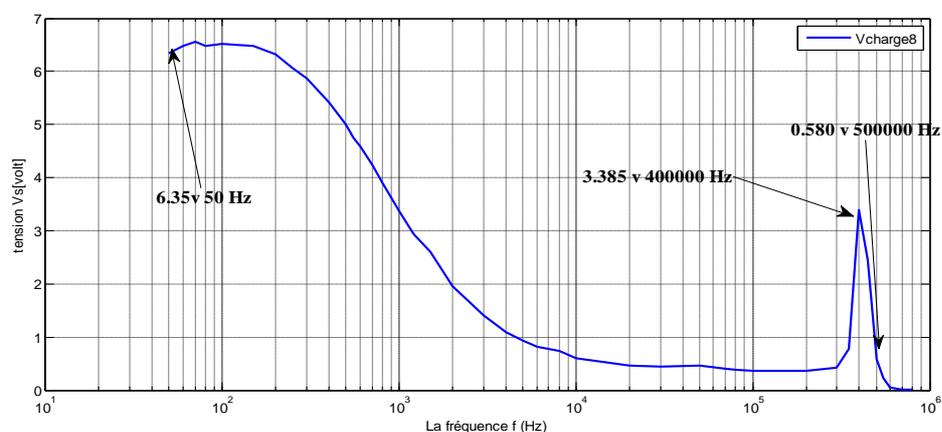
#### III.4.2.4 La valeur de la tension $V_{charge8}$ du transformateur T2 en disposition abaisseur avec une charge résistive : résistance $R=121 \Omega$

Pour le transformateur T2 pour la disposition abaisseur en charge (R), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10Vmax sont indiqués dans le tableau.III.16.La fige montre la tension secondaire en fonction de la fréquence. La comparaison de la tension secondaire  $v_2$  avec celle à vide est représentée sur la fig. (III.17).

f	<b>50</b>	60	<b>70</b>	80	90	100	120	150	200
V <sub>ch<sub>g</sub></sub>	<b>6.35</b>	6.472	<b>6.559</b>	6.488	6.505	6.514	6.508	6.473	6.324
f	250	300	400	500	550	600	700	800	1000
V <sub>ch<sub>g</sub></sub>	6.06	5.863	5.42	5.005	4.741	4.591	4.238	3.912	3.365
f	1200	1500	2000	3000	4000	5000	6000	8000	10000
V <sub>ch<sub>g</sub></sub>	2.935	2.596	1.956	1.399	1.082	0.936	0.812	0.743	0.597
f	20000	30000	50000	70000	80000	100000	200000	300000	350000
V <sub>ch<sub>g</sub></sub>	0.466	0.446	0.454	0.412	0.376	0.36	0.358	0.424	0.782
f	<b>400000</b>	450000	500000	550000	<b>600000</b>				
V <sub>ch<sub>g</sub></sub>	<b>3.385</b>	2.454	0.580	0.235	<b>0</b>				

Tableau.III.16- Les valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position abaisseur)

Si on varie la charge, la figure montre la tension  $v_2$  pour les charges  $R= 121$



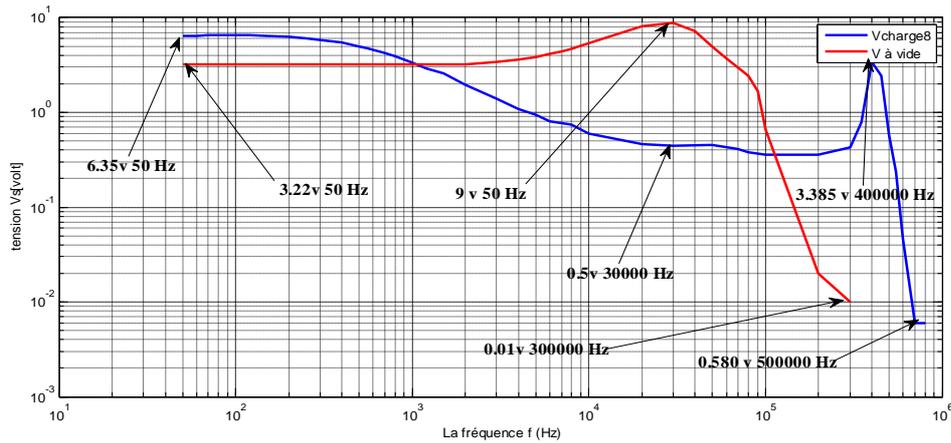


Fig.III.17 la tension V charge8 du transformateur T2 (Position abaisseur).

Avant l'utilisation de la charge, le transformateur T2 utilisé à vide délivre une tension à 50 Hz égale à 3.22 V. Le branchement de la charge de 121 ohm crée une chute de tension dans les bobines et on détecte une tension secondaire représentée dans la **Fig.III.17**.

La tension secondaire devient égale à 6.35V à 50 Hz puis elle chute avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à la fréquence de 40 kHz, où la valeur de la tension dans le vide est 8.08 V et la tension en charge est 0.446V, puis la tension diminue considérablement jusqu'à 0V. Après cette fréquence le transfo devient inutilisable. Si on varie la charge, la figure montre la tension v2 pour les charges R= 10 ,70 ,121 ohm Et la tension à vide.

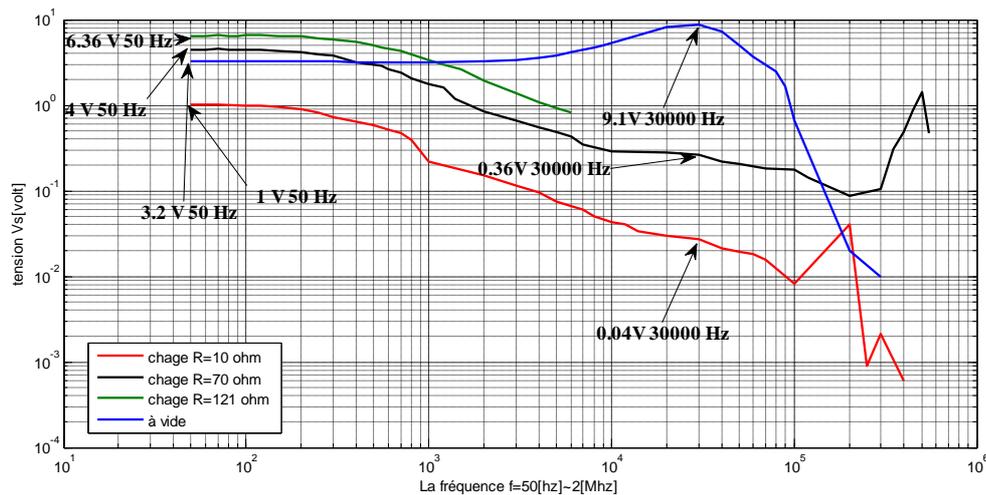


Fig.III.18 La comparaison Entre la tension de charge et à vide de transformateur abaisseur

Pour une utilisation en disposition abaisseur, on remarque que si on augmente la charge, la tension secondaire augmente aussi avec l'augmentation de la fréquence.

### III.5. La valeur de tension de sortie T2 (une charge RL)

#### Montage (4)



Le montage (4) de transformateur de la puissance T2 pour une charge RL

#### III.5.1.1 Les valeur de la tension V charge RL1 du transformateur T2 en disposition élévateur avec une charge résistive et inductif: RL ( $R_{ch1}=20\ \Omega$ , $L_{ch1}=0.3\ H$ )

Pour le transformateur T2 pour la disposition élévateur en charge (RL), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.17. La figure(III.19) montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	90	100	150	200	300
V <sub>ch<sub>9</sub></sub>	<b>10.22</b>	11.27	11.95	12.45	12.84	13.21	14.86	15.4	15.85
f	400	500	600	1000	1500	2000	5000	6000	7000
V <sub>ch<sub>9</sub></sub>	16.04	16.13	16.20	16.20	16.18	16.15	16.31	16.53	16.74
f	8000	9000	10000	12000	15000	20000	<b>25000</b>	30000	35000
V <sub>ch<sub>9</sub></sub>	17.16	17.64	18.26	19.36	22.5	32.7	<b>37.77</b>	26.25	13.13
f	40000	45000	50000	60000	70000	80000	<b>90000</b>		
V <sub>ch<sub>9</sub></sub>	4.78	0.553	0.334	0.154	0.068	0.034	<b>0</b>		

Tableau.III.17- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position élévateur)

#### III.5.1.2 La valeur de la tension V charge RL2 du transformateur T2 en disposition élévateur avec une charge résistive et inductif: RL ( $R_{ch2}=120\ \Omega$ , $L_{ch2}=0.8\ H$ )

Pour le transformateur T2 pour la disposition élévateur en charge (RL), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.18. La fig.III.19 montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	100	150	200	300	400
V <sub>ch10</sub>	<b>9.46</b>	10.2	11.16	11.87	12.76	14.11	14.27	15.44	15.65
f	500	600	1000	2000	4000	5000	6000	7000	8000
V <sub>ch10</sub>	15.75	15.81	15.86	15.82	15.88	16.01	16.21	16.5	16.83
f	9000	10000	12000	15000	<b>20000</b>	25000	30000	35000	40000
V <sub>ch10</sub>	17.17	18.41	20.4	24.93	<b>38.19</b>	25.6	12.69	7.6	4.59
f	45000	50000	60000	70000	80000	<b>90000</b>			
V <sub>ch10</sub>	0.550	0.238	0.157	0.078	0.016	<b>0</b>			

Tableau.III.18- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position élévateur)

### III.5.1.3 La valeur de la tension V charge RL3 du transformateur T2 en disposition élévateur avec une charge résistive et inductif: RL (R<sub>ch3</sub>=120 Ω, L<sub>ch3</sub>=1 H)

Pour le transformateur T2 pour la disposition élévateur en charge (RL), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.19. La figure **III.19** montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	90	100	200	300	400
V <sub>ch10</sub>	<b>5.4</b>	6.38	6.94	7.68	8.72	9.19	11.63	12.44	12.88
f	500	600	800	1000	2000	3000	4000	5000	6000
V <sub>ch10</sub>	13.05	13.22	13.29	13.3	13.35	13.38	13.42	13.53	13.67
f	7000	8000	9000	10000	15000	<b>20000</b>	25000	30000	35000
V <sub>ch10</sub>	13.86	14.17	14.82	15.49	19.93	<b>30.77</b>	24.87	12.89	5.6
f	40000	50000	60000	70000	80000	<b>90000</b>			
V <sub>ch10</sub>	4.5	0.489	0.222	0.108	0.019	<b>0</b>			

Tableau.III.19- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position élévateur)

Si on varie la charge, la figure montre la tension  $v_2$  pour les charges  $R= 20 ,120 ,120 \text{ ohm}$   
 $L=0.3, 0.8, 1 \text{ H}$ .

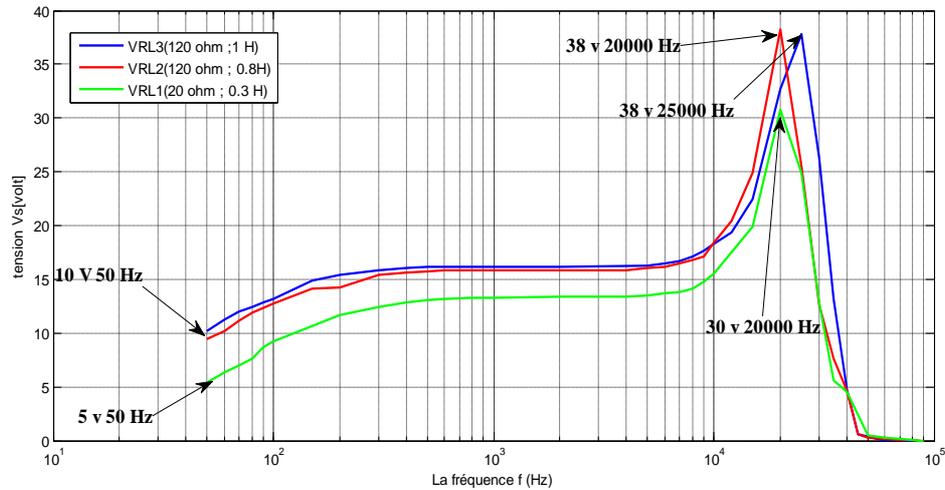


Fig.III.19 la tension  $V$  charge  $RL_1, 2,3$  du transformateur  $T_2$  (Position élévateur).

D'après la figure, on remarque que suivant l'impédance de la charge  $RL$ , la valeur de la tension secondaire  $v_2$  n'a pas changé beaucoup jusqu'à la fréquence de résonance qui diffère d'une impédance à l'autre. Après cette fréquence de résonance la tension  $v_2$  chute d'une façon importante.

Si on varie la charge, la figure montre la tension  $v_2$  pour les charges  $R= 20 ,120 ,120 \text{ ohm}$ .  
 $L=0.3, 0.8, 1 \text{ H}$  et la tension  $v_2$  à vide

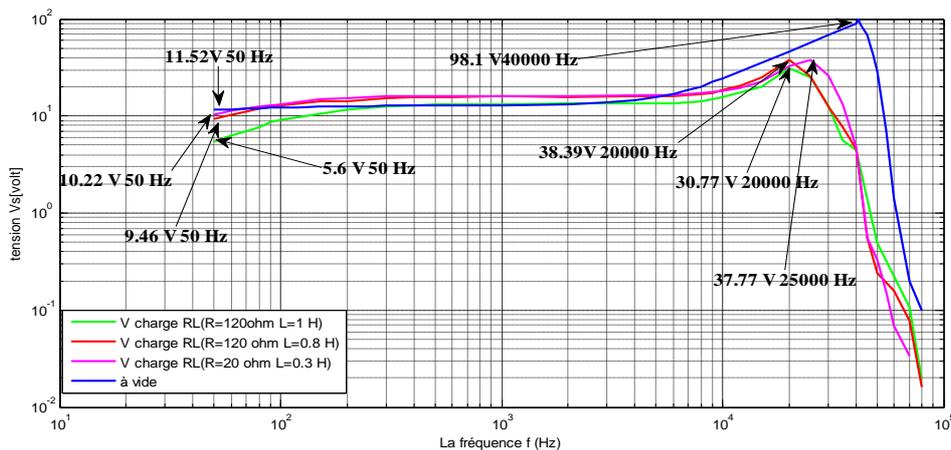


Fig.III.20 La comparaison entre la tension  $v_2$  de charge  $RL_1, 2,3$  et à vide de transfo élévateur

Pour une utilisation en élévateur, on remarque que si on augmente la charge, la tension secondaire augmente aussi avec l'augmentation de la fréquence ainsi que la chute de tension par rapport à celle du vide.

### III.4.2.1 La valeur de la tension V charge RL4 du transformateur T2 en disposition abaisseur avec une charge résistive et inductif: RL ( $R_{ch1}=20 \Omega$ , $L_{ch1}=0.3 H$ )

Pour le transformateur T2 pour la disposition abaisseur en charge (RL), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.20. La figure(III.21) montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	100	200	300	400	500
V <sub>ch11</sub>	<b>3.96</b>	4.04	4.08	4.12	4.16	4.21	4.17	4.16	4.15
f	1000	1200	1500	2000	3000	4000	5000	6000	7000
V <sub>ch11</sub>	4.11	4.09	4.08	4.05	4	3.96	3.94	3.91	3.87
f	10000	15000	20000	<b>30000</b>	35000	40000	50000	60000	70000
V <sub>ch11</sub>	3.84	3.92	4.02	<b>4.94</b>	1.066	0.677	0.778	0.404	0.161
f	80000	<b>90000</b>							
V <sub>ch11</sub>	0.057	<b>0</b>							

Tableau.III.20- Les valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position abaisseur)

### III.4.2.2 La valeur de la tension V charge RL5 du transformateur T2 en disposition abaisseur avec une charge résistive et inductif: RL ( $R_{ch2}=120 \Omega$ , $L_{ch2}=0.8 H$ )

Pour le transformateur T2 pour la disposition abaisseur en charge (RL), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.21. La figure(III.21) montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	90	100	150	200	300
V <sub>ch12</sub>	<b>4.35</b>	4.37	4.39	4.4	4.42	4.44	4.4	4.36	4.34
f	400	500	600	800	1000	2000	3000	4000	8000
V <sub>ch12</sub>	4.32	4.29	4.25	4.22	4.19	4.15	4.12	4.08	4.01
f	10000	20000	25000	30000	35000	<b>40000</b>	45000	50000	60000
V <sub>ch12</sub>	4.11	4.16	4.47	4.86	5.76	<b>6.35</b>	5.89	3.98	0.26
f	70000	80000	<b>90000</b>						
V <sub>ch12</sub>	0.094	0.018	<b>0</b>						

Tableau.III.21- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position abaisseur)

### III.4.2.3 La valeur de la tension V charge RL6 du transformateur T2 en disposition abaisseur avec une charge résistive et inductif : RL ( $R_{ch3}=120 \Omega$ , $L_{ch3}=1 H$ )

Pour le transformateur T2 pour la disposition abaisseur en charge (RL), les résultats de mesure de la tension secondaire pour une tension d'entrée de 10V max sont indiqués dans le tableau.III.22. La figure(III.21) montre la tension secondaire en fonction de la fréquence.

f	<b>50</b>	60	70	80	100	150	200	300	400
V <sub>ch13</sub>	<b>4.39</b>	4.41	4.44	4.45	4.46	4.44	4.4	4.39	4.37
f	500	600	800	1000	1500	2000	3000	4000	6000
V <sub>ch13</sub>	4.35	4.33	4.29	4.25	4.23	4.20	4.17	4.15	4.11
f	7000	10000	20000	25000	30000	35000	<b>40000</b>	45000	50000
V <sub>ch13</sub>	4.08	4.04	4.15	4.38	4.9	5.74	<b>6.31</b>	5.69	4.14
f	55000	60000	70000	80000	<b>90000</b>				
V <sub>ch13</sub>	0.223	0.099	0.066	0.036	<b>0</b>				

Tableau.III.22- La valeur de tension secondaire du transformateur T2 (Position abaisseur)

Si on varie la charge, la figure montre la tension v2 pour les charges  $R= 20 ,120 ,120 \text{ ohm}$ .  
 $L=0.3, 0.8, 1 H$

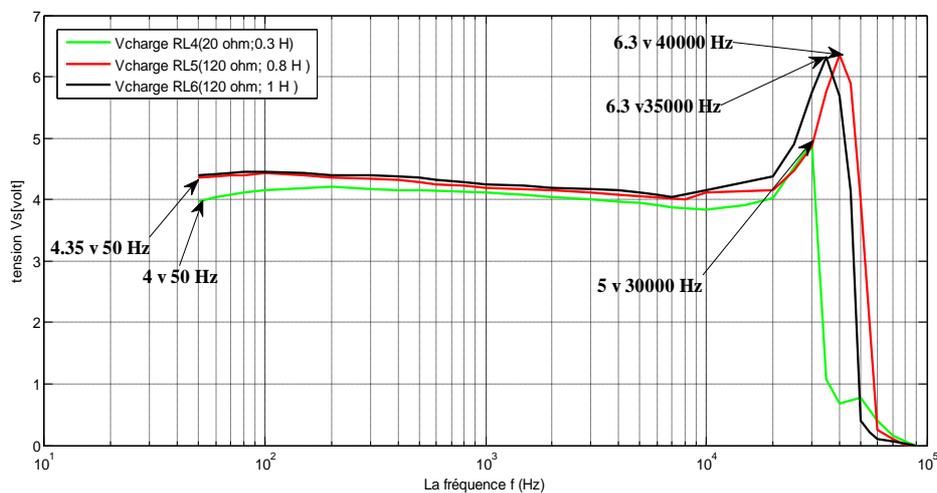


Fig.III.21 la tension V charge RL4, 5, 6 du transformateur T2 (Position abaisseur).

D'après la figure, on remarque que suivant l'impédance de la charge RL, la valeur de la tension secondaire v2 n'a pas changé beaucoup jusqu'à la fréquence de résonance qui diffère d'une impédance à l'autre. Après cette fréquence de résonance la tension v2 chute d'une façon importante. Il faut signaler toujours que la valeur maximale atteinte est liée à un phénomène de résonance qui est lié étroitement à l'ajout de capacités parasites.

Si on varie la charge, la figure montre la tension  $v_2$  pour les charges  $R=20, 120, 120 \text{ ohm}$ .  $L=0.3, 0.8, 1 \text{ H}$  et la tension  $v_2$  à vide.

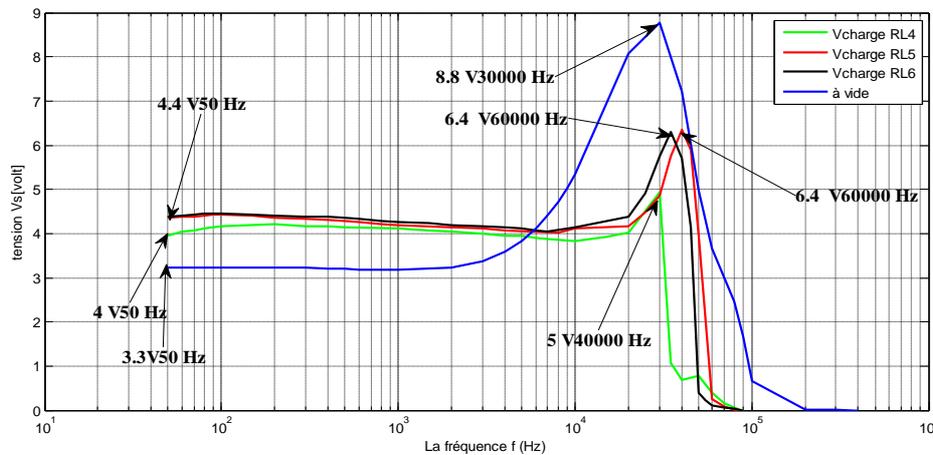


Fig.III.23 La comparaison Entre la tension de charge RL4, 5,6 et à vide de transformateur T2 abaisseur.

Pour une utilisation dans la réduction, nous constatons que si l'on augmente la charge, la tension secondaire augmente également avec une fréquence croissante et basse tension par rapport au vide. Avec une augmentation de la différence entre la charge et le vide dans la tension électrique.

### III.6 Concluions :

Nous concluons de cette expérience que la plupart des transformateurs à hautes fréquences perdent leurs propriétés physiques et se comportent contrairement à ce que nous savons dans le 50 Hz ou le 60 Hz. A fréquences élevées, le transformateur n'est plus le même qu'à 50Hz ou 60Hz des capacités parasites peuvent s'introduisent pour changer son comportement et on arrive à des résonances qui peuvent changer le comportement du transformateur d'une manière importante. La théorie de ce phénomène sort de l'objectif de ce travail.

Ce travail modeste ne suggère pas arriver à un résultat exhaustif mais il permet à notre connaissance à aider les utilisateurs de transformateur dans le domaine des hautes fréquences de prendre leur précaution pour l'utilisation des transformateurs d'une manière sûre.

# **Conclusion Générale**

### Conclusion générale

Les transformateurs sont des outils très importants dans les systèmes électriques qui peuvent augmenter ou diminuer le niveau de la tension.

Nous concluons de cette expérience que la plupart des transformateurs à hautes fréquences perdent leurs propriétés physiques et se comportent contrairement à ce que nous savons dans le 50 Hz ou le 60 Hz. A fréquences élevées, le transformateur n'est plus le même qu'à 50Hz ou 60Hz des capacités parasites peuvent s'introduisent pour changer son comportement et on arrive à des résonances qui peuvent changer le comportement du transformateur d'une manière importante. La théorie de ce phénomène sort de l'objectif de ce travail.

Ce travail modeste ne suggère pas arriver à un résultat exhaustif mais il permet à notre connaissance à aider les utilisateurs de transformateur dans le domaine des hautes fréquences de prendre leur précaution pour l'utilisation des transformateurs d'une manière sûre.

### */Bibliographie*

- [1] : Heinrich LENZ 1804-1865 Physician allemande.
- [2] : Toufik Smail « Modélisation des éléments non linéaire ».
- [3] : <http://dst.perso.sfr.fr/Gaulard.htm>(2000-2007.Pierre ).
- [4] : mémoire de fin d'études 2010 « protection des transformateur des puissance par les relais différentiels.
- [5] : mémoire fine d'études 2008/2009 'Etude des transformateur électrique, univervté de Biskra'.
- [6] : <http://www.powertransformer.us/isolationtransformers.htm>.
- [7] : [http://clients.rte-france.com/htm/fr/reseau/telecharge/RNT\\_TD\\_Boutre.pdf](http://clients.rte-france.com/htm/fr/reseau/telecharge/RNT_TD_Boutre.pdf).
- [8] : [www.wikipidia.com](http://www.wikipidia.com).
- [9] : mémoire fine d'étude 2014 licence, étude le transformateur HT.
- [10] : cour-chapitre 8-GABRIEL CORMIER.
- [11] : Mémoire magister, département électrique, réseaux électriques « yahiou abde lleghani » université farhate abas Stif.
- [12] : Martin J.Heathcote, J&P transformateur BOOK ,Oxford,Elsevier,2007(ISBN978-0-7506-8164-3 ,lire en ligne [archive]).
- [13] : Gabriel Cormier GEN1153.
- [14] : Gabriel Cormier GELE3222.