

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 : Machines électrique

Réf:.....

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

**MASTER**

*Thème*

**CONCEPTION D'UN POSTE A  
SOUDER PAR POINTS**

Présenté par :  
BECHKI Sami  
Soutenu le : 06 Juin 2017

Devant le jury composé de :

Mr: Naimi Djamai

MCA

Président

Mr: ROUINA Abdelhafid

MCA

Encadreur

Mr: Ben Meddour Mostefa

MCB

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 : Machines électrique

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

**MASTER**

*Thème*

# CONCEPTION D'UN POSTE A SOUDER PAR POINTS

**Présenté par :**

BECHKI Sami

**Avis favorable de l'encadreur :**

ROUINA Abdelhafid **Signature:**

**Avis favorable du Président du Jury**

Naimi Djamai

**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 : Machines électrique

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

**MASTER**

*Thème*

# CONCEPTION D'UN POSTE A SOUDER PAR POINTS

**Proposé et Dirigé par : Dr. ROUINA Abdelhafid**

## **Résumé**

Dans ce projet de fin d'étude, on a présenté un poste à souder par points constitué d'un transformateur électrique abaisseur de tension. Le travail de cet appareil se base sur la chaleur importante causée par l'arc électrique produit par un courant électrique élevé au niveau de la partie secondaire de ce transformateur.

Nous avons réalisé ce travail au niveau du laboratoire de l'université de Biskra où nous avons assemblé des pièces des postes à souder qui étaient en panne après avoir démonté le bobinage endommagé du circuit magnétique. Le nombre de spires primaire et secondaire ont été bien calculé pour avoir un rapport de transformation convenable aux tensions et courant voulu.

**Mots clés :** transformateur électrique, soudure par points, bobinage.

*Dédicace*

*Je dédie le fruit de mon travail*

*A mes chers parents qu'ils m'ont aidés et*

*Supportés toute ma vie,*

*À ma chère maman pour ses sacrifices et ses*

*Efforts pendant toutes ces années,*

*À mon père qu'il n'est pas épargné aucun effort*

*Pour m'aider durant mes études, je supplie dieu de*

*Leur donner le bonheur et la santé.*

*À mes chers frères et toute ma chère famille*

*À tous mes amis et mes collègues.*

*Sami*

## *Remerciement*

*Avant tout, Je remercie, notre créateur ALLAH le tout puissants que nous a donné la force et la volonté pour terminer ce travail...*

*Je remercie mon encadreur monsieur ROUINA Abdelhafid pour son encouragement, sa disponibilité, ses orientations, ses conseils et pour le temps précieux qu'il m'a consacré durant l'année théorique et pour récolter le fruit de ce travail ...*

*Je tiens à remercier aussi Dr. NAIMI Djeamai (Président de jury) et le membre du jury Ben Meddour Mostefa*

*Je remercier tous mes enseignants durant mes années scolaire.*

*Je remercie tous les personnes qu'ils ont facilité la réalisation de ce travail.*

*Sami*

**Liste des tableaux**

<b>N</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
I.1	Type de soudage et leur caractéristique.	07
II.8.1	Essai à vide (cas monophasé)	32
II.8.2	Essai en court-circuit (cas monophasé)	33
III.1	Nombre total de file de cuivre en mètre.	45
III.2	Calcule de bobinage pratique.	47
III.3	Testes du poste à soudure.	51

## Liste des figures

N°	Titre	Page
I.1	Principe du soudage électrique par résistance par points.	3
I.2	La résistivité.	7
I.3	Dissipation thermique dans la pièce.	9
I.4	Constitution d'une machine de soudage par points.	10
I.5	Les différentes phases d'un cycle de soudage.	12
I.6	Le point et son environnement.	13
I.7	Présenté Localisation des points.	14
I.8	Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues.	16
I.9	Évolution des résistances en cours de soudage sur tôles nues.	17
I.10	Coupe d'un point soudé.	17
I.11	Déboutonnage d'un point soudé.	18
I.12	Décalage du domaine de soudabilité vers les intensités hautes avec la dégradation des Electrodes	20
I.13	Dispositif de déboutonnage simultané de 10 points de soudure.	21
II.1	Différents types des transformateurs.	23
II.2	Transformateur.	25
II.3	Symboles du transformateur.	25
II.4	Transformateur monophasé.	26
II.5	Transformateur monophasé parfait.	27
II.6	Schéma équivalent d'un transformateur parfait.	30
II.7	Diagramme de Fresnel.	30
II.8	Schéma équivalent de l'essai à vide	33
II.9	Schéma équivalent de l'essai en court circuit.	33
II.10	Schéma équivalent de l'essai en charge.	34
II.11	Bilan de Puissance	35
II.12	Plaque signalétique de transformateur monophasé.	36
III.1	Transformateur de poste à soude.	37
III.2	Bobinage primaire endommagé (gauche) et bobinage secondaire saint (droit).	38

## LISTE DES FIGURES

III.3.4	Démantèlement de bobinage primaire et secondaire.	37
III.5	Le circuit magnétique de forme « U ».	39
III.6	Tôles magnétiques utilisées dans la fabrication du circuit magnétique.	39
III.7	Dimension du circuit magnétique	40
III.8	Diamètre de file de bobinage secondaire	42
III.9	Le support pour bobinage (théorique).	42
III.10	Support pour bobinage (pratique).	43
III.11	Dimension de fenêtre du circuit magnétique.	44
III.12	Présente la surface qui ajouté pour calcule nombre total de file de cuivre en mètre.	44
III.13	Le début de bobinage avec les files de serrage le bobinage.	45
III.14	bobinage primaire neveux.	46
III.15	Bobinage primaire place dans le circuit magnétique.	46
III.16	Remontage des tôles.	47
III.17	Resserrage des tôles.	48
III.18	Armature de poste soude par points.	48
III.19	Bobinage secondaire lié avec les bars du cuivre.	49
III.20	Poste a soudé finale.	49
III.21	Présenté la protection de poste a soudé.	50
III.22	Système protection de poste.	50
III.23	Premier etape de soudage.	51
III.24	Deuxième étape de soudage.	52
III.25	Presenté l'essai de soudage par points.	52
III.26	Le échantillon qui soudé .(des cavalier).	53



## Liste Des Abréviations Et Symboles

Abréviations	
CC	Courant continue
CA	Courant alternatif

Symboles	
$\emptyset$	Sexions de l'électrode
V	La tension
$\emptyset, \varphi$	Le flux magnétique
I	Courant
$N_2, n_2$	Nombre de Spires secondaire
R	Résistance
WJ	l'effet joule
t	Le temps
$L_1$	La bobine
$\varphi_2$	Etant le déphasage dû au dipôle
P	La puissance active
f	La fréquence
$\emptyset_{\max}$	Le flux magnétique maximal
m, a	Le rapport de transformation
$e_2$	La tension aux bornes du noyau
S	La puissance apparente
$i_m$	Le courant magnétisant
$L_m$	Inductance magnétisante
$X_{eq}$	Les réactances équivalentes
$\omega$	La pulsion de vitesse
$B_{eff}$	L'induction efficace
$B_{\max}$	L'induction maximale

**Résumé**

Dans ce projet de fin d'étude, on a présenté un poste à souder par points constitué d'un transformateur électrique abaisseur de tension. Le travail de cet appareil se base sur la chaleur importante causée par l'arc électrique produit par un courant électrique élevé au niveau de la partie secondaire de ce transformateur.

Nous avons réalisé ce travail au niveau du laboratoire de l'université de Biskra où nous avons assemblé des pièces des postes à souder qui étaient en panne après avoir démonté le bobinage endommagé du circuit magnétique. Le nombre de spires primaire et secondaire ont été bien calculé pour avoir un rapport de transformation convenable aux tensions et courant voulu.

**Mots clés :** transformateur électrique, soudure par points, bobinage.

**ملخص**

في هذه المذكرة سنقوم بعرض احد استخدامات محول كهربائي خافض للجهد واستخدامه في آلة لحام نقطية، هذه الآلة تعتمد على الحرارة الكبيرة الناتجة عن القوس الكهربائي المتولد نتيجة التيار الكهربائي المرتفع على مستوى الجزء الثانوي لهذا المحول.

قمنا بإنشاء هذا العمل على مستوى مخبر جامعة بسكرة أين قمنا بجمع قطع من محولات كهربائية معطلة لآلات لحام بعد تفكيكها أعدنا تليف الدارة المغناطيسية يدويا بحيث يوفر لنا عدد اللفات في كل الجزئين الأولي والثانوي معاملا للتحويل مناسباً للجهد والتيار المرجوين في هذا العمل.

**الكلمات المفتاحية :** محول كهربائي ، آلة لحام نقطية، تليف.

## Sommaire

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Liste des tableaux.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des symboles et abréviations.....	VI
Résumé.....	VII
Sommaire.....	VIII
Introduction générale.....	1

### CHAPITRE I : Généralité sur Le Soudage par points.

I.1. Introduction.....	3
I.2. Histoire sur le Soudage par résistance.....	3
I.3. Généralités.....	4
I.4. Définition.....	4
I.5. Les avantages et les inconvénients du procédé de soudage.....	4
I.5.1. Avantages du soudage, par rapport aux autres techniques d'assemblage.....	4
I.5.2. Les inconvénients du procédé de soudage .....	5
I.5.3. Domaines d'applications.....	5
I.6. Particularités du soudage par résistance.....	5
I.6.1. Intérêt des procédés .....	5
I.6.2. Le procédé de soudage par résistance (présentation).....	6
I.7. Principe de base .....	7
I.7.1. Rappel de base d'électricité.....	7
I.7.2. La résistivité.....	7
I.8. Dissipation thermique dans la pièce.....	9
I.8.1. La résistance de contact varie avec l'effort.....	9
I.9. Constitution d'une machine de soudage .....	10
I.10. Les machine de soudage par résistance .....	10
I.10.1. Le transformateur CA .....	11
I.10.2. Le transformateur CC .....	11
I.10.3. Le circuit de refroidissement .....	11
I.11. Déroulement du cycle de soudage .....	11

I.12. Paramètres de soudage .....	12
I.13. Le point et son environnement .....	13
I.13.1. Localisation des points .....	14
I.13.2. Distance entre points .....	14
I.13.3. Recouvrement .....	15
I.13.4. Distance au bord des tôles .....	15
I.14. mécanisme de formation de la soudure .....	15
I.14.1. Géométrie d'un point soudé .....	17
I.15. Caractérisation d'une tôle d'acier revêtu .....	18
I.15.1. La dégradation des électrodes .....	19
I.16. Hygiène et sécurité .....	21
I.17. Conclusion.....	21

## **CHAPITRE II : Principe de fonctionnement du transformateur.**

II.1. Introduction.....	22
II.2. Historique .....	22
II.3. Utilisation de transformateur.....	23
II.4. Définition.....	24
II.5. Symboles.....	25
II.6. Principe – Équations .....	25
II.6.1. Constitution – Principe .....	25
II.6.2. Transformateur monophasé parfait.....	26
II.6.3. Relation de Base sur le transformateur.....	27
II.6.4. flux magnétique.....	28
II.6.5. Formule de Boucherot.....	28
II.6.6. Le rapport de transformation du transformateur.....	28
II.6.7. Les relations entre les tensions pour le transformateur parfait .....	29
II.6.8. Les relations entre les intensités.....	29
II.6.9. Diagramme de Fresnel.....	30
II.7. Principe de fonctionnement.....	30
II.8. Essais des transformateurs.....	32
II.8.1. Essai à vide .....	32
II.8.2. Essai en court-circuit .....	33

II.8.3. Essai en charge .....	34
II.9. Bilan énergétique et Rendement .....	34
II.9.1. Les différentes pertes .....	34
II.9.1.1. Les pertes par effet Joule .....	35
II.9.1.2. Les pertes magnétiques .....	35
II.10. La plaque signalétique .....	36
II.11. Les avantages et inconvénients des transformateurs.....	36
II.12. Conclusion .....	36
<b>CHAPITRE III : Réalisation d'un poste à soudure par points.</b>	
III.1. Introduction.....	37
III.2. Les étapes de démantèlement le transformateur .....	38
III.3. Calcule des transformateurs .....	40
III.3.1. Calcule de la section d'un noyau .....	40
III.3.2. Calcule du nombre de spires pour la tension primaire .....	40
III.3.3. Calcule des courants dans les enroulements .....	40
III.3.4. Calcule du nombre de spires à du circuit secondaire.....	41
III.3.5. Calcule et choix de la section du diamètre du fil de l'enroulement .....	41
III.4. La méthode de faire le bobinage primaire .....	42
III.4.1. Les donné de bobinage .....	43
III.4.2. Calcule de nombre de spire par couche .....	43
III.4.3. Calcule le nombre de couches.....	43
III.4.4. Calcule de l'épaisseur de la bobine primaire E1.....	44
III.4.5. Calcule de la longueur du fil de cuivre en mètre .....	44
III.5. Remontage des tôles .....	47
III.6. Protection de poste .....	49
III.7. Testes du poste à soudure réalisé .....	51
III.7.1. Essai avide et en charge .....	51
III.8. Conclusion.....	53
Conclusions générales.....	54
Références Bibliographiques.....	55

# **Introduction Générale**

### Introduction générale

Le soudage des structures est une opération croissante pour les différents secteurs industrielle; aéronautique ; automobile ; marin ; transport pétrolier ; agroalimentaire ... etc. La connaissance approfondie des phénomènes intervenant dans les dispositifs utilisés pour le soudage, et les facteurs influençant le comportement de matériaux permet de prévenir des anomalies et de choisir des conditions adoptées à son utilisation.

Le soudage est un domaine de construction électromécanique très vaste où les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très importants en vue d'améliorer son efficacité.

On estime aujourd'hui que la production mondiale des aciers est destinée à la fabrication des produits soudés. Leurs compositions chimiques et leurs caractéristiques mécaniques présentent des éléments essentiels intervenant dans le choix du métal d'apport destiné à leurs jonctions par un procédé de soudage approprié (soudage à l'arc électrique, soudage par résistance électrique, soudage par faisceau d'électron, soudage par plasma, soudage par laser, ...)

[1]

Le soudage par points sert à assembler localement deux tôles, en utilisant l'effet Joule. A cet effet, on comprime ces tôles à l'aide d'une paire d'électrodes, généralement en alliage de cuivre, et l'on fait passer par ces mêmes électrodes un courant électrique de forte intensité.

La chaleur engendrée par ce courant à l'interface tôle-tôle fait fondre localement le métal, ce qui crée, après solidification, un point de soudure.

Une soudure est réalisée en une à deux secondes, avec un temps effectif de passage du courant de quelques dixièmes de secondes. Les phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une soudure sont à la fois d'origine électrique, thermique, mécanique et métallurgique. La rapidité et complexité de ces phénomènes en font un procédé extrêmement difficile à modéliser.

Conformément à la géométrie des électrodes, une soudure par point possède - dans le plan des deux tôles - une forme approximativement circulaire. Si la fonction principale d'une soudure est la tenue mécanique, on choisit généralement de caractériser sa qualité par son diamètre de bouton, c'est-à-dire par le diamètre moyen (en millimètres) du rivet restant sur l'une des deux tôles après un essai destructif appelé déboutonnage. [3]

Parmi les différents paramètres de soudage, l'intensité du courant de soudage joue un rôle prépondérant, car elle conditionne directement la taille de la soudure. Le domaine de soudabilité d'un produit est défini comme la plage d'intensité permettant d'obtenir une soudure

de qualité satisfaisante, tous les autres paramètres (effort mécanique, durées, etc.) étant fixés préalablement.

L'usage de tôles protégées contre la corrosion se généralise. Dans le cas où ce revêtement est zingué, on constate que le revêtement entraîne une dégradation des électrodes, au fur et à mesure de leur utilisation, ce qui se traduit par un décalage du domaine de soudabilité vers les intensités élevées. On a pris l'habitude de caractériser cette dégradation par le nombre maximal de points de qualité satisfaisante que l'on peut souder avec l'intensité de haut de domaine à électrodes neuves. Ce nombre est appelé la durée de vie des électrodes.

Dans le premier chapitre, on va présenter un bref historique sur le soudage par points.

Le deuxième chapitre décrit le principe de fonctionnement des transformateurs électriques et leur utilisation.

Dans le troisième et dernier chapitre on va décrire la procédure qui a été suivie pour la réalisation d'un transformateur de puissance 1.9kVA sous tension 220V, ce dernier est utilisé dans le domaine de soudage ici un poste à soudeuse par point.

Le travail se termine par une conclusion et une proposition pour des travaux au futur.



# **Chapitre I**

## **Généralité sur le soudage par points**

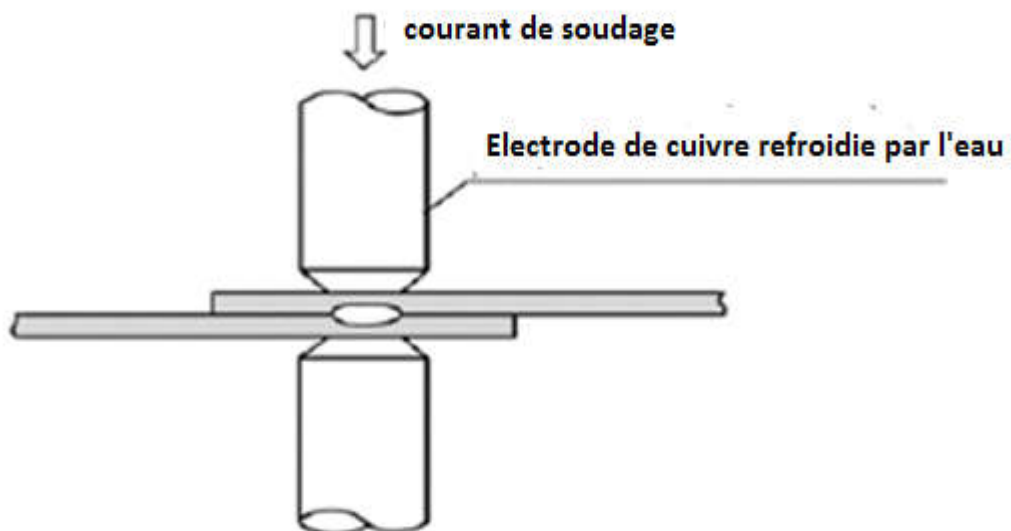
### I.1. Introduction

Depuis longtemps, les postes à souder sont utilisés dans des applications limitées, mais les progrès dans l'électricité et la chimie leur permettent aujourd'hui d'être nécessaires dans la plupart du domaine industriel comme la construction des ponts, automobiles et soudage des pipes de gaz, etc.

Dans ce chapitre, on va présenter un historique et Les principes fondamentaux sur le soudage par point (définition, principe et le paramètre de soudage et constitution d'une machine).

### I.2. Histoire sur le soudage par résistance

Les premières machines de soudage par résistance ont servi au soudage bout à bout. Le premier transformateur de soudage a été inventé aux États-Unis en 1886 par Elihu Thomson, qui fit breveter le procédé l'année suivante. Son transformateur fournissait environ 2 000 A à 2 volts en circuit ouvert. Au début du XXe siècle, Thomson continua à perfectionner le soudage par points, le soudage par projection et le soudage bout à bout par étincelage. Le soudage par points devint par la suite le procédé le plus répandu. On l'utilise aujourd'hui dans l'industrie automobile et dans bien d'autres applications de soudage de tôles. La figure 01 illustre le principe : deux électrodes en cuivre appliquent une pression sur deux plaques en recouvrement et un courant de forte intensité unit les plaques par fusion. Le premier robot de soudage par résistance par points a été livré par Animation à General Motors 1964. [2]



**Figure I.1.** Principe du soudage électrique par résistance par points.

### I.3. Généralités

Le soudage par points fait partie de la famille des procédés de "soudage par résistance", au même titre que le soudage à la molette, par bossages, ou en bout. Il est utilisé pour assembler deux tôles (ou plus) dont l'épaisseur est typiquement comprise entre 0,5 et 10 mm. Signalons que ces deux tôles peuvent avoir - même si ce n'est généralement pas le cas au CRDM - des caractéristiques différentes (composition, revêtement), et qu'elles n'ont pas forcément la même épaisseur.

Historiquement, ce fut l'Américain Thomson qui eut, en 1877, l'idée d'assembler deux tôles d'acier en utilisant, comme agent de chauffage, l'effet de la traversée de l'assemblage par un courant électrique de forte intensité. Il s'agit depuis longtemps du procédé d'assemblage numéro un des carrosseries automobiles, une voiture nécessitant en moyenne 4000 points soudés. [3]

### I.4. Définition

Le soudage par résistance par points a été inventé en 1877 par E. Thomson et continue aujourd'hui à être largement employé dans l'industrie automobile [1]. Le soudage électrique par résistance par points est un procédé de soudage sans métal d'apport dit autogène. La fusion du métal localisée entre les tôles à assembler, est obtenue par effet Joule (courant électrique de quelques kilos ampères). [5]

### I.5. Les avantages et les inconvénients du procédé de soudage

#### I.5.1. Avantages du soudage, par rapport aux autres techniques d'assemblage [6]

- ✓ Il assure une continuité métallique de la pièce, lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemblé (mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité ...).
- ✓ Il répond à des sollicitations élevées.
- ✓ Il est durable (insensible aux variations de température, aux conditions climatiques, ...)
- ✓ Il garantit l'étanchéité de la pièce soudée (ex. : soudure continue de type molette).
- ✓ Limitation de la pollution, pas de modification structurale, sécurité d'exploitation, pas ou peu de préparation, pas de déformation, pas d'apport (métal ou atmosphère), esthétique du produit fini, prix de revient - peu d'énergie - vitesse d'exécution, amortissement important des machines, qualification élémentaire pour le personnel.
- ✓ Soudure "propre" et de très haute qualité (face d'aspect).

- ✓ Rapide (5ms à 3 secondes), efficace, peu polluant.
- ✓ Autogène, ne nécessite pas de produits d'apports.

### **I.5.2. Les inconvénients du procédé de soudage [6]**

- ✓ Epaisseur soudée limitée à la puissance de la machine.
- ✓ Difficulté de contrôle de la qualité des points soudés.
- ✓ Cher, les applications sont limitées, en principe, un poste à souder ne peut réaliser qu'un seul type de soudage.
- ✓ Usure anormale des électrodes.

### **I.5.3. Domaines d'applications [6]**

Elle est utilisée dans de nombreux domaines comme l'industrie des automobiles, électronique, industrie (radiateur, armoire, grille, etc.) et micro-soudage.

## **I.6. Particularités du soudage par résistance [6]**

### **I.6.1. Intérêt des procédés**

Il s'agit d'une soudure autogène, dans laquelle les matériaux fondent sur eux mêmes sans apport extérieur. Le bain de fusion constituant le noyau de point est très localisé et protégé de l'oxydation par l'environnement du creuset, ne nécessitant donc pas de protection, par déploiement d'atmosphère gazeuse extérieure.

La dispersion thermique dans la masse des tôles assemblées est faible, comparée à d'autres procédés tels que l'arc ou la flamme, la température du bain fusion n'excède que peu et durant des temps très courts le point de fusion du matériau. Il induit donc un minimum de tensions résiduelles et de déformations de pièces, d'autant que les électrodes maintiennent l'accostage des pièces durant la dilatation, la fusion et la solidification. Pour la plupart des matériaux usuels le soudage par points n'entraîne que peu de modification structurale (faible grossissement du grain).

Ce mode de soudage peut sauvegarder l'esthétique du produit fini : mobilier métallique, matériel ferroviaire ou aéronautique. C'est un procédé fiable et robuste. Le point de soudure, réalisé dans les meilleures conditions, confère à l'assemblage obtenu une résistance considérable à la sollicitation mécanique, qu'il s'agisse de flexions alternées de mises en contraintes permanentes ou de vibrations même à forte fréquence. Les points de soudure ne sont pas ou peu altérables au vieillissement (au niveau du noyau). Le procédé de soudage par résistance peu s'appliquer avec

peu de préparation voire même sans aucune préparation (armatures de béton). Son prix de revient est attractif. Les machines à souder sont relativement onéreuses mais s'amortissent à long terme elles assurent une productivité élevée, pouvant s'automatiser facilement (robotique, machines spécifiques). Elles nécessitent des puissances électriques d'alimentation, intenses, mais en fait consomment peu d'énergie électrique. Leur maintenance est d'un coût relativement modeste.

Il existe 4 différents modes :

- ✓ Le soudage par résistance par point.
- ✓ Le soudage par résistance par bossage.
- ✓ Le soudage par résistance à la molette.
- ✓ Le soudage par résistance en bout.

### **1.6.2. Le procédé de soudage par résistance (présentation) [6]**

Le soudage est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique et d'une pression ponctuelle. Ce procédé ne nécessite pas d'apport extérieur (Soudage autogène).

L'intensité électrique chauffe la matière jusqu'à la fusion. La pression maintient le contact entre l'électrode et l'assemblage. Pour souder, une pince plaque l'assemblage avec des embouts, ou des électrodes en cuivre, matière bonne conductrice de l'électricité et de la chaleur, ce qui permet de moins chauffer la zone de contact avec cette pince et d'en éviter la fusion, qui se trouve limitée à la zone de contact entre les deux feuilles à souder.

Cette technique est donc dépendante de la résistivité (résistance électrique) des matières, de l'épaisseur totale de l'assemblage et du diamètre des électrodes. Ce procédé est majoritairement utilisé dans l'assemblage de tôle d'acier de faible épaisseur (< 6 mm). Cette technique bénéficie d'un savoir faire très important et d'une productivité incomparable (dans le domaine d'application). Pour exemple, une caisse automobile est assemblée à plus de 80 % par des points soudés. (Environ 5000 points de soudures pour une voiture).

**Tableaux I.1.** Type de soudage et leur caractéristique.

Type de soudure	Vitesse d'avance (cm/min)	Épaisseur mini (mm)	Particularité
Point		0.05	Par recouvrement, face d'aspect, pas de déformation
Étincelage		0.2	Bout à bout, rapidité, onéreux
Molette	Supérieur 3000	0.05	Bout à bout, rapidité, onéreux
Bossage		0.2	Bout à bout, rapidité, onéreux

### I.7. Principe de base

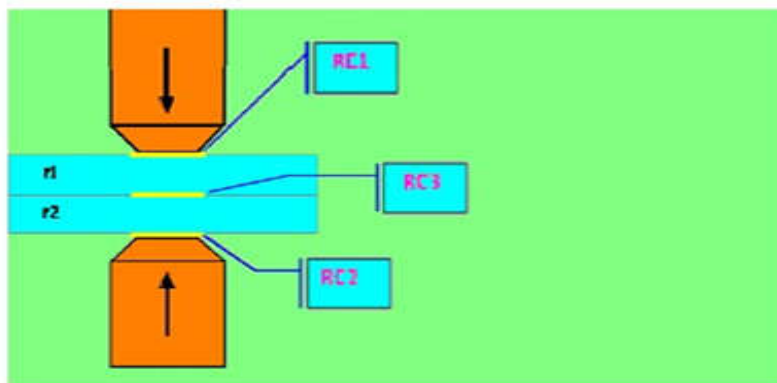
Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble pièces / électrodes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet de joule et la fusion localisée des deux-pièces dans la zone de positionnement des deux électrodes. [6]

#### I.7.1. Rappel de base d'électricité [6]

Loi de Joule : Lorsqu'un courant électrique parcourt un conducteur, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et au temps.

$$W(\text{joule}) = R(\Omega) \times I^2(\text{A}) \times t(\text{S}) \quad (\text{I. 1})$$

#### I.7.2. La résistivité

**Figurier I.2.** La résistivité.

$r_1$  et  $r_2$  = résistance pure ou intrinsèque des pièces à souder.

$RC_1, RC_2, RC_3$  = résistance de contact.

Le courant circulant entre les électrodes est freiné par une résistance  $R$  constituée de 5 résistances qui s'additionnent.

**1. Résistance :** La résistance d'un conducteur, à température ambiante, est :

- Proportionnelle à sa longueur
- Inversement proportionnelle à sa section
- Fonction du matériau constitutif de l'âme du conducteur.

$$R(\text{Ohm}) = \rho(\text{micro-Ohm/cm/cm}^2) \times (L(\text{cm})/S(\text{cm}^2)) \quad (\text{I. 2})$$

**2. La résistivité :** est l'opposition d'un matériau au passage du courant électrique. Les électrodes en cuivre présentent une résistivité faible (1,7micro-ohm/ cm/cm<sup>2</sup> contre 6 pour une tôle standard de 1 mm). C'est une constante propre à chaque métal.

$L$  c'est la longueur de la résistance dans ce cas c'est aussi l'épaisseur de la pièce.  
 $S$  Section de la partie active de l'électrode.

- Définition de résistivité.

$$\mathfrak{R} = R \times I^2 \times t \quad (\text{I. 3})$$

- $R_C$  = Résistance de contact.
- $r$  = Résistance interne.

$$R = RC_1 + RC_2 + RC_3 + r_1 + r_2 \quad (\text{I. 4})$$

$$RC_1 + RC_2 + RC_3 > r_1 + r_2 \quad (\text{I. 5})$$

La résistance de contact entre les électrodes et la pièce à souder et surtout la résistance de contact entre les pièces à souder sont plus élevées que la résistance du métal au passage du courant. Pendant la création du bain de fusion nous aurons une diminution de la résistance

$$RC_1 + RC_2 + RC_3 > r_1 + r_2 \quad (\text{I. 6})$$

En modifiant la force de serrage, on fera varier la résistance de contact et par conséquent

L'apport de chaleur. Mais :

-Trop de pression entraînera une baisse de la résistance  $\Omega$  donc un manque de fusion.

-Pression trop faible entraînera des projections par création d'arc.

Aparté et exemples :

$$W1 = RC1 \times I^2 \times t$$

$$W2 = RC2 \times I^2 \times t$$

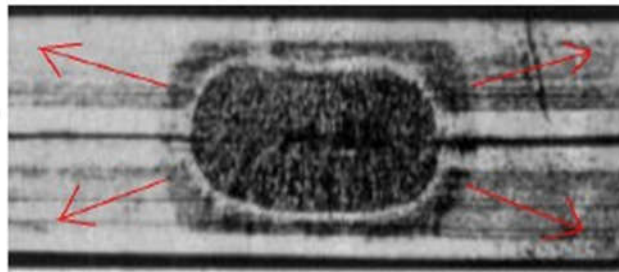
$$W3 = RC3 \times I^2 \times t$$

$$W4 = r1 \times I^2 \times t$$

$$W5 = r2 \times I^2 \times t$$

### I.8. Dissipation thermique dans la pièce

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 \quad (\text{II. 7})$$



**Figurier I.3.** Dissipation thermique dans la pièce.

Le point de soudure ne se développera que si  $RC3$  est plus grande que toutes les résistances. Dans le cas où une résistance serait plus élevée que  $RC3$  la fusion commencerait au niveau de celle-ci et le point de soudure ne serait pas réalisé correctement. Il faudra aussi prendre en compte que  $RC3$  diminue systématiquement lors de la réalisation du point alors que les autres résistances de contact augmentent lors de leur échauffement et de leur dégradation lorsque les résistances de contact seront toutes égales il faudra remettre en état les électrodes.

Nous savons aussi que les résistances de contact seront plus importantes que les résistances intrinsèques cela dépendra de la nature des matériaux (nuances, dureté, résistivité), état de surface (rugosité (RA), oxydes), de la température et surtout de l'effort appliqué par les électrodes. [6]

#### I.8.1. La résistance de contact varie avec l'effort

Pour que le noyau se crée il faudra donc apporter plus d'énergie que ce que la pièce n'en dissipe, la puissance fournie devra être supérieure à la puissance calorifique qui se dissipe.

$RI^2$  Plus l'effort sera important plus la résistance sera faible il faudra donc augmenter l'ampérage pour avoir la même puissance. Pour un effort faible et une  $RC3$  élevée l'ampérage pourra être moindre, néanmoins il faudra que l'effort soit suffisamment appliqué pour maintenir les pièces correctement en contact.



Au plus le contact entre électrodes pièces et pièces est intime au plus la résistance sera forte et le bain de fusion se formera d'autant plus rapidement. La dispersion thermique autour de lingot fondu se fait de manière équiaxe, autour de celui-ci. Donc, si le point est situé très près du bord des tôles, l'environnement du lingot atteint très rapidement la surchauffe entre celui-ci et le bord des tôles. Il peut alors se produire des ruptures du creuset dans cette zone, entraînant une indentation excessive des électrodes et des projections de métal en fusion à l'interface des deux tôles. [6]

### I.9. Constitution d'une machine de soudage par points [6]

- ✓ Un transformateur de courant de soudage (il abaisse la tension, il augmente le courant)
- ✓ Un dispositif de mise en pression des électrodes (manuel, pneumatique ou électrique).
- ✓ Un dispositif de commande du cycle de soudage (séquenceurs).
- ✓ Un circuit de refroidissement.

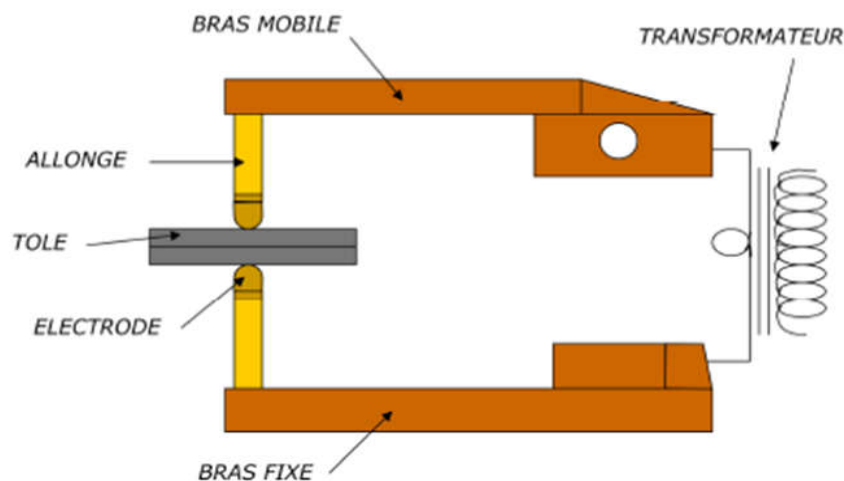


Figure I.4. Constitution d'une machine de soudage par points .

### I.10. Les machines de soudage par résistance [6]

Elles doivent pouvoir effectuer les trois opérations suivantes presser les pièces à souder l'une contre l'autre en appliquant la force voulu et les maintenir en place. Faire passer le courant de soudage nécessaire par les pièces à souder contrôler le temps de soudage. Les machines à souder sont relativement onéreuses et s'amortissent à long terme, elles assurent une productivité élevée, pouvant s'automatiser facilement (robotique, machines spécifiques).

Leurs tailles dépendent de la taille et de la géométrie des pièces à souder.

### I.10.1. Le transformateur CA

C'est la partie centrale de la machine à souder, il détermine la puissance et performances en matière d'épaisseur à souder. La grande majorité des machines sont en courant alternatif, nécessairement monophasées, il faudra donc veiller à l'équilibrage du réseau qui lui, sera en triphasé (380V). C'est un transformateur abaisseur de tension, en effet la tension au primaire sera de 380V pour une tension au secondaire de 10 V.

### I.10.2. Le transformateur CC

Les générateurs de soudage en courant continu, équipés d'un redresseur sur le secondaire du transformateur sont plus onéreux mais insensibles aux chutes de tension, ils conviennent aussi pour une alimentation en 380V, ce qui permet d'équilibrer les charges sur l'alimentation secteur et d'augmenter la puissance utile. Il n'est pas rares de nos jours de fournir une alimentation continue via un onduleur moyen fréquence (même principe que pour les onduleurs utilisés par le soudage à l'arc).

Le soudage par résistance utilise un onduleur moyen ou haute fréquence (1 à 4KHz), ceci permet de réduire la taille du transformateur, permet un meilleur contrôle du processus de soudage grâce à un contrôle rapide du courant et réduit aussi l'usure de l'électrode.

Comme il n'y a pas de chute de tension directe avec un poste de soudage alimenté en courant continu, la puissance totale consommée s'en trouve réduite.

### I.10.3. Le circuit de refroidissement

Celui-ci permet de refroidir les électrodes ainsi que la machine (thyristors et transformateur).

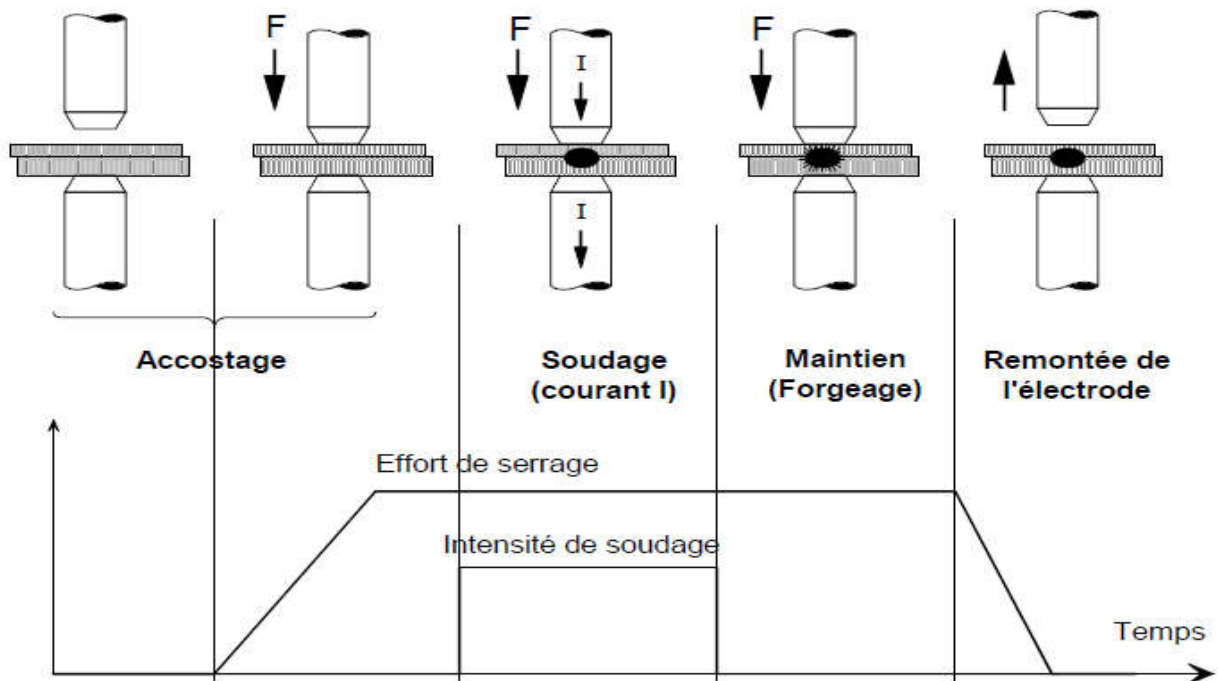
## I.11. Déroulement du cycle de soudage [3]

Un cycle de soudage se décompose en quatre phases :

- 1. L'accostage** : les électrodes se rapprochent et viennent comprimer les pièces à souder, à l'endroit prévu et sous un effort donné. Dans le cas des machines du CRDM, seule l'électrode supérieure se rapproche, l'autre étant fixe. Cette phase se termine quand la valeur d'effort nominale est atteinte.
- 2. Le soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance, et doit, par effet Joule, produire assez de chaleur à l'interface tôle-tôle pour qu'une zone fondue apparaisse,
- 3. Le forgeage** : effectué avec maintien de l'effort mais sans passage de courant, il permet au noyau fondu de se refroidir et de se solidifier en restant confiné,

**4. La remontée de l'électrode :** l'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à la soudure d'un nouveau point.

Ces quatre phases, ainsi que les évolutions de l'effort mécanique et du courant de soudage tout au long d'un cycle, sont représentées sur la figure I.5.



**Figure I.5.** Les différentes phases d'un cycle de soudage.

L'allure des courbes d'effort et d'intensité représentées ici est purement qualitative. Dans la pratique, leurs évolutions ne sont jamais linéaires car les valeurs sont fortement perturbées par les évolutions des résistances mécaniques et électriques rencontrées.

### I.12. Paramètres de soudage [3]

Les paramètres de soudage doivent être adaptés en fonction des caractéristiques des tôles à souder. Par exemple, on conçoit bien que des tôles plus épaisses nécessitent un apport d'énergie plus important, permettant de fondre plus de métal, donc de former un noyau plus gros.

Dans l'ordre chronologique,

**1. L'effort de soudage :** est la première variable entrant en jeu puisqu'elle intervient dès la phase d'accostage. La valeur à appliquer (de l'ordre de quelques centaines de daN pour des produits d'épaisseur inférieure à 1 mm) dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. Dans la pratique, la courbe de mise en effort n'est pas linéaire comme indiqué sur la figure I.4, mais dépend des caractéristiques de la machine à souder.

**2. Le courant de soudage :** est évidemment un paramètre décisif, car il intervient au carré dans l'énergie dissipée par effet Joule. L'intensité efficace à délivrer (typiquement entre 5 et 20 kA)

dépend, là encore, des propriétés mécaniques, de l'épaisseur des tôles à souder ainsi que de la présence ou non de revêtement. On utilise généralement un courant alternatif monophasé à 50 Hz, dont la valeur moyenne efficace sur une soudure peut être réglée par rapport à la valeur de consigne, par un dispositif électronique adapté. Même si nous ne l'avons pas considéré dans ce travail, il est possible d'utiliser d'autres types de courants, notamment le courant continu, obtenu par redressement et filtrage, à partir d'un générateur 1000 Hz.

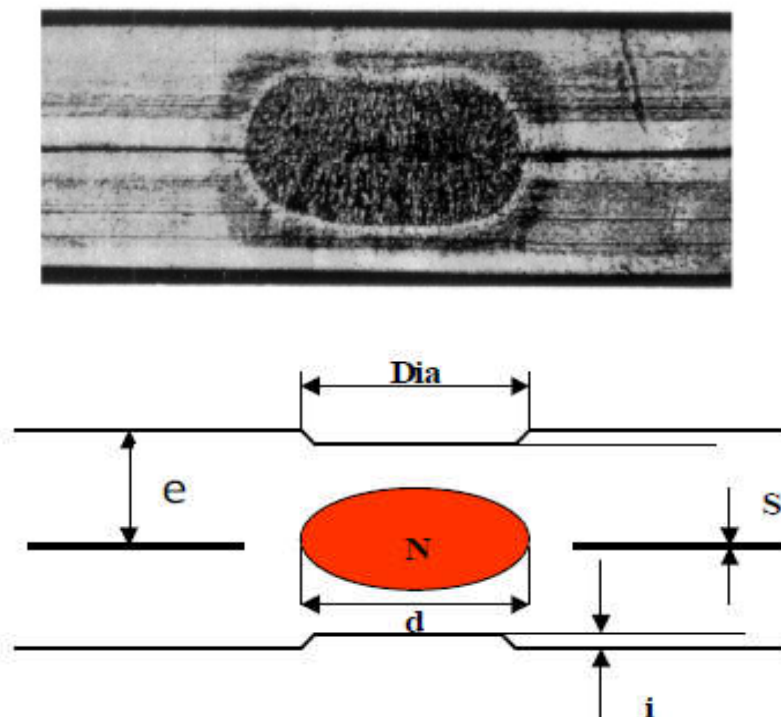
**3. Le temps de soudage :** intervient au premier ordre dans l'énergie électrique dissipée. Ce paramètre, d'une valeur typique de quelques dixièmes de seconde, est donc, lui aussi, adapté aux propriétés des tôles à souder. Lorsque le temps de soudage désiré est particulièrement long, on le découpe en "pulsations" - ou "temps chauds" - séparés par des "temps froids".

**4. Le temps de forgeage :** nécessaire à la solidification de la soudure est généralement du même ordre de grandeur que le temps de soudage.

La réalisation d'un point soudé nécessitant environ 1 à 2 secondes, le procédé est adapté aux cadences de production élevées de l'industrie automobile moderne.

### I.13. Le point et son environnement

Si l'on effectue une coupe transversale d'un point assurant la soudure entre deux tôles, par des moyens métallographiques (sciage, polissage et attaque chimique) il devient possible d'observer la section du point et de son environnement. [5]



Figurier I.6. Le point et son environnement.

Dia : Diamètre de la face active de l'électrode.

d : Diamètre du noyau fondu.

i : Indentation.

S : Joint de séparation

e : épaisseur des tôles.

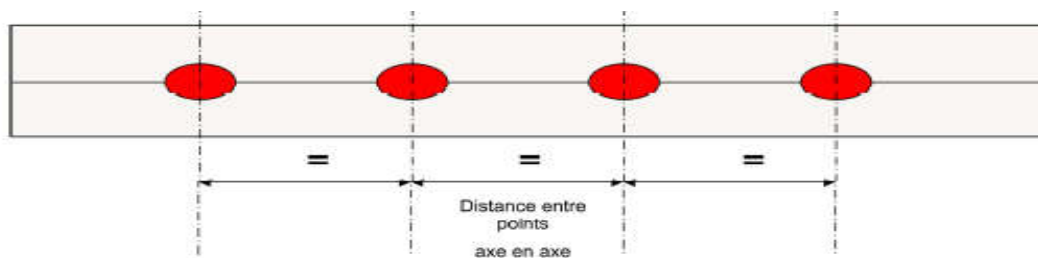
Les dimensions du noyau soudé sont déterminées en fonction de la résistance mécanique recherchée. Par analogie à d'autres procédés d'assemblage discontinus, tels que le vissage ou le rivetage on conçoit bien que les caractéristiques de résistance du point soudé, devront tendre vers la résistance de base, du matériau assemblé (en fonction de la position, de l'espacement et du nombre de points, de vis ou de rivets...). En fait, la résistance au « cisaillement » des points soudés est dans la majorité des cas presque équivalente à celle d'une section identique de la tôle de base, voire même supérieure, pour des tôles dont l'épaisseur est inférieure à 1,5mm.

#### Exemple :

Pour une tôle d'acier doux de 1mm d'épaisseur résistance 50 Kg/F/mm<sup>2</sup>. La résistance d'une section équivalente serait de 600 Kg/F. Celle d'un point au cisaillement peut varier de 360 à 650Kg/F suivant que l'on a procédé en soudage lent ou en soudage rapide.

#### I.13.1. Localisation des points

La résistance mécanique d'un point à la traction/cisaillement est comparable à la résistance d'une vis ou d'un rivet à l'effet « d'entaille ». Il doit donc être situé dans un environnement défini d'où la notion de recouvrement, d'entraxe et de distance par rapport au bord des tôles. Ces règles concernent directement les caractéristiques de résistance mécanique du point, en essais destructifs, mais en outre, elles conditionnent également les paramètres soudage qui permettent d'obtenir ce point. [6]



Figurier I.7. Présenté Localisation des points.

#### I.13.2. Distance entre points

Lorsque l'on réalise l'assemblage de deux pièces par une série de points effectués successivement, dès l'élaboration du deuxième point de série, nous sommes confrontés à des

circuits parallèles, le courant de soudage dérive, dans une proportion non négligeable, par le ou les points précédemment réalisés : c'est l'effet de shunt. Dans les cas où la plage de positionnement des points est restreinte, la perte par dérivation peut atteindre 20% et plus de l'intensité du courant pré-réglé, il faut alors relever d'autant le réglage du courant de soudage ou se contenter d'un lingot fondu de dimensions plus modestes.

D'une manière générale, on évitera systématiquement les assemblages par le point de soudure unique, ce genre d'assemblage présente une résistance médiocre à la torsion et la présence d'un second point, même de section plus faible, constitue un ancrage, qui peut être suffisant pour palier à la faiblesse du point unique en torsion. [6]

### I.13.3. Recouvrement

Nous avons vu dans ce qui précède les rôles de l'effort et du forgeage, en ce qui concerne le maintien du creuset et de la dilatation ; ce maintien n'étant focalisé que dans l'axe d'appui des électrodes. Un recouvrement trop faible, ne permettrait donc pas de maintenir le soulèvement interface en deçà des 10% de  $e$ , admissibles pour un point de qualité. [6]

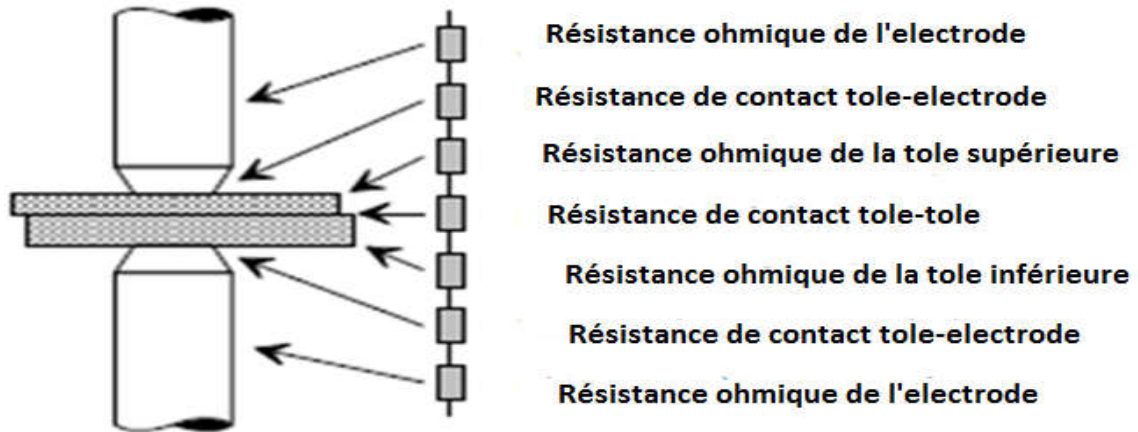
### I.13.4. Distance au bord des tôles

La dispersion thermique autour de lingot fondu se fait de manière équiaxe, autour de celui-ci. Si, donc le point est situé très près du bord des tôles, l'environnement du lingot atteint très rapidement la surchauffe entre celui-ci et le bord des tôles. Il peut alors se produire des ruptures du creuset dans cette zone, entraînant une indentation excessive des électrodes et des projections de métal en fusion à l'interface des deux tôles. [6]

## I.14. mécanisme de formation de la soudure

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle-tôle est créée par effet Joule durant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur dégagée pendant la durée  $t$  en fonction de l'intensité du courant et de la résistance électrique traversée est donnée par la relation :

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_0+t} R i^2 d\tau \quad (I.8)$$



**Figure I.8.** Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues. [3]

Si l'on néglige les phénomènes capacitifs, l'équivalent électrique de l'assemblage de soudage par points est constitué de résistances en série (cf. figure I.9). Le dégagement de chaleur est donc maximal à l'endroit où la résistance est la plus élevée.

Dans la pratique, les résistances de contact sont, au début d'un cycle de soudage, plus grandes que les résistances ohmiques des tôles et des électrodes. Dans le cas de produits revêtus, il est possible d'utiliser le même modèle que celui de la figure I.9 (les résistances des revêtements étant alors incluses dans les résistances de contact), ou de compléter le modèle en ajoutant quatre résistances ohmiques du revêtement.

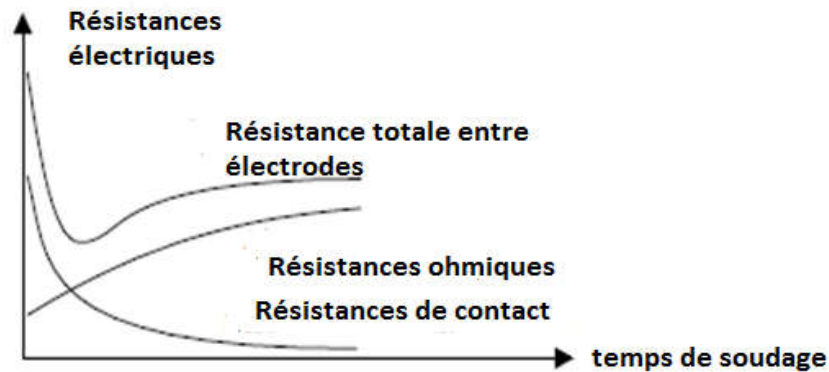
Ces diverses résistances, qui ont une influence directe sur les dégagements de chaleur, donc sur la constitution du noyau fondu, ne sont pas constantes au cours d'un cycle de soudage. Elles dépendent en effet fortement de la température :

-les résistances ohmiques augmentent en fonction de la température, les résistances de contact diminuent lorsque la température augmente. En effet, les contacts étant initialement "ponctuels" plutôt que surfaciques, ces résistances dépendent directement, à pression donnée, des caractéristiques mécaniques des matériaux en contact et de leur état de surface : la dureté des matériaux diminuant avec l'échauffement, les surfaces de contact augmentent. Il y a donc une diminution des résistances de contact avec la température.

En début de soudage, les dégagements de chaleur les plus importants sont situés au niveau des différentes discontinuités de l'assemblage :

-à l'interface tôle-tôle, cette chaleur sert à faire fondre le revêtement et l'acier afin de former le noyau fondu, aux interfaces électrode - tôle, cette chaleur - qui ne contribue pas à la formation de la soudure - est en partie évacuée par les électrodes, qui, outre une bonne conductivité électrique, doivent par conséquent avoir une conductivité thermique élevée.

La figure I.9 : représente les évolutions des différentes résistances au cours d'un cycle de soudage dans le cas de tôles non revêtues.



**Figure I.9.** Évolution des résistances en cours de soudage sur tôles nues.

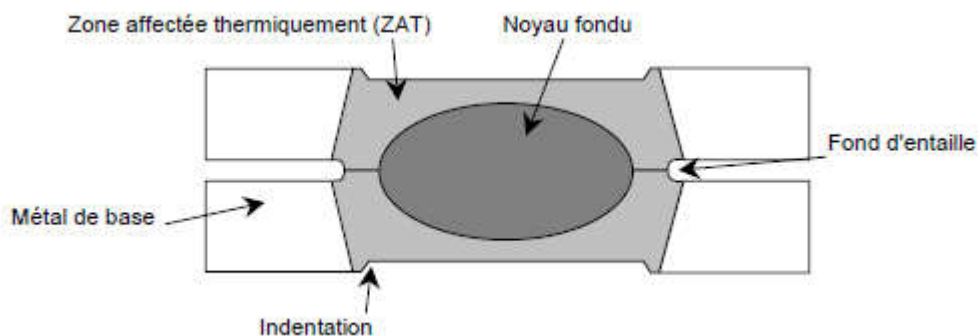
L'analyse des évolutions de ces résistances permet de mieux comprendre la cinétique de formation du point : l'échauffement est réalisé en premier lieu au niveau des interfaces, et l'électrode évacue les calories créées à l'interface tôle-électrode. Le noyau fondu s'initie à l'interface tôle-tôle et ne progresse que grâce aux résistances ohmiques des tôles.

Dans le cas de tôles revêtues, le graphe de la figure I.9 se complique sensiblement, car il faut tenir compte de la résistance ohmique du revêtement ainsi que de sa température de fusion. Il est difficile de définir une tendance générale car certains revêtements ont une résistivité plus faible que celle de l'acier (cas des revêtements à base de zinc), tandis que d'autres ont une résistivité plus élevée (cas des revêtements organiques). [3]

#### I.14.1. Géométrie d'un point soudé

La géométrie d'un point soudé présente trois particularités (voir figure I.10) :

- Discontinuité de l'assemblage.
- Présence d'une entaille concentrant les contraintes en cas de sollicitations mécaniques.
- Indentation, par pénétration de l'électrode, des faces externes de l'assemblage.



**Figure I.10.** Coupe d'un point soudé.



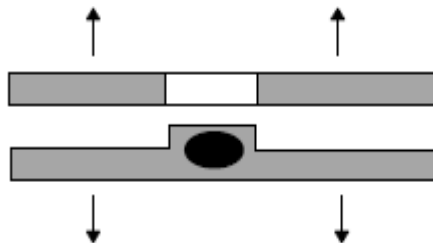
Qualitativement, on constate que les caractéristiques mécaniques de la soudure sont principalement influencées par la taille du noyau fondu, et en particulier par son diamètre dans le plan des deux tôles.

Si la puissance électrique fournie est trop faible, le noyau fondu est trop petit, voire inexistant, et les caractéristiques mécaniques du point soudé risquent d'être insuffisantes. Plus on augmente la puissance fournie, plus la zone fondue est étendue et plus le point est résistant aux contraintes mécaniques. Cependant, passé un certain seuil, le noyau fondu atteint soit le fond d'entaille soit une des faces extérieures de la tôle : sous l'effet de la pression mécanique exercée par les électrodes, on assiste alors à une éjection de métal fondu (phénomène dit "d'expulsion") : la qualité du point soudé s'en trouve dégradée.

Ainsi, pour un type de tôle, une durée de soudage et un effort donnés, il existe une intensité minimale, en dessous de laquelle la tenue mécanique minimale définie par le cahier des charges de l'utilisateur du procédé n'est pas assurée, et une intensité maximale, au-dessus de laquelle il y a expulsion. Nous allons revenir dans le paragraphe suivant sur cette plage d'intensités acceptables, appelée "domaine de soudabilité" du produit. [3]

### I.15. Caractérisation d'une tôle d'acier revêtu

Par caractérisation d'une tôle, nous entendons ici l'étude de son aptitude au soudage par points dans certaines conditions. Il s'agit de déterminer, pour une tôle donnée, son domaine de soudabilité et la durée de vie des électrodes de soudage.



**Figure I.11.** Déboutonnage d'un point soudé.

Ce test de déboutonnage peut être réalisé de plusieurs manières (traction pure, traction cisaillement, pelage, etc.). Les diamètres minimal et maximal du bouton sont ensuite mesurés à l'aide d'un pied à coulisse. Le critère d'acceptabilité porte alors à la fois sur le diamètre minimal<sup>10</sup>, et sur la moyenne des deux<sup>11</sup>. Cette approche suppose implicitement que le bouton a une forme elliptique et donc que ses diamètres minimal et maximal :

1. sont facilement détectables et mesurables,
2. caractérisent bien la taille de la soudure.

Nous reviendrons dans les chapitres suivants sur cette hypothèse.

Notons cependant que le test destructif ne met pas forcément en évidence un bouton

Mesurable : on peut observer une rupture en plan de joint ou un "déchirement" de ce bouton. [3]

### I.15.1. La dégradation des électrodes

Ce test vise à estimer le nombre de points soudés de bonne qualité (en termes de diamètre minimal acceptable) que l'on peut effectuer avec un jeu d'électrodes en gardant les mêmes réglages de paramètres, et en particulier l'intensité. En effet, on assiste à une dégradation des électrodes en fonction du nombre de points soudés, qui se traduit par une diminution de la qualité des soudures.

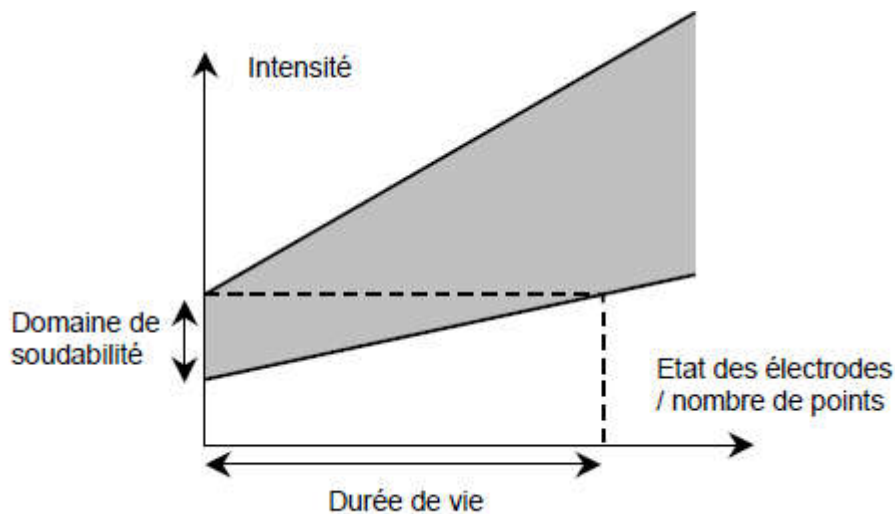
Cette dégradation des électrodes est due à une combinaison d'effets mécanique et chimique activés par les températures atteintes au niveau des interfaces électrode - tôle. L'usure des électrodes est particulièrement rapide sur produits revêtus zingués (avec - par ordre de vitesse de dégradation - les revêtements galvanisé-allié, électro zingué et galvanisé), pour lesquels on assiste à la création d'un alliage entre le cuivre des électrodes et le zinc du revêtement (formation de laiton). Cette dégradation entraîne un élargissement de la face active des électrodes et donc, à intensité de soudage égale, une diminution de la densité de courant.

L'échauffement est donc de moins en moins localisé, ce qui a pour effet paradoxal de diminuer la taille du noyau fondu, de telle sorte que l'intensité nécessaire pour obtenir une taille de bouton donnée est de plus en plus élevée. Autrement dit, le domaine de soudabilité du produit se décale vers les hautes intensités. On définit alors la durée de vie des électrodes, pour certains réglages des paramètres, comme le "nombre de points de qualité satisfaisante (selon le même critère que pour le domaine de soudabilité) que l'on peut souder avec un jeu d'électrodes en se plaçant à l'intensité haute du domaine de soudabilité correspondant aux électrodes neuves". La figure I.12, qui illustre les notions de décalage du domaine de soudabilité et de durée de vie des électrodes, est tout à fait qualitative. Elle suppose en effet que l'état des électrodes peut être caractérisé par le nombre de points soudés ; or cela dépend également de l'intensité à laquelle ces points ont été soudés. Par ailleurs, l'évolution des limites basses et hautes n'est pas forcément linéaire - ni même monotone. En revanche, la tendance à l'élargissement du domaine de soudabilité est effectivement présente et résulte du fait qu'avec des électrodes usées, l'expulsion se produit pour des diamètres de boutons plus élevés.

Pour déterminer la durée de vie des électrodes, on utilise des électrodes neuves, et l'on soude des tôles appelées bandes d'usure en se plaçant à la limite supérieure du domaine de soudabilité. Suivant la durée de vie estimée a priori, on réalise tous les 200, 100 ou 50 points une bande de contrôle de 10 points destinée à subir des essais mécaniques.

En fonction des diamètres de boutons obtenus sur cette bande de contrôle et des mêmes critères de qualité que pour la détermination du domaine de soudabilité, l'opérateur décide soit de poursuivre l'essai en gardant la même intensité efficace, soit d'effectuer un recalage de cette

intensité. Dans un contexte industriel, l'opération visant à compenser l'usure des électrodes par une augmentation progressive de l'intensité de soudage est désignée sous le nom de loi de déphasage.



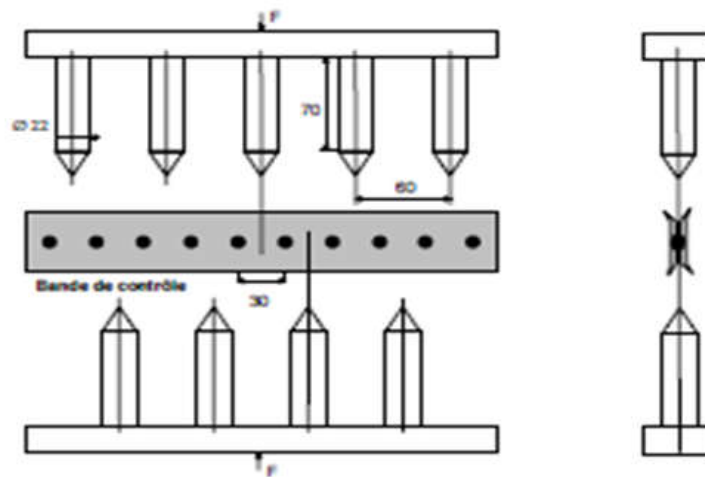
**Figure I.12.** Décalage du domaine de soudabilité vers les intensités hautes avec la dégradation des électrodes

Lors d'un recalage au sens de l'intensité utilisée correspond à la nouvelle limite supérieure du domaine de soudabilité. Il faut donc de nouveau déterminer l'intensité maximale sans expulsion avec les électrodes usées. L'essai de durée de vie est arrêté - à l'initiative de l'opérateur - lorsqu'il juge, après un ou deux recalages, que le pourcentage d'augmentation du courant est trop élevé, voire que le nombre de points par incrémentation est trop faible, ou que la qualité du point (qu'il estime visuellement) est trop mauvaise.

Pour contrôler la qualité des points de la bande de contrôle, on utilise un dispositif permettant de déboutonner simultanément les 10 points. Ce dispositif, communément appelé les "dents de la mer", est schématisé sur la figure I.13.

Pour des raisons de symétrie évidentes, on ne considère pas les diamètres des deux points extrêmes comme significatifs. En effet, ils ne sont soumis que d'un seul côté à une force d'écartement. Il peut même arriver qu'ils ne soient pas totalement déboutonnés. Dans ce cas, les deux tôles sont séparées à l'aide d'un marteau et d'un burin.

Suivant le produit, la durée de vie des électrodes est, significativement différente. Ainsi, par exemple sur les produits GA et GZ 2 dont nous nous servons au chapitre 1 pour illustrer les résultats de notre méthode, la durée de vie sans recalage est respectivement égale à 3500 et 400 points. [3]



**Figure I.13.** Dispositif de déboutonnage simultané de 10 points de soudure.

### I.16. Hygiène et sécurité [3]

La protection du personnel opérant sur ces machines est certes nécessaire (vêtements, lunettes) mais moins lourde que dans le cas de l'arc ou de la flamme (pas ou peu de dégagements gazeux nocifs).

La sécurité électromécanique de ces machines est conforme aux directives du Ministère du Travail et normalisée :

Décret du Ministère du Travail correspondant à la date de fabrication de la machine.

### I.17. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu une généralité sur le soudage par points (par résistance). Un historique et définition, les domaines d'applications, puis on a exposé les principes fondamentaux du soudage par point (Constitution d'une machine, Paramètres de soudage.)

**Chapitre II**  
**Principe de**  
**fonctionnement du**  
**transformateur**

## II.1. Introduction

Le transformateur est un élément très utile dans l'industrie permet de transférer de l'énergie (sous forme alternative) d'une source à une charge, tout en modifiant la valeur de la tension. La tension peut être soit augmentée ou abaissée selon l'utilisation voulue. Le changement d'un niveau de tension à un autre se fait par l'effet d'un champ magnétique.

## II.2. Historique

En 1820, Hans Christian Oersted, physicien danois a découvert qu'un conducteur véhiculant un courant générant un champ magnétique. Quelques années plus tard, en 1830, Josef Henry donna corps aux notions d'induction et de self-induction. Entre les mois d'août et de novembre 1831 l'anglais Michael Faraday procéda à une série d'expériences avec un appareil constitué d'un anneau de fer et d'enroulements de fil de cuivre isolé.

En 1882 Lucien Gaulard (1850-1888), jeune électricien français, chimiste de formation, présente à la Société Française des Electriciens un "générateur secondaire", dénommé depuis transformateur. Devant le scepticisme de ses compatriotes, il s'adresse à l'anglais Gibbs et démontre le bien-fondé de son invention à Londres [8].

En 1883, Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs réussissent à transmettre pour la première fois, sur une distance de 40 km, du courant alternatif sous une tension de 2000 Volts à l'aide de transformateurs avec un noyau en forme de barres [9].

En 1884 Lucien Gaulard met en service une liaison bouclée de démonstration (133 Hz) alimentée par du courant alternatif sous 2000 Volts et allant de Turin à Lanzo et retour (80km). On finit alors par admettre l'intérêt du transformateur qui permet d'élever la tension délivrée par un alternateur et facilite ainsi le transport de l'énergie électrique par des lignes à haute tension. La reconnaissance de Gaulard interviendra trop tardivement.

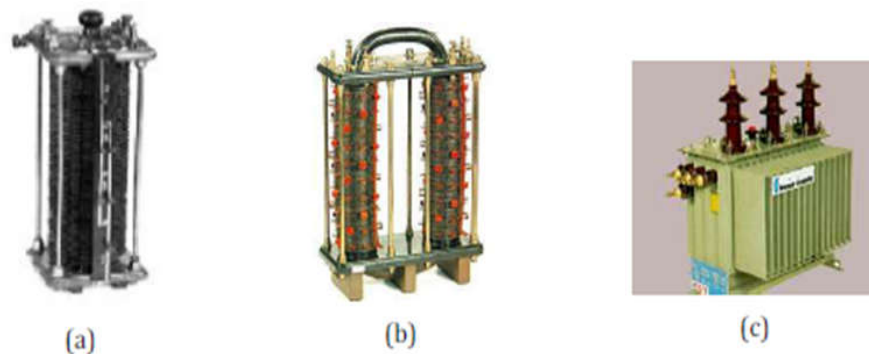
Entre-temps, des brevets ont été pris aussi par d'autres. Le premier brevet de Gaulard en 1882 n'a même pas été délivré en son temps, sous prétexte que l'inventeur prétendait pouvoir faire "quelque chose de rien" !

Gaulard attaque, perd ses procès, est ruiné, et finit ses jours dans un asile d'aliénés. Le transformateur de Gaulard de 1886 n'a pas grand chose à envier aux

transformateurs actuels, son circuit magnétique ferme (le prototype de 1884 comportait un circuit magnétique ouvert, d'où un bien médiocre rendement) est constitué d'une multitude de fils de fer annonçant le circuit feuilleté à tôles isolées [8].

Ainsi, en 1885, les Hongrois Károly Zipernowsky, Miksa Déry et Otto Titus Bláthy mettent au point un transformateur avec un noyau annulaire commercialisé dans le monde entier par la firme Ganz à Budapest.

Dans le même temps aux USA, W. Stanley développe également des transformateurs. Actuellement les transformateurs sont très développés soit du côté de construction soit de conception (750/400 kV, 400/220 kV, 220/60 kV, 60/10 ou 30 kV, 10 ou 30kV/380 V).



**Figure II.1.** Différents types des transformateurs.

**(a)** Transformateur linéaire de Lucien Gaulard [9].

**(b)** Transformateur Lucien Gaulard (1886) à circuit magnétique fermé [9].

**(c)** Transformateur de distribution moderne.

### II.3. Utilisation de transformateur [10]

Les transformateurs sont principalement utilisés pour convertir une tension à l'autre. Le processus d'augmentation de la tension est appelé élévateur, tout en diminuant la tension appelée abaisseur.

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 du transformateur de mesure d'une tension plus

élevée, ce qui permet une tension d'alimentation d'équipements pour fonctionner sur une batterie.

Les transformateurs sont utilisés dans les domaines suivant :

- Distribution industrielle modification de 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.

#### II.4.Définition

Le transformateur est un convertisseur « alternatif-alternatif » qui permet de modifier la valeur efficace d'une tension alternative en maintenant la fréquence et la forme de l'onde inchangée. Les transformateurs sont des machines entièrement statiques, cette absence de mouvement est d'ailleurs à l'origine de leur excellent rendement. Leur utilisation est primordiale pour le transport de l'énergie électrique où l'on préfère « transporter des volts plutôt que des ampères ». Ils assurent l'élévation de tension entre la source (alternateurs EDF fournissant une tension de 20000 V) et le réseau de transport (400000 V en Europe, 1000000 V en Russie ou au Canada), puis ils permettent l'abaissement de la tension du réseau vers l'utilisateur. En outre, le transformateur procure un isolement entre réseaux et permet de changer de régime de neutre. Les transformateurs sont réalisés en toutes puissances et tensions, de quelques VA et à basse tension pour l'alimentation de circuits électroniques à quelques centaines de MVA et de kV pour l'alimentation ou le couplage des réseaux de transport de l'énergie électrique. Le transformateur est également utilisé comme adaptateur d'impédance en électronique. [11]





Figurier II.2. Transformateur.

## II.5. Symboles

On représente les deux symboles les plus usuels du transformateur monophasé sur la figure II.3. Les deux symboles représentés font apparaître la convention dite « des points ». Celle-ci permet de repérer les sens conventionnels des tensions. Une fois ce sens repéré, il faut ensuite orienter les courants de telle manière à toujours faire apparaître le primaire en récepteur et le secondaire en générateur. C'est uniquement en respectant ces conventions que les relations fondamentales s'appliquent sans souci de signe. [11]

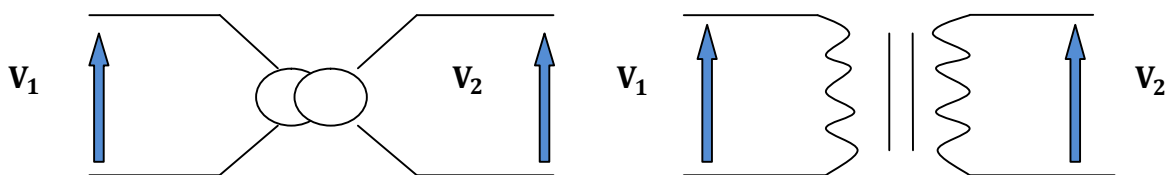


Figure II.3. Symboles du transformateur.

## II.6. Principe – Équations [11]

### II.6.1. Constitution – Principe

Un transformateur comprend :

#### 1. Un circuit magnétique fermé :

- ✓ De perméabilité magnétique aussi haute que possible afin de faciliter le plus possible le passage des lignes de champ magnétique.

- ✓ D'hystérésis aussi faible que possible pour limiter les pertes.
- ✓ Feuilleté (tôles de 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur) afin de limiter les courants de Foucault.
- ✓ De résistance électrique aussi élevée que possible, toujours dans le but d'affaiblir les courants de Foucault, à cette fin on utilise des aciers au silicium (2 à 3 %).

## 2. Deux enroulements (bobines) :

- ✓ Le primaire alimenté par un générateur de tension alternative de tension  $V_1$  et comportant  $N_1$  spires. Il absorbe le courant  $I_1$ . Le primaire transforme l'énergie électrocinétique reçue en énergie magnétique. C'est un récepteur d'énergie électrique qui transforme cette énergie en énergie magnétique.
- ✓ Le secondaire comporte  $N_2$  spires ; il fournit, sous la tension  $V_2$ , un courant  $I_2$  au dipôle récepteur. Le secondaire transforme l'énergie magnétique reçue du primaire en énergie électrocinétique. C'est un générateur d'énergie électrique. Les deux enroulements sont isolés électriquement, mais magnétiquement couplés par le flux.

Nous choisissons un sens arbitraire pour le flux  $\Phi(t)$  ici le sens d'une prise de champ. Les autres signes en découlent. Les sens des courants  $i_1(t)$  et  $i_2(t)$  sont pris de telle façon que les flux créés soient positifs donc additifs. Le primaire est un récepteur, nous adoptons la convention « récepteur », le secondaire est un générateur, nous adoptons la convention « générateur ».

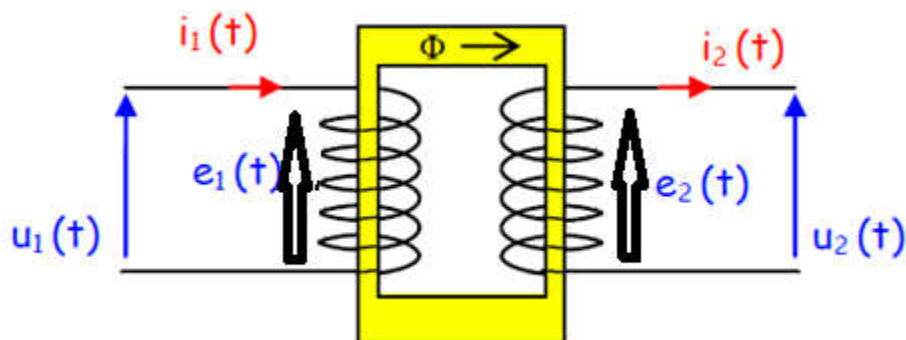


Figure II.4. Transformateur monophasé.

### II.6.2. Transformateur monophasé parfait [11]

Un transformateur parfait :

- ✓ Pas de fuite magnétique.

- ✓ Pas de pertes Joule ( $r_1=r_2=0$ ).
- ✓ Enroulement sans fuite magnétique.
- ✓ La perméabilité est infinie (réductance nulle).

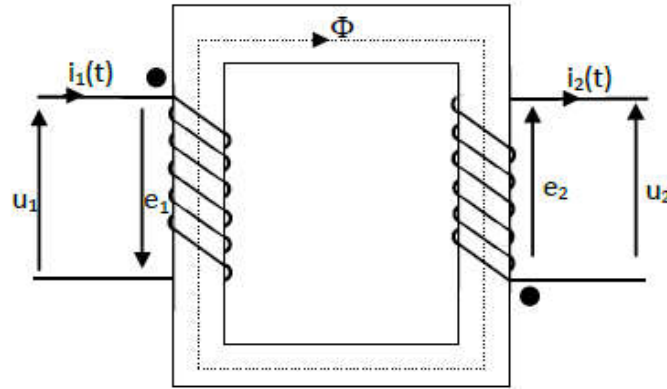


Figure II.5. Transformateur monophasé parfait.

### II.6.3. Relation de Base sur le transformateur [11]

En appliquant théorème d'Ampère

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \mathbf{N} \times \mathbf{I} \quad (\text{II. 1})$$

$$N_1 \times I_1 - N_2 \times I_2 = \mathfrak{R} \times \Phi \quad (\text{II. 2})$$

On sait par hypothèse que  $\mathfrak{R}=0$ .

Les f.e.m  $e_1(t)$  et  $e_2(t)$  sont de sens opposé aux flux  $\Phi_1(t)$  et  $\Phi_2(t)$ , d'après la loi de Faraday :

$$e_1(t) = -\frac{d\Phi_1(t)}{dt} \quad (\text{II. 3})$$

- $e_1(t)$  La f.e.m induite au primaire, en volts [V].
- $\Phi_1(t)$  Le flux magnétique au primaire, en webers [Wb].
- $\frac{d\Phi_1(t)}{dt}$  La dérivée du flux  $\Phi_1(t)$  par rapport au temps  $t$ .

$$e_2(t) = -\frac{d\Phi_2(t)}{dt} \quad (\text{II. 4})$$

- $e_2(t)$  La f.e.m induite au secondaire, en volts [V].
- $\Phi_2(t)$  Le flux magnétique au secondaire, en webers [Wb].

- $\frac{d\Phi_2(t)}{dt}$  La dérivée du flux  $\Phi_2(t)$  par rapport au temps t.

#### II.6.4. flux magnétique [11]

La tension sinusoïdale  $u_1(t)$ , de pulsation  $\omega$ , crée à travers chaque spire, un flux  $\Phi(t)$ , sinusoïdal de même pulsation et déphasé de  $-\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension  $u_1(t)$  :

$$\Phi(t) = \frac{U_1}{\sqrt{2}} \times N_1 \times \omega \times \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (\text{II. 5})$$

Si  $u_1(t) = U_1 \times \sqrt{2} \times \cos(\omega t)$  (II. 6)

#### II.6.5. Formule de Boucherot [11]

L'amplitude maximale du champ magnétique, B, ne dépend que de la valeur efficace de la tension appliquée au primaire  $u_1(t)$ , de la section droite et constante du circuit magnétique S, et enfin de la fréquence f, fixée par le réseau.

$$B = \frac{U_1}{4.44 \times N_1 \times F \times S} \quad (\text{II. 7})$$

- B La valeur maximale du flux magnétique, en teslas [T].
- $U_1$  La valeur efficace de la tension  $u_1(t)$ , en volts [V].
- f La fréquence f du réseau utilisé est exprimée en hertz [Hz].
- S La section droite est exprimée en mètres<sup>2</sup> [m<sup>2</sup>].
- $N_1$  Le nombre de spires au primaire [sans unités].

Attention la relation précédente n'est vraie qu'en utilisant les données du primaire  $V_1$  et  $N_1$ , en effet la valeur maximale du champ magnétique B ne se retrouve pas dans tous les cas au secondaire, notamment lorsque l'on tient compte des pertes magnétiques.

#### II.6.6. Le rapport de transformation du transformateur [11]

Nous appelons m le rapport de transformation du transformateur. Cette grandeur est, par définition, le rapport entre le nombre de spires au secondaire par rapport au nombre de spires au primaire, soit :

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

- $m$  Rapport de transformation [sans unités].
- $N_1$  Le nombre de spires au secondaire [sans unités].
- $N_2$  Le nombre de spires au primaire [sans unités].

### II.6.7. Les relations entre les tensions pour le transformateur parfait

A chaque instant, chaque spire est traversée par le même flux magnétique.

Au primaire :

$$e_1(t) = -N_1 \times \frac{d\Phi(t)}{dt} \qquad u_1(t) = -e_1(t) \qquad (\text{II. 9})$$

Au secondaire :

$$e_2(t) = -N_2 \times \frac{d\Phi(t)}{dt} \qquad u_2(t) = e_2(t) \qquad (\text{II. 10})$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{e_1}{N_1} = -\frac{e_2}{N_2} \qquad \Rightarrow \qquad \frac{e_2}{e_1} = \frac{N_2}{N_1} \qquad (\text{II. 11})$$

$$\frac{e_2}{e_1} = -\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} \qquad (\text{II. 12})$$

Cette relation indique que les tensions  $u_1(t)$  et  $u_2(t)$  sont en opposition de phase. La relation entre les valeurs efficaces  $V_1$  et  $V_2$  ne tient pas compte du déphasage :

$$m = \frac{V_2}{V_1} \qquad (\text{II. 13})$$

- $m$  Rapport de transformation.
- $V_2$  La valeur efficace de la tension  $u_2(t)$ , en volts [V].
- $V_1$  La valeur efficace de la tension  $u_1(t)$ , en volts [V].

### II.6.8. Les relations entre les intensités [11]

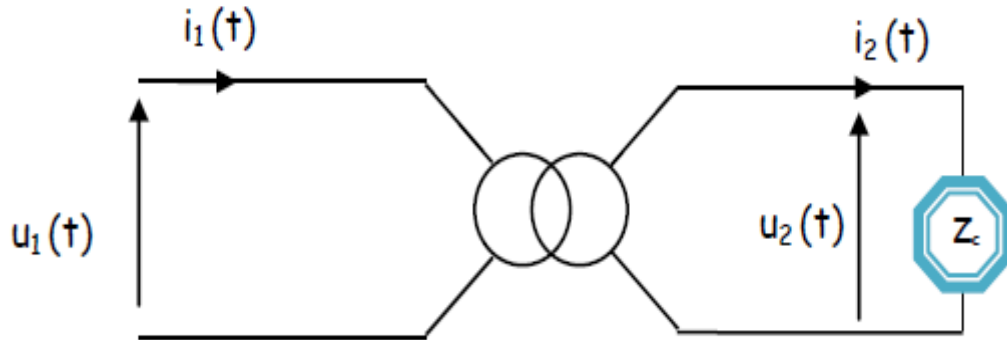
Dans tous les cas que nous étudierons, le transformateur sera considéré comme parfait pour les courants, ainsi pour tous courants non nuls, la relation entre les valeurs efficaces  $I_1$  et  $I_2$  s'exprime ainsi :

$$m = \frac{I_1}{I_2} \qquad (\text{II. 14})$$

- $m$  Rapport de transformation [sans unités].
- $I_1$  La valeur efficace de l'intensité  $i_1(t)$ , en ampères [A].
- $I_2$  La valeur efficace de l'intensité  $i_2(t)$ , en ampères [A].

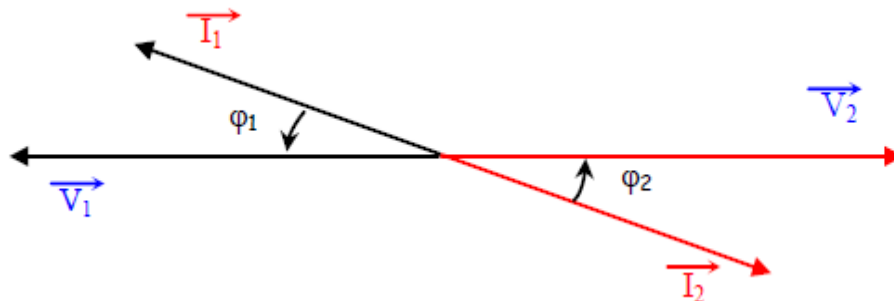
### II.6.9. Diagramme de Fresnel [11]

Un transformateur parfait est alimenté au primaire par une tension sinusoïdale  $u_1(t)$ . Il alimente une charge  $Z_C$ , telle que le courant  $i_2(t)$  présente un déphasage d'un angle  $\varphi_2$  avec la tension  $u_2(t)$ .



**Figure II.6.** Schéma équivalent d'un transformateur parfait.

Il est possible d'évaluer l'intensité  $i_1(t)$  du courant appelé au primaire à l'aide d'un diagramme de Fresnel. Ce courant dépend de la charge appliquée au secondaire.



**Figure II.7.** Diagramme de Fresnel.

La valeur de l'intensité efficace du courant  $I_2$  dépend de la charge appliquée au secondaire, il en est de même pour le facteur de puissance  $\cos\varphi_2$ . Ces deux grandeurs imposent la valeur de l'intensité efficace du courant  $I_1$  appelé au primaire, ainsi que le facteur de puissance du primaire, sachant que  $\varphi_1 = \varphi_2$ .

### II.7. Principe de fonctionnement [12]

Le bobinage du primaire est alimenté par une tension alternative sinusoïdale  $u_1$ . Il est alors parcouru par un courant  $i_1$ , également alternatif sinusoïdal, de valeur efficace  $I_1$ .

La circulation d'un courant dans le circuit primaire génère un champ magnétique  $\vec{B}$ , évoluant au cours du temps, proportionnel à la valeur efficace  $I_1$  du courant primaire et également au nombre de spires  $N_1$  du bobinage.

Ce champ magnétique  $\vec{B}$  génère alors un flux  $\Phi$  évoluant au cours du temps, et circulant préférentiellement à travers les parties métalliques, c'est à dire à travers le circuit magnétique du transformateur. Si ce circuit magnétique n'est pas saturé, le flux  $\Phi$  évolue de façon alternative sinusoïdale. Si il n'y a aucune fuite de flux, l'intégralité du flux généré par le bobinage primaire se retrouvera au niveau du bobinage secondaire.

Dans le cas contraire, quelques lignes de flux ne circule pas dans le circuit magnétique: ces lignes de flux sont alors perdues et on retrouve au niveau du secondaire une grande partie du flux généré par le bobinage secondaire.

Le flux que l'on retrouve au secondaire est un flux qui évolue également de la même façon que le flux au primaire. Il engendre alors une tension aux bornes du bobinage secondaire, tension alternative sinusoïdale, de valeur efficace  $U_2$ .

La plaque signalétique du transformateur renseigne sur son utilisation :

S'il est indiqué 220 V / 24 V ; 50 Hz, cela veut dire que le primaire étant alimenté sous une tension de valeur efficace  $U_1 = 220$  V et de fréquence  $f = 50$  Hz, celui ci délivre une tension de valeur efficace  $U_2 = 24$  V possédant la même fréquence  $f = 50$  Hz.

Si la valeur efficace  $U_2$  est inférieure à  $U_1$ , le transformateur est dit abaisseur de tension.

Si la valeur efficace  $U_2$  est supérieur à  $U_1$ , le transformateur est dit élévateur de tension.

Un transformateur monophasé peut également jouer le rôle d'isolation galvanique : le bobinage du secondaire n'est nullement relié au bobinage du primaire par une connexion électrique.

On dit que le transformateur est à vide quand le circuit secondaire est ouvert. Il ne débite alors aucun courant. L'enroulement primaire se comporte dans ce cas comme une self en courant alternatif, une simple inductance qui s'oppose au passage du courant.

Le transformateur fonctionne en charge quand un récepteur est raccordé à sa sortie. Le courant débité par le secondaire crée alors un champ magnétique opposé au champ produit par le primaire. Il s'ensuit une augmentation du courant dans le primaire et en fin de compte il y a égalité quasi parfaite entre la puissance que génère le secondaire et la puissance consommée par l'enroulement primaire.

En toute rigueur, il y a bien quelques pertes entre la puissance que consomme l'enroulement primaire et celle qui sort du secondaire mais, en théorie du moins, on peut dire que :

$$P_1 = P_2 = 1 \quad (\text{II. 15})$$

- ✓ Les transformateurs ont un très bon rendement, de l'ordre de 99%
- ✓ Les flux magnétiques produit par les courants primaires et secondaires s'annulent.
- ✓ Le flux généré par une bobine étant proportionnel au courant et au nombre de spires, on peut comprendre que

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

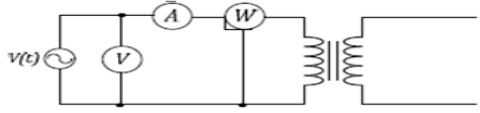
### II.8. Essais des transformateurs [13]

A partir de ces essais on peut déterminer les paramètres du circuit équivalent du transformateur représenté dans la figure II.8. Il s'agit des essais suivants :

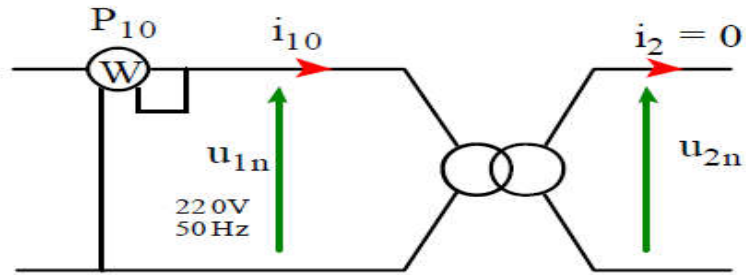
#### II.8.1. Essai à vide

L'essai à vide consiste à appliquer la tension nominale au primaire en gardant le secondaire à vide. La mesure du courant, de la puissance et de la tension permet la détermination des paramètres shunts du circuit équivalent. La méthode de calcul de ces paramètres et le montage de mesure utilisés sont résumés dans le tableau II.8.1

**Tableau II.8.1.** Essai à vide (cas monophasé)

<b>Circuit de test</b>	
<b>Facteur de puissance</b>	$\cos(\varphi) = \frac{P_0}{V_0 \times I_0}$
<b>Résistance shunt</b>	$\frac{1}{R_m} = \frac{I_0}{V_0} \times \cos(\varphi)$
<b>Réactance shunt</b>	$\frac{1}{X_m} = \frac{I_0}{V_0} \times \sin(\varphi)$





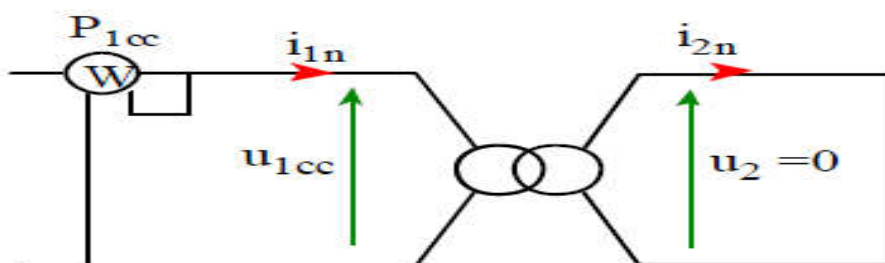
Figurier II.8. Schéma équivalent de l'essai à vide.

**II.8.2. Essai en court-circuit**

L'essai en court-circuit consiste à appliquer la tension réduite (valeur minimale) au primaire en gardant le secondaire en court-circuit. Puis on augmente la tension primaire jusqu'à le courant secondaire atteint sa valeur nominale. On mesure la tension, le courant et la puissance de court-circuit.

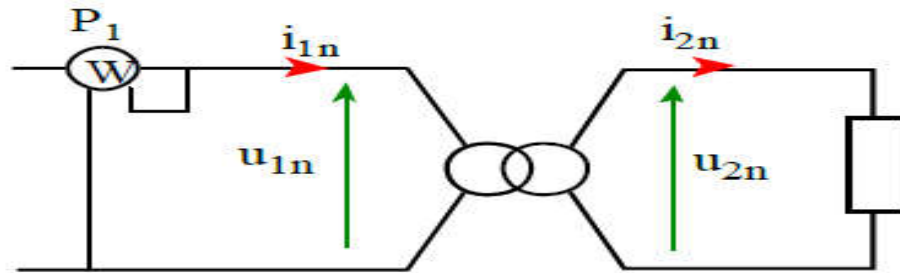
**Tableau II.8.2.** Essai en court-circuit (cas monophasé)

Circuit de test	
Facteur de puissance	$\cos(\varphi) = \frac{P_{cc}}{V_{cc} \times I_{cc}}$
L'impédance équivalente	$R_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \times \cos(\varphi)$
Réactance série	$X_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \times \sin(\varphi)$



Figurier II.9. Schéma équivalent de l'essai en court circuit.

### II.8.3. Essai en charge



Figurier II.10. Schéma équivalent de l'essai en charge.

Les essais en charge ne sont possibles que pour des transformateurs de faible puissance apparente. On applique au primaire la tension nominale  $U_1 = U_{1n}$ . Une charge réglable. On mesure pour chaque valeur de  $Z$ :

- La tension primaire en charge  $V_1$
- Le courant primaire en charge  $I_1$
- La puissance active primaire  $P_1$
- Le courant secondaire  $I_2$
- La puissance active secondaire  $P_2$
- la tension secondaire  $U_2$

A partir de cet essai, On peut Le rendement

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{II. 17})$$

### II.9. Bilan énergétique et Rendement [12]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_2 \times I_2 \times \cos(\phi_2)}{V_2 \times I_2 \times \cos(\phi_2) + P_j + P_{\text{fer}}} \quad (\text{II. 18})$$

- Détermination directe : on mesure  $P_1$  et  $P_2$ .
- Détermination indirecte : on mesure  $P_2$ ,  $P_j$  et  $P_{\text{fer}}$

#### II.9.1. Les différentes pertes

La puissance  $P_1$  absorbée par le transformateur est plus grande que la puissance  $P_2$  restituée au secondaire du transformateur, appelée également puissance utile disponible. La différence entre ces deux grandeurs représente toutes les pertes que nous devons prendre en compte avec le transformateur réel. Ces pertes sont les suivantes :

### II.9.1.1. Les pertes par effet Joule

Les pertes par effet Joule, appelées également pertes dans le cuivre, sont notées  $P_j$  ou  $P_C$ . Ce sont les pertes occasionnées par le passage du courant dans les enroulements du primaire et du secondaire. Ces pertes sont proportionnelles au carré de la valeur efficace de l'intensité du courant qui traverse chaque enroulement.

➤ Les pertes Joules sont déterminées soit

-à partir de  $r_1$  et  $r_2$  ou  $R_S$ :

$$P_j = r_1 \times I_1^2 + r_2 \times I_2^2 = R_S \times I_2^2 \quad (\text{II.19})$$

-à partir de l'essai en court-circuit :

$$P_{1CC} = P_{JCC} + P_{fer} \approx P_{JCC} \text{ et } P_{JCC} = P_{JN} \text{ si } I_{2CC} = I_{2N} \quad (\text{II.20})$$

### II.9.1.2. Les pertes magnétiques

Les pertes magnétiques, appelées aussi pertes dans le fer sont notées  $P_{mag}$  ou  $P_{fer}$ . Ce sont les pertes dues aux fuites magnétiques, à l'hystérésis et enfin aux courants de Foucault.

Ces pertes ne dépendent que de la valeur efficace  $V_1$  de la tension  $u_1(t)$ , appliquée au primaire.

➤ Les pertes fer sont déterminées à partir de l'essai à vide :

$$P_{10} = P_{j0} + P_{fer0} \rightarrow P_{fer0} = P_{10} - P_{j0} \text{ Et } P_{fer0} = P_{ferN} \quad (\text{II.21})$$

Si l'essai est réalisé sous tension primaire nominale.

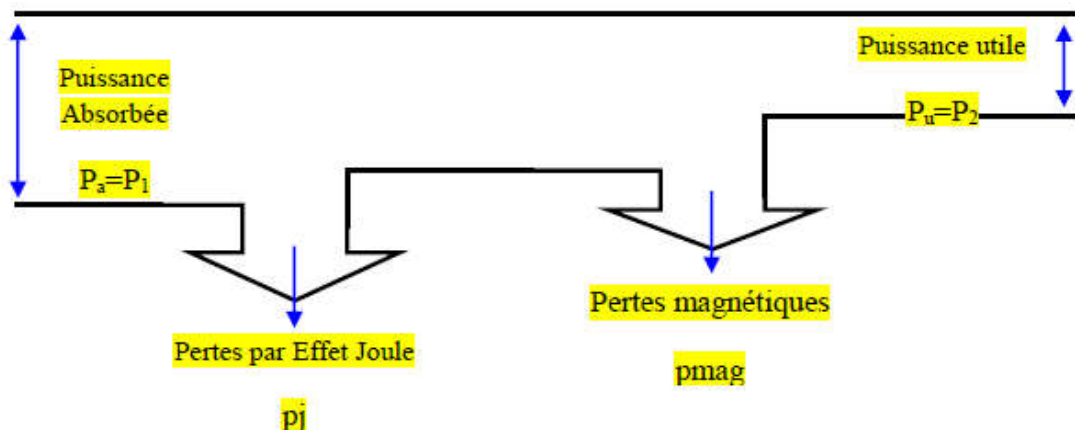


Figure II.11. Bilan de Puissance

- La puissance absorbée au primaire :

$$P_1 = V_1 \times I_1 \times \cos(\phi_1) \quad (\text{II.22})$$

- La puissance restituée au secondaire :

$$P_2 = V_2 \times I_2 \times \cos(\phi_2) = P_1 - P_j - P_{mag} \quad (\text{II.23})$$

- Au niveau des puissances réactives :

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\phi_1) \quad (\text{II.24})$$

$$Q_2 = V_2 I_2 \sin(\phi_2) \quad (\text{II.25})$$

### II.10. La plaque signalétique

Les tensions indiquées sur la plaque signalétique sont la valeur nominale  $V_{1n}$  de la tension  $u_1(t)$  au primaire et la valeur efficace de la tension à vide  $V_{20}$  de la tension  $u_2(t)$  au secondaire.

Il est également indiqué la puissance apparente nominale  $S_2$  ainsi que la fréquence nominale  $f$  d'utilisation du transformateur, facteur de puissance  $\cos \phi_2$ . La plaque signalétique permet de calculer rapidement les grandeurs n'y figurant pas à l'aide des relations vues précédemment.

**Exemple :** transformateurs monophasé  $S=2$  kVA. Courant = 9.1A.

transformateur		phasé	
type	DE 2001	n°	80107-1
an	1991		
refroid.	230/230P	e	-0,22
puissance	2,000	frequence	50/60
tension	230-230/230-230/230-230		
courants	9,1-9,1/9,1-9,1/9,1-9,1		
classe	E	c.n.i.	1000

**Figure II.12.** Plaque signalétique de transformateur monophasé.

### II.11. Les avantages et inconvénients des transformateurs [12]

(+) Ils sont de construction robuste et ont un excellent rendement

(-) Par contre, ils sont lourds (pois du noyau de fer et du cuivre)

### II.12. Conclusion

Dans ce chapitre on a donné un historique sur le transformateur et nous avons exposé une étude générale sur les transformateurs (constitution, principe de fonctionnement, caractéristiques), plus on a donné explication sur les essais des transformateurs, bilan énergétique et rendement et les différentes pertes.

# **Chapitre III**

## **Réalisation de poste à soude par points**

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va décrire la procédure qui a été suivie pour la réalisation de la soudeuse par point, voire le calcul du circuit magnétique le nombre de spires et le travaillé qui a été réaliser pour le montage du transformateur ainsi la finalisation de l'appareille toute entier.

#### Le circuit magnétique :

Le circuit magnétique des transformateurs électriques est former de feuilles de tôles (0.5-1mm), pour l'acheminement du champ magnétique, ce type de tôle et spécifique pour les circuits magnétique des machines électrique. Cette tôle n'est pas disponible sur le marché, donc la seule solution pour ce procure cette tôle est la récupération d'un circuit magnétique d'un poste à souder endommager.



**Figure III.1.** Transformateur de poste à soude.

Un premier constat sur cette poste a montré que le bobinage primaire est endommagé. Cet endommagement consiste à une fusion complète de l'enroulement primaire et de la gaine isolante ou d'une partie de l'enroulement primaire (Figure.III.2 gauche). Par contre le bobinage secondaire formé par un enroulement ou deux ou parfois trois en Aluminium de sections différentes et plus grandes que celle du primaire (Figure.III.2droit), ce circuit magnétique est récupéré à un état sain.



**Figure.III.2.** Bobinage primaire endommagé (gauche) et bobinage secondaire saint (droit).

La première étape si le démantèlement transformateur (figure.III.3) .En commence par le démantèlement des tôles magnétiques qui sont utilisé dans la fabrication de circuit magnétique, ensuit l'enlèvement des bobines primaire et secondaire.

### III.2. Les étapes de conception du transformateur



**Figure. III.3.4.** Démantèlement de bobinage primaire et secondaire.



**Figure.III.5.** Le circuit magnétique de forme « U ».

Les tôles sont d'épaisseur 0.5mm, de longueur 105mm et de largeur 50 mm (Figure.III.6)



**Figure.III.6.** Tôles magnétiques utilisées dans la fabrication du circuit magnétique.



### III.3. Calcule des transformateurs

#### III.3.1. Calcule de la section d'un noyau

- Section du circuit magnétique(figure III.7) :

$$S_{C.mag} = 7 \times 5 = 35 \text{ cm}^2 = 0.0035 \text{ m}^2$$

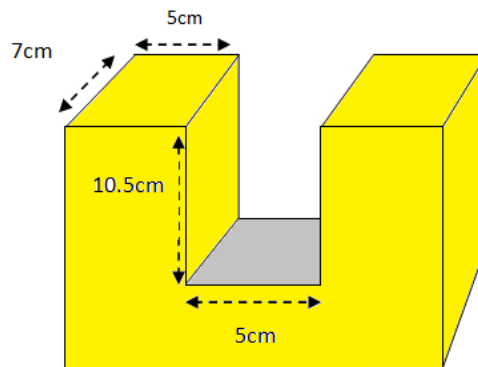


Figure.III.7. Dimension du circuit magnétique.

#### III.3.2. Calcule du nombre de spires pour la tension primaire

- $U_1$ : La tension en Volts/ $U_1 = 220V$ .
- $B$  : Avec une inductance en Gauss dans le fer,  $B=10\ 000$  gauss=1tesla.
- $f$  : La fréquence en Hertz,  $f=50Hz$ .
- $S$  : La section en centimètres carrés,  $S_{C.mag}=0.0035 \text{ m}^2$ .

$$N_1 = \frac{U_1}{4.44 \times f \times B \times S} \quad (\text{III. 1})$$

$$N_1 = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 1 \times 35 \times 10^{-4}} = \frac{220}{0.777} = 283 \text{ spires.}$$

#### III.3.3. Calcule des courants dans les enroulements

En a la puissance  $S = 1914VA$ ,  $U = 220V$ .

- Dans le primaire :

$$P = U \times I \quad (\text{III. 2})$$

$$I_1 = \frac{P}{U} = \frac{1914}{220} = 8.7A.$$

### III.3.4. Calcule du nombre de spires du circuit secondaire

- Ce qui donne un rapport de transformation à vide  $m$  de :

$$m = \frac{U_{2\text{rése au}}}{U_{1\text{rése au}}} \quad (\text{III. 4})$$

$$m = \frac{3.10}{220} = 0.014$$

- Ou également

$$m = \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{III. 5})$$

$N_1$  = Nombre de spires primaires.

$N_2$  = Nombre de spires secondaires.

$N_1 = 283$  spires.

- Le nombre de spires secondaire sera

$$N_2 = m \times N_1 \quad (\text{III. 6})$$

$$N_2 = 0.014 \times 283 = 3.96 \approx 4 \text{ spires}$$

Ou encore :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} \quad (\text{III. 7})$$

D'où :

$$N_2 = \frac{N_1 \times U_2}{U_1} \quad (\text{III. 8})$$

$$N_2 = \frac{283 \times 3.10}{220} = 3.98 \approx 4 \text{ spires.}$$

### III.3.5. Calcule et choix de la section du diamètre du fil de l'enroulement :

#### 1. Pour le circuit primaire

Le choix de la section du files utiliser et réalisé par apport a l'intensité du courant primaire :

- Le courant primaire est :  $I_2 = 8.7A$  .Pour un fonctionnement normale sous refroidissement en admettant une densité de courant de  $5A$  par millimètre carré pur le fil de cuivre utilisé.  $J = (5A/mm^2)$

$$I = \delta \times J \quad (\text{III.9})$$

- $\delta = 8.7A/5 A = 1.74mm^2$  .Donc le diamètre du file est  $D=1.48mm$ .

- Le fil disponible sur le marché et de diamètre un peut plus important  $d= 2.43\text{mm}$ .
- De section :  $S = \pi \times r^2 = \pi \times (d/2)^2 = 4.63\text{mm}^2$ . (avec isolement).

## 2. Pour le circuit secondaire

- On a utilise un fils  $70\text{mm}^2$  souple ENICAB.



Figure.III.8. Diamètre de fil de bobinage secondaire.

## III.4. La méthode de faire le bobinage primaire

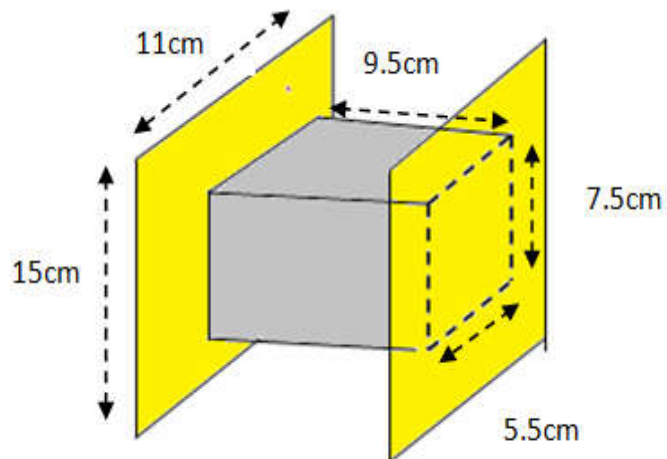
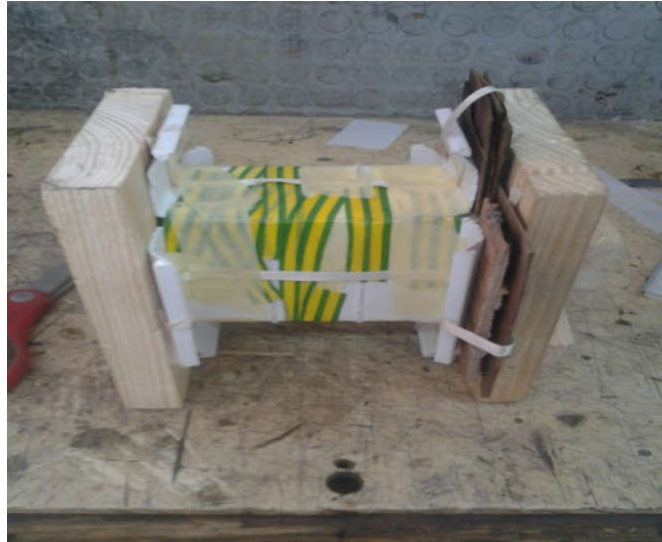


Figure.III. 9. Support pour bobinage (théorique).



**Figure.III.10.** Support pour bobinage (pratique).

#### III.4.1. Les donnés de bobinage

- La tension primaire  $U = 220V$ .
- Nombre de spire primaire  $N = 283$  spires.
- Diamètre de file primaire  $S = 2.43mm^2$ .
- La section du circuit magnétique :  $S_{C.mag} = 35mm^2$ .
- La longueur de circuit magnétique  $L = 9.5cm = 95mm$ .
- Distance de fenêtre de circuit magnétique  $d = 5cm$ .

#### III.4.2. Calcule de nombre de spire par couche

Nombre de couche = Longueur de circuit magnetique/diamètre de file

$$N_{Cou} = L_{C.mag}/D_f \quad (III. 9)$$

$$N_{Cou} = \frac{95}{2.43} = 39.09 \approx 39 \text{ spires par couche.}$$

#### III.4.3. Calcule le nombre de couches

Nombre de couche = Nombre spire totale/Nombre de spire par couche

$$N_{Cou} = N_{S.to}/N_{Cou} \quad (III. 10)$$

$$N_{Cou} = \frac{283}{39} = 7.25 \approx 8 \text{ couches.}$$

#### III.4.4. Calcul de l'épaisseur de la bobine primaire $E_1$

$E_1 = \text{Nombre de couche} \times \text{diamètre de file primaire}$

$$E_1 = N_{\text{Cou}} \times D_f \quad (\text{III. 11})$$

$$E_1 = 8 \times 2.43 = 19.44\text{mm} = 1.944\text{cm} < 5\text{cm}$$

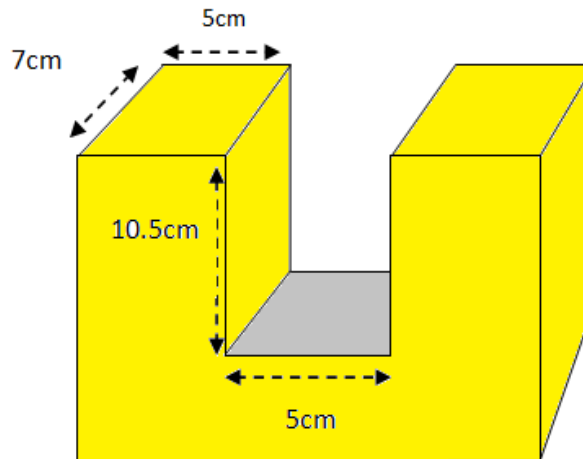


Figure.III.11. Dimension de fenêtre du circuit magnétique.

#### III.4.5. Calcul de la longueur du fil de cuivre en mètre

- Le périmètre du circuit magnétique =  $(7.5+5.5) \times 2 = 26 \text{ cm} = 0.26\text{m}$ .
- Pour chaque couche bobiné le périmètre de la bobine augmente de :  $2.43 \times 4 = 9.72 \text{ mm}$ .
- Le calcule et représenté su le tableau si après.

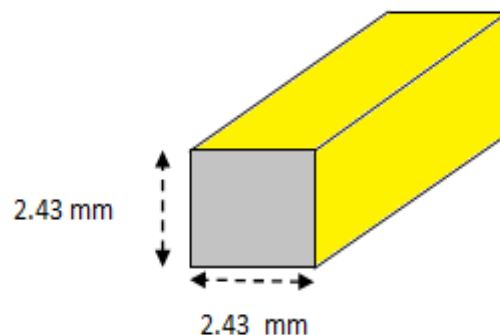
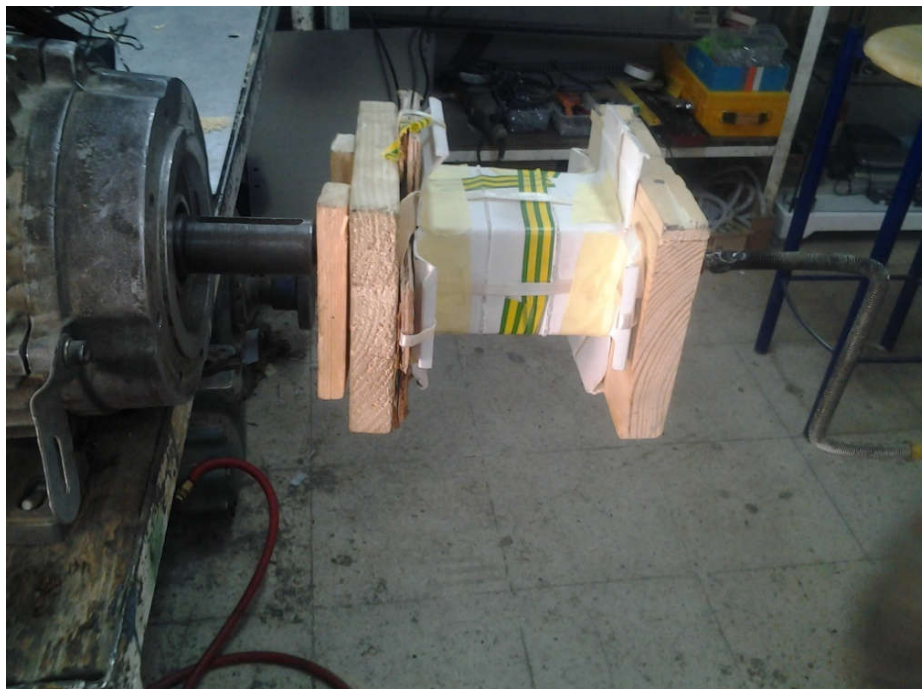


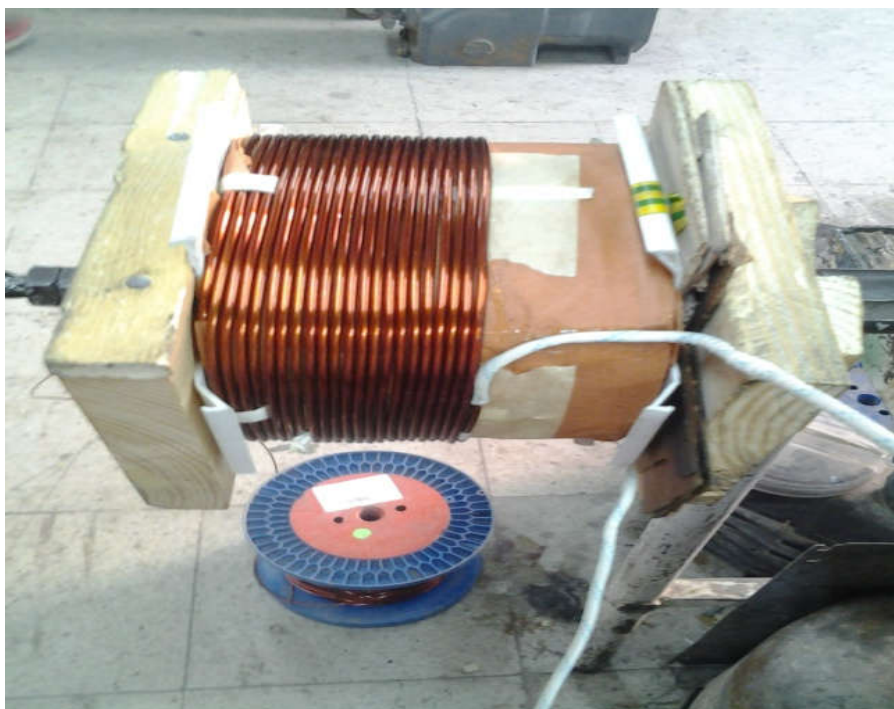
Figure.III.12. Présente la surface qui ajouté pour calcule nombre total de file de cuivre en mètre.

**Tableaux.III.1.** Nombre total de file de cuivre en mètre.

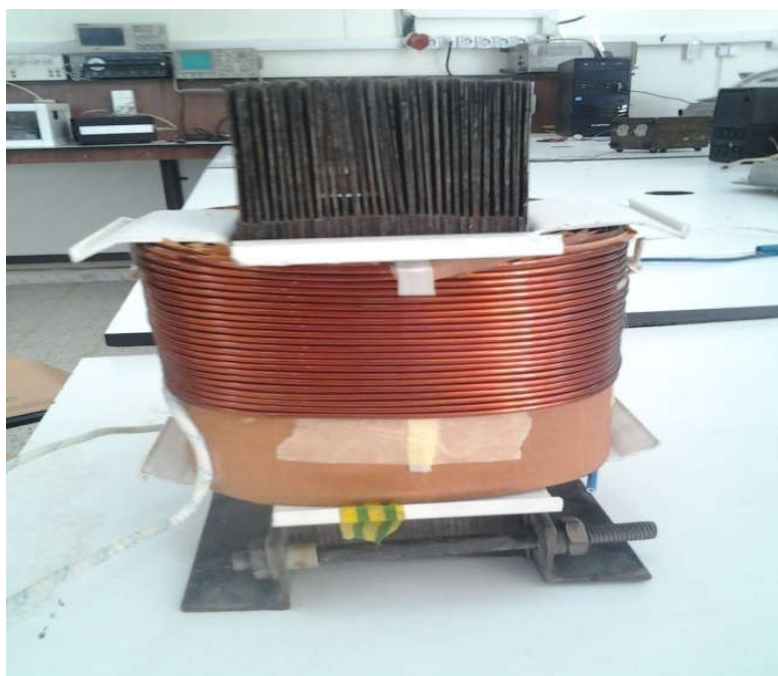
Nombre de couche	Langueur de la file (m).
1 couche	$0.260 \times 39 = 10.14\text{m}$
2 couches	$0.26972 \times 39 = 10.51908\text{m}$
3 couches	$0.27944 \times 39 = 10.89816\text{ m}$
4 couches	$0.28916 \times 39 = 11.27724\text{ m}$
5 couches	$0.29888 \times 39 = 11.65632\text{ m}$
6 couches	$0.3086 \times 39 = 12.0354\text{ m}$
7 couches	$0.31832 \times 39 = 12.4148\text{ m}$
8 couches	$0.32804 \times 39 = 12.79356\text{m}$
Somme	91.73 m

Un support de bobinage (gabarit), Le bobine est réalisé manuellement spire par spire et couche par couche, jusqu'a la 283 spire comme représenté sur la (figure.III.13).

**Figure.III.13.** Le début de bobinage avec les files de serrage le bobinage.



**Figure.III.14.**bobinage primaire neveux.



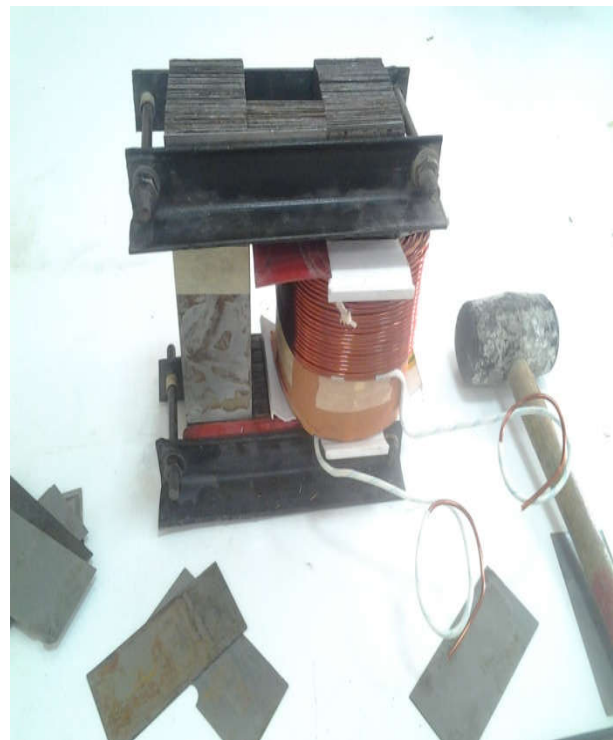
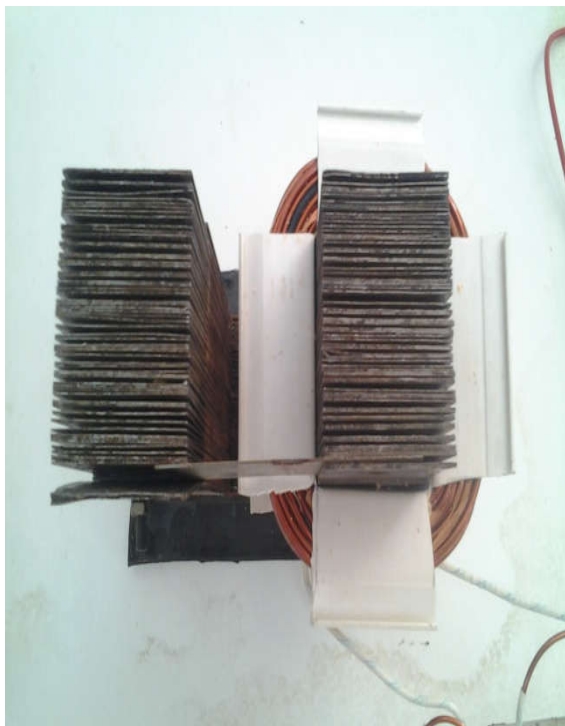
**Figure.III.15.** Bobinage primaire place dans le circuit magnétique.

**Tableaux III.2.** Calcule de bobinage pratique.

Nombre de couche	Nombre de spires
1 <sup>er</sup> couche	37
2 couches	37
3 couches	38
4 couches	37
5 couches	38
6 couches	37
7 couches	37
8 couches	22

### III.5. Remontage des tôles

Après de placement de la bobine primaire on procède maintenant au montage des tôles. Chaque tôle sera croisée avec la précédente.

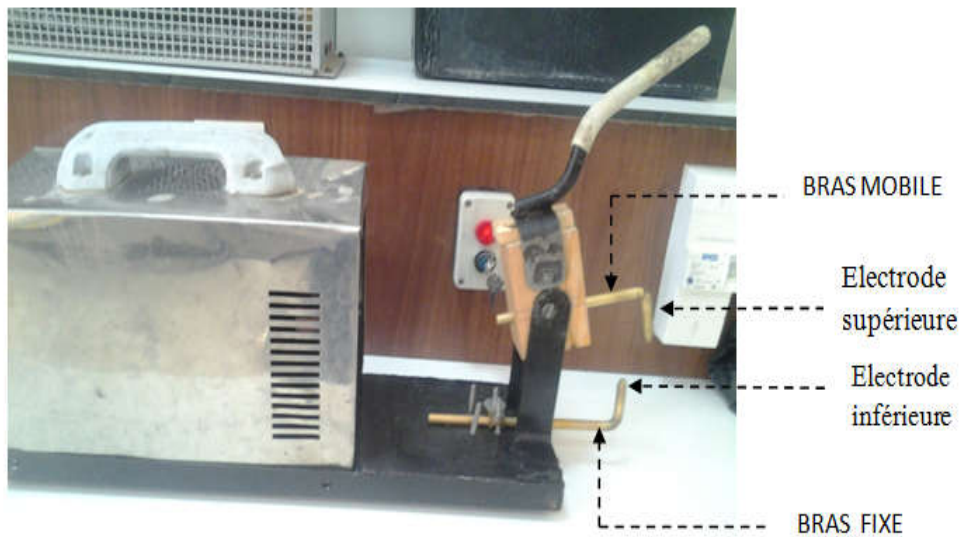
**Fig.III.16.** Remontage des tôles.





**Fig.III.17.** Resserrage des tôles.

La fig.III.18 montre les différents éléments qui compose le transformateur, voire deux électrode le premier (bras fixe) et le deuxième (bras mobile).



**Fig.III.18.** Armature de poste soude par points.

Le secondaire est bobiner (4spire) avec un fil  $70 \text{ mm}^2$  en a fig.III.19, puis le raccordement des extrémités de la bobine secondaire avec bras en cuivre.



**Fig.III.19.** Bobinage secondaire lié avec les bars du cuivre.



**Fig.III.20.** Poste a soudé finale.

### III.6. Protection de poste

1. Un ventilateur (220V) pour le refroidissement du transformateur.
2. Disjoncteur (10A) utilisé pour limité l'augmentation soudain du courant.

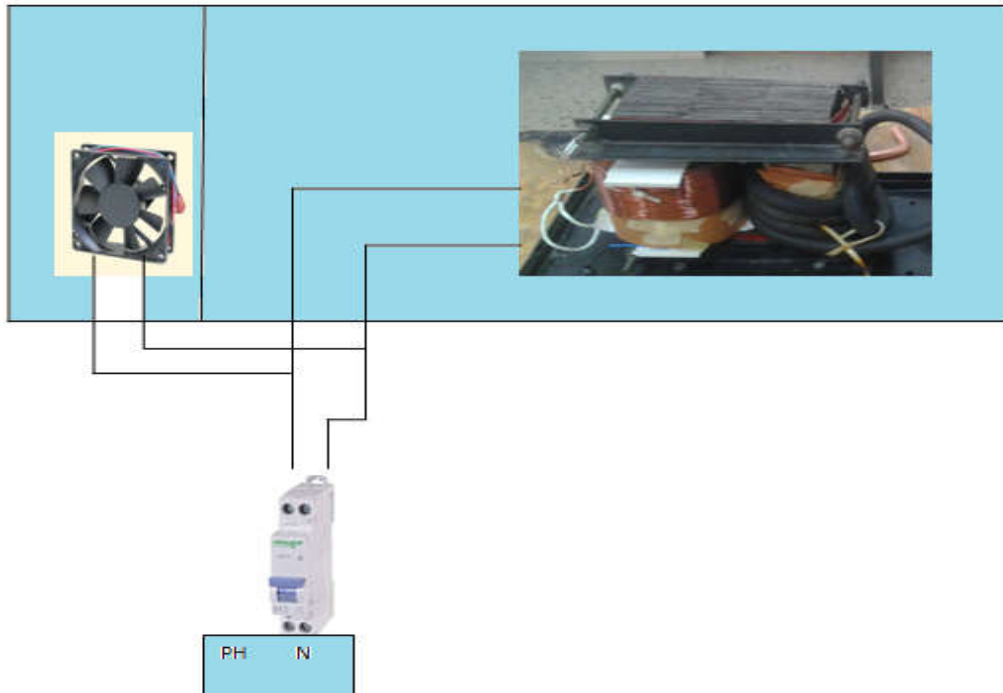


Fig.III.21. Présenté la protection de poste a soudé.



Fig.III.22. Système protection de poste.

### III.7. Testes du poste à soudure réalisé

#### III.7.1. Essai a vide et en charge

Tableaux.III.3. Testes du poste à soudure.

L'essai	Tension au primaire (V)	Courant au primaire (A)	Tension au secondaire (V)	Courant au secondaire (A)
A vide	220	0.9	2.3	0
En charge	220	8.7	$V \approx 0$	600



Figure III.23. Premier étape de soudage.



Figure III.24. Deuxième étape de soudage.

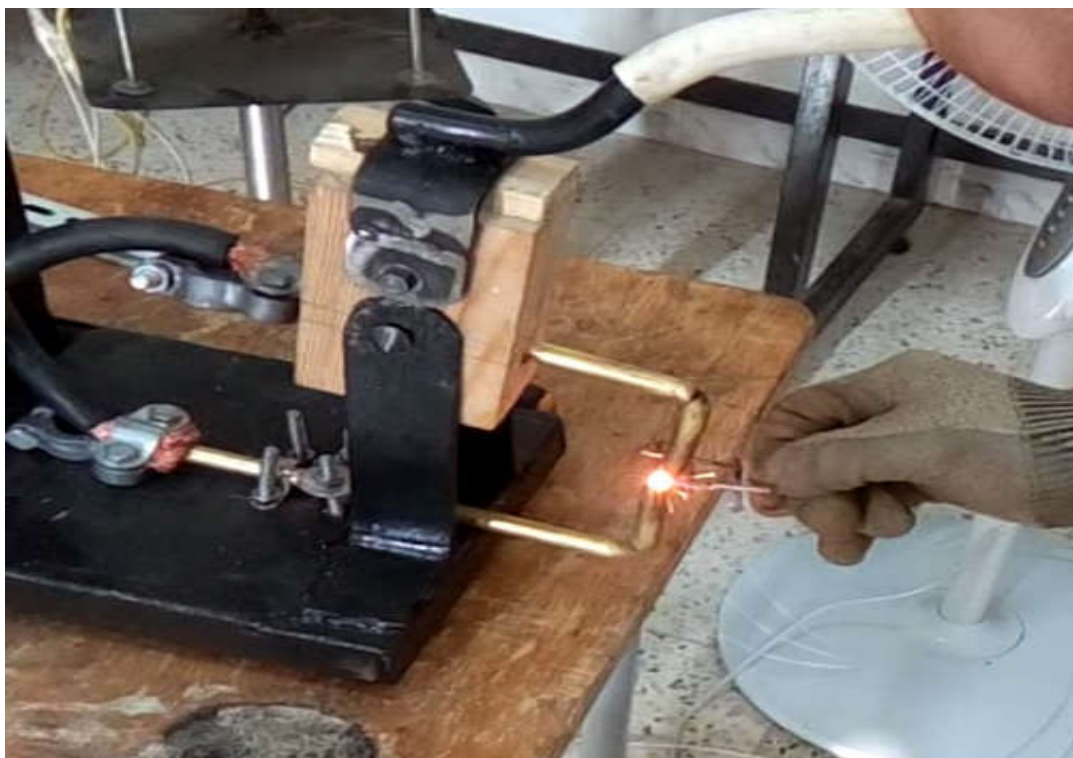


Figure.III. 25.Presenté l'essai de soudage par points.



**Figure.III.26.** Le échantillon qui soudé .(des cavalier).

### **III.8.Conclusion**

Dans se chapitre on a présente les étapes de fabrication du poste a soudé par points, voire la conception du circuit magnetique, les bobines, et le montage.

# **Conclusion Générale**

## Concluions générale

L'étude présentée dans cette mémoire représente une application de transformateurs électriques dans l'industrie (soudage par point).

Dans le premier chapitre en présenter un bref historique sur le soudage par points.

Le deuxième chapitre décrire le principe de fonctionnement des transformateurs électriques et leur utilisation.

Dans le troisième et dernier chapitre en décrire la procédure qui a été suivi pour la réalisation d'un transformateur de puissance 1.9kVA sous tension 220V, ce dernier est utilisé dans le domaine de soudage ici un poste à soudeur par point.

L'étude comprend les étapes suivantes pour fabriquer le poste à soudé par points premièrement on a les étapes de conception du transformateur.

- le démantèlement transformateur (figure.III.3) .En commence par le démantèlement des tôles magnétiques qui sont utilisé dans la fabrication de circuit magnétique, ensuit l'enlèvement des bobines primaire et secondaire.

-Calcule des transformateurs : Calcule de la section d'un noyau puis calcule du nombre de spires pour la tension primaire ( $N_1=283$ spires) et secondaire ( $N_2=4$ spire), calcule et choix de la section du diamètre du fil de l'enroulement primaire ( $d=2.43$ mm).

Ensuit description la méthode de faire le bobinage primaire avec des calcule sur nombre de couche et nombre de spire en couche et la conception de support de bobinage. Puis faire le bobinage secondaire.

Après se terminé la fabrication de transformateur en placé le transformateur sur l'armature de poste et faire des teste sur la poste (à vide et en charge) et un teste de soudage.

Enfin le résultat général de cette étude et très prometteur, cette étude nous a permet à bien maitriser la technologie de ces postes à soudeur, je pense que cette étude va aider d'autres étudiants à l'avenir.



# **Références Bibliographiques**

Références Bibliographiques

N°	Références
[1]	H. Marouf, « Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier Ordinaire E36/ Acier anti-usure NAXTRA70 utilisé par l'unité Grue de Bejaia dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation », mémoire magistère de l'université Tizi-Ouzou, 2012.
[2]	Photo de couverture : © tumpikuja – istockphoto.com © Dunod, Paris, 2012 ISBN 978- 2-10-057810-8
[3]	Chapitre 6. Introduction au soudage par points.
[4]	Le soudage par résistance SD service – 2012.
[5]	THIEBLEMONT (E), CHEVRIER (J.Ch). -"Le soudage par résistance par points de tôles destinées à l'industrie automobile", Paramètre 1990: l'automobile et la recherche.
[6]	<a href="http://www.neurones.espci.fr/Theses_PS/MONARI_G/chapitre6.pdf">http://www.neurones.espci.fr/Theses_PS/MONARI_G/chapitre6.pdf</a>
[7]	Cormier Gabriel. (Les cours électrotechnique d'Université de Moncton canada .2010)
[8]	Toufik SMAIL " Modélisation des éléments non linéaire ", Mémoire de magister, département d'électronique, Université de Batna, 2005.
[9]	<a href="http://dspt.perso.sfr.fr/GAULARD.htm">http://dspt.perso.sfr.fr/GAULARD.htm</a> (© 2000-2007 Pierre Dessapt)
[10]	Mémoire fin d'étude (conception de transformateur électrique), Mr: ROUINA Abdelhafid, Université de Biskra, 2008/2009.
[11]	cour PDF Machine-Electrique-à-courant-continu-et-transformateur.
[12]	<a href="http://www.courstechinfo.be/Hard/Transfo.html">http://www.courstechinfo.be/Hard/Transfo.html</a> .
[13]	Cour PDF (université d'el oued département d'électrotechnique. 3ème licence RE Module : Machines électriques)