

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



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

Mémoire

DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENSION DU DIPLOME DE
MASTER ACADYMIQUE EN ELECTROTECHNIQUE
OPTION :MACHINES ELECTRIQUES

Thème

Etudes thermiques du moteur asynchrone à cage
d'écureuil

Proposé et dirigé par :

Mr KHALDI Rabah

Réalisé par:

M^{elle} IFREK Hanane

M^{elle} HAOUCHINE Tassadit

Promotion: 2011

Remerciements

Nous tenons à remercier le bon dieu pour le courage et la patience qu'il nous a donné tout au long de ce travail afin de mener ce projet de fin d'étude à terme.

Nous remercions aussi notre promoteur **Mr KHALDI** qui nous a encadré, dirigé et beaucoup aidé tout au long de ce travail.

Nous remercions également les membres de jury ainsi que le personnel de la bibliothèque et tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce Modest travail:

- A Mes très chers parents mon Père et ma Mère qui mon soutenus durant tous mon parcours.
- A Mes frères (Nacer et Ali), mes Sœurs (Naima et Fatiha).
- A ma sœur Wahiba et son mari (Fred).
- A ma sœur Nabila et son mari (Belaid).
- A toute mes tantes et mes oncles.
- A tous mes petits cousins (Lyes, Yanis, Leticia, Sarah).
- A tous mes amis (es) sans exception, Housseem, Samir, Abdenour .., à toutes les personnes qui mon aidé de prés ou de loin.
- A tous les étudiants de la promotion LMD 2011.
- A ma chère amie et binôme Hanane et à toute sa famille.

Tassadit

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

- A mes très chers parents mon Père et ma Mère qui mon soutenus pour arriver jusqu'ici.
- A mon frère (Mohamed) et ma belle sœur.
- A ma sœur Ourida et son mari (Moh said).
- A ma sœur Zakia et son mari (Larbi).
- A mes chères sœurs (Sadia, Naima, Ferroudja, Hakima et Mira)
- A mes petits neveux (gelden,dilane, Yougourthen)
- A mes nièces (Karine et Elena)
- A mon adorable aksil à qui je souhaite bon rétablissement.
- A Tous mes proches.
- A ma chère amie (kamila).
- A tous mes amis sans exception,Samir, Housseem et Nassim et tous les étudiants de ma promotion

A ma chère amie et binôme Zazi et à toute sa famille.

Hanane

Introduction Générale

Les moteurs asynchrones triphasés représentent la majorité du parc moteur électrique. Ils sont utilisés pour transformer l'énergie électrique en énergie mécanique grâce à des phénomènes électromagnétiques. C'est des machines beaucoup plus robuste que les autres types de machines ; elles ne nécessitent pratiquement que peu d'entretien [7].

Une tâche d'entraînement requiert tout d'abord un moteur dont les propriétés sont appropriées à la tâche à résoudre, notamment en ce qui concerne la vitesse, le couple et les possibilités de réglage. Ainsi l'amélioration du couple ou de la puissance massique du moteur conduit à l'augmentation des pertes, par conséquent, à l'augmentation des échauffements, en particulier lorsque ce dernier est alimenté par un convertisseur statique de fréquence. Pour réduire ces derniers, il faut une bonne connaissance du comportement thermique de la machine[7].

D'autre part une étude thermique complète d'une machine ne peut être effectuée seulement par des essais thermiques. Pour cette raison les modèles thermiques théoriques sont nécessaires. Mais ces modèles thermiques théoriques sont caractérisés par des paramètres thermo physiques (tel que les conductivités thermiques de contact, et les coefficients d'échanges convectives h);difficilement estimables pour cette fin, des essais pratiques de mesure de température sont nécessaires, d'une part, pour le calage des ces derniers et d'autre par, pour la validation des modèles thermiques développés [8].

Pour cela dans notre travail, nous nous intéressons à la mesure de la température dans les différentes parties de la machine asynchrone à cage de faible puissance. Un ensemble d'essai est effectué pour différent régimes de fonctionnement[8].

Par la suite deux modèles thermiques sont développés pour le régime statique. Dont le premier, basé sur la méthode des éléments finis, est réalisé en exploitant le logiciel F.E.M.M (Finis Eléments Méthode Magnetics) et le deuxième, basé sur la méthode d'analyse nodale.

Nous organisons notre travail en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre :

Traite, des généralités sur la machine asynchrone à cage, donnant un rappel de sa constitution, son principe de fonctionnement, son bilan de puissance, ces différents démarrages et freinages, ainsi que les modes de réglage de sa vitesse de rotation.

Le deuxième chapitre :

Présente les différentes pertes dans la machine asynchrone à cage.

Le troisième chapitre :

Ce troisième chapitre est consacré aux modes de transfert de chaleur dans le moteur asynchrone et aux différentes méthodes d'études thermiques de ce dernier.

Quatrième chapitre :

Enfin le dernier chapitre est consacré à la mesure expérimental de la température en différents points d'un moteur asynchrone à cage et aussi à la modélisation thermique on utilisant le logiciel FEMM (Finis Elément Méthode Magnetics) et la méthode d'analyse nodale suivi par la comparaison entre les différents résultats obtenus.

Et nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Historique

La paternité de la machine asynchrone de par sa simplicité de conception et d'entretien, faible cout, a la faveur des industriels revient a son invention par N. TESLA, qui est parti aux USA pour tirer un meilleur parti de son invention. Là bas, il rencontra Thomas EDISON, quant à lui, était un partisan convaincu du courant continu. Aussi, ce dernier embaucha TESLA pour améliorer la commutation des machines à courant continu. En 1888, TESLA déposa quantité de brevets pour tout son système polyphasé (générateurs, transformateurs, moteurs synchrones et asynchrones...), en particulier pour un moteur asynchrone à induit en anneau. Ces brevets furent aussitôt achetés par la société Westinghouse. La même année, la société Westinghouse acheta aussi à FERRARIS sa découverte pour breveter des dispositifs la mettant à profit. A la fin du XIXe siècle, de nombreuses "usines" de production d'électricité en courant continu étaient déjà implantées, en particulier aux USA. Ce fut alors le début de la célèbre lutte entre EDISON et TESLA au sujet du choix courant continu ou alternatif pour la production, l'utilisation et donc la consommation de l'énergie électrique.

L'issue de cette polémique est bien connue aujourd'hui ! Le premier moteur asynchrone triphasé fut réalisé par l'Allemand Michael DOLIVO-DOBROWOLSKI en 1889 et, en 1893, il concevait, en même temps que le Français BOUCHEROT, le moteur à double cage. La machine asynchrone est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Ses principaux avantages résident dans l'absence de bobinage rotorique (machine à cage), structure simple, robuste et facile à construire. Son domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts, reliée directement au réseau industriel à tension et fréquence constante, elle tourne à vitesse peu inférieure de la vitesse de synchronisme on dit alors qu'il y a glissement. Grâce à l'évolution technologique de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, le domaine d'entraînement électrique à vitesse variable, a connu ces dernières années un essor considérable. Cet avantage a joué en faveur de la machine asynchrone, car actuellement elle est utilisée pour la réalisation de la majorité des entraînements à vitesse variable. En effet, la première commande qui a été introduite dans l'industrie était la commande scalaire, très répandue pour sa simplicité et son coût réduit, elle a occupée une grande partie des applications industrielles à vitesses variables. Seulement, les demandes aux applications plus performantes ont ouvert les voix aux chercheurs pour réaliser des commandes appropriées qui répondent aux exigences industrielles.

Introduction :

Les moteurs électriques sont de nos jours, à l'exception des dispositifs d'éclairage, les récepteurs les plus nombreux dans les industries et les installations tertiaires.

Leur fonction, de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, leur donne une importance économique toute particulière qui fait qu'aucun concepteur d'installation ou de machine, aucun installateur et aucun exploitant ne peut les ignorer. Parmi tous les types de moteurs existants, les moteurs asynchrones triphasés notamment les moteurs à cage sont les plus utilisés dans l'industrie. De plus, bien que leur commande par des équipements à contacteurs soit parfaitement adaptée pour un grand nombre d'applications, l'emploi de matériels électroniques en constante progression élargit leur champ d'application. C'est le cas pour contrôler le démarrage et l'arrêt avec les démarreurs-ralentisseurs progressifs, comme lorsqu'un réglage précis de la vitesse est également nécessaire avec les variateurs-régulateurs de vitesse.

Toutefois, les moteurs asynchrones à bagues sont utilisés pour certaines applications de forte puissance dans l'industrie et les moteurs asynchrones monophasés restent adaptés pour des applications de puissances limitées plutôt pour les applications du bâtiment. [7].

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On les retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie (machine-outil), dans l'électroménager. Elles étaient à l'origine uniquement utilisées en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, sont de plus en plus souvent utilisées en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes.[8]

I-1-Constitution de la machine asynchrone

On propose, dans cette section, de rappeler brièvement la constitution de la machine asynchrone. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement.

Les machines asynchrones peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

Le stator : partie fixe de la machine ou est connectée l'alimentation électrique.

Le rotor : partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.

Les paliers: partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

I-1-1: stator :

Le stator est la partie fixe du moteur constitué d'une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0.5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant elles sont munis d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas d'un moteur triphasé).

Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines l'ensemble forme un cylindre creux. L'empilement de tôle et le "feuilletage" du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. [7]

Le stator d'une machine triphasé comporte 3 enroulements donc 6 bornes il se compose principalement :

- de la carcasse.
- des paliers.
- des flasques de palier.
- du ventilateur refroidissant le moteur.
- le capot protégeant le ventilateur.



Fig. I.1. Stator de la machine asynchrone.

L'intérieur du stator comprend essentiellement :

- un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique,
- les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau.

Dans un moteur triphasé les enroulements sont au nombre minimum de trois décalés l'un de l'autre de 120° . Lorsque les enroulements du stator sont parcourus par un courant triphasé, ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme. La vitesse de synchronisme est en fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Europe) et

du nombre de paires de pôles. Vu que la fréquence est fixe, la vitesse de rotation du champ tournant du moteur ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles. [9]

Nombre de paires de pôles	2	4	6	8	12
Vitesse en (tr/min)	3 000	1 500	1 000	750	500

Tableau-I-1: Influence du nombre de paires de pôles sur la vitesse de rotation.

I-1-2- Rotor :

C'est l'élément mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces, isolées entre elles, et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur.[7]

- Il tourne à une vitesse inférieure à la vitesse du champ tournant.
- Il est placé dans un champ tournant par rapport à lui
- Il doit être feuilleté pour réduire les pertes par courant de Foucault.

Parmi les rotors on distingue 4 types :

- **Rotor à bague :**

Le rotor d'une machine à bague est constitué de 3 bobines (on parle aussi de rotor bobiné). Chaque bobine est reliée à une bague. Les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines. Ce type de rotor a été conçu pour permettre la variation de résistance du rotor en insérant des résistances en séries avec les bobines afin de réaliser un démarrage rotorique.

Ce dispositif a ensuite permis la variation de vitesse avec un rendement acceptable au moyen d'un procédé appelé cascade hyposynchrone. L'apparition des variateurs de fréquence a rendu obsolète ce type de machine. [9]

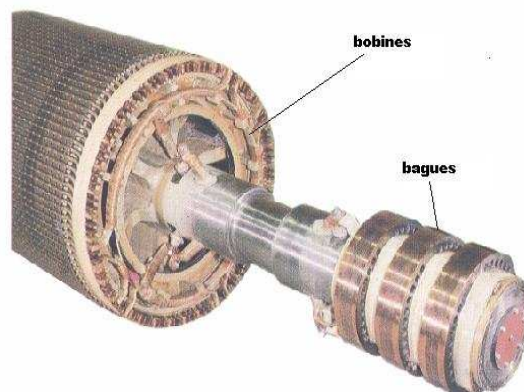


Fig.I.2: Rotor à bague.

- **Rotor à double cage :**

Le rotor est construit suivant le principe du rotor à cage simple, mais avec 2 cages électriquement indépendantes. Une cage externe à la périphérie du rotor est composée de matériaux résistifs (laiton, bronze) et possède une faible dispersion magnétique. Une cage interne en cuivre possède une résistivité plus faible et une dispersion magnétique importante. Au démarrage, le moteur se comporte comme un transformateur : la fréquence des courants rotoriques est élevée (50Hz). Le courant circule essentiellement dans la cage externe, car l'impédance de la cage interne ($L.w$) est plus élevée. Au fur et à mesure que la vitesse du moteur augmente, la fréquence des courants rotoriques diminue, le courant circule progressivement dans la cage interne. [8]

- **Rotor à double encoche (à encoches profondes) :**

Ce sont des rotors à cage qui utilisent l'effet de peau dans les conducteurs afin de faire varier la résistance du rotor en fonction de la vitesse de fonctionnement de la machine. L'effet de peau est un phénomène électromagnétique qui fait que plus la fréquence des courants augmentent, plus le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs. [8]

Ainsi, au démarrage, la fréquence des courants rotoriques est égale à celle de l'alimentation et le courant n'utilise que la partie supérieure de la barre. Puis, au fur et à mesure que la vitesse de rotation du rotor augmente, la fréquence des courants rotoriques diminue et le courant utilise une surface de plus en plus importante des barres. Ces topologies de rotor permettent un démarrage avec un couple plus important lorsque la machine est alimentée par une source de tension fixe (sans variateur). [9]

- **Rotor à cage (rotor en court-circuit) :**

C'est le modèle qui nous intéresse est le plus fréquent. Ce type de rotor a été inventé par Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski au début des années 1890.

Ces rotors sont constitués de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par deux anneaux de court-circuit. Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champs tandis que les barres accueillent les courants induits. Pour les moteurs de

faibles puissances, les rotors sont réalisés à partir d'un empilement de tôles découpées et isolées des unes des autres (feuilletage) dans lesquelles on injecte un matériau conducteur de manière à constituer les barres ainsi que les anneaux de court-circuit. Pour les moteurs de forte puissance, les barres sont insérées dans le rotor puis les anneaux de court-circuit sont soudés ou brasés aux barres. Le matériau constituant les barres et les anneaux de court circuit est généralement un alliage à base d'aluminium, mais on peut aussi le trouver en cuivre ou en laiton. En général, les barres sont légèrement inclinées suivant l'axe du rotor afin que le nombre de barres présentes sous une phase statorique soit constant quelle que soit la position du rotor. Ce procédé permet de diminuer la variation de la réluctance du circuit magnétique au cours de la rotation du rotor (ou « effet d'encoches ») et de diminuer ainsi les oscillations de couple. C'est cette inclinaison des encoches qui donne à l'ensemble barre plus anneaux de court-circuit la forme d'une cage d'écureuil déformée. [7]

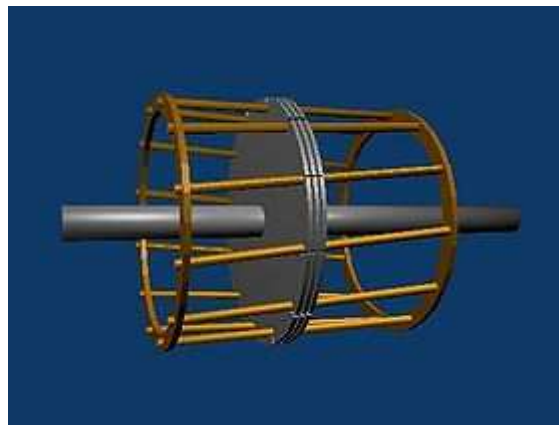
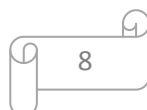
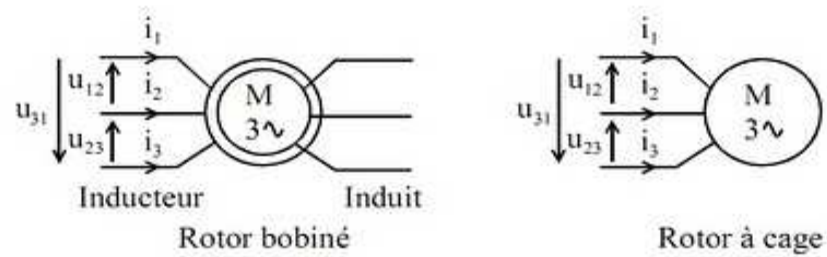


Fig. I.3: Rotor à cage.

I-1-2-1-Symbole de rotor bobiné et rotor à cage :





I-1-3-Palier :

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques.

Les roulements à billes sont insérés à chaud sur l'arbre, permettant ainsi d'assurer le guidage en rotation de l'arbre. [7]

Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter Statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage.[1]

L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone.

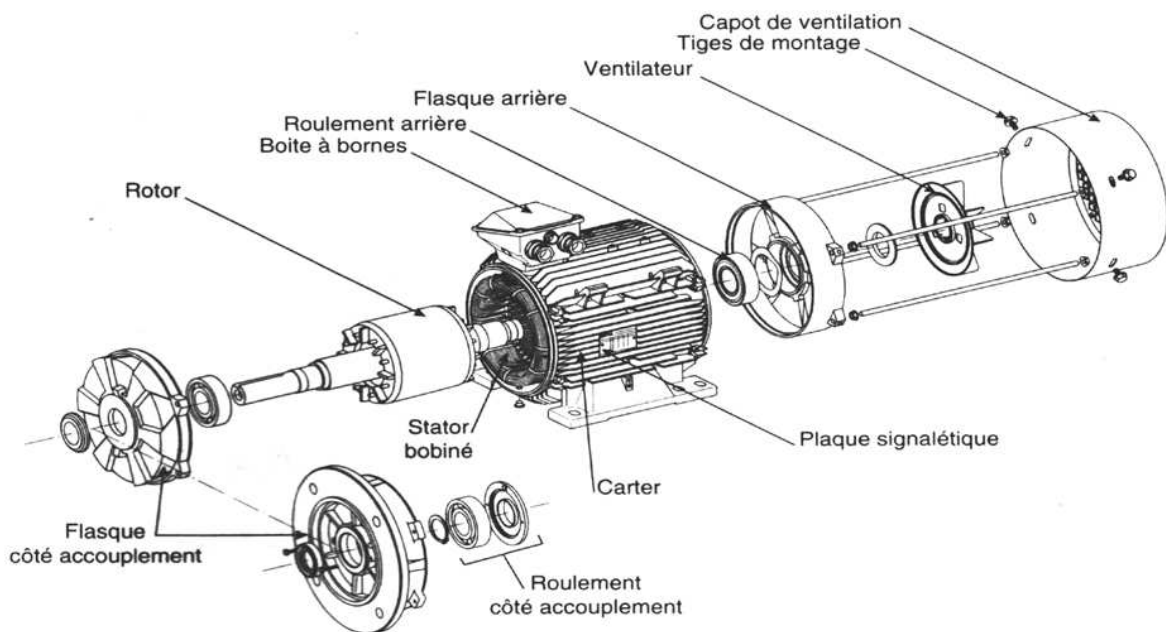


Fig. I.4 : Constituant de la machine asynchrone.

I-2- variateur de vitesse :**I-2-1- Objectif et description :**

L'objectif des variateurs de vitesse de type « convertisseurs de fréquence » est d'alimenter les moteurs asynchrones triphasés de manière à obtenir des caractéristiques de fonctionnement radicalement différentes de leur utilisation normale (moteurs alimentés en direct par la tension réseau), à amplitude et fréquence constantes.[7]

Moteur asynchrone	en usage normal	avec variateur de vitesse
Courant de démarrage	Très élevé, de l'ordre de 6 à 8 fois le courant nominal en valeur efficace	Limité dans le moteur (en général : environ 1,5 fois courant nominal)
Couple de démarrage C_d	Elevé et non contrôlé, de l'ordre de 2 à 3 fois le couple nominal C_n	De l'ordre de 1,5 fois le couple nominal C_n et contrôlé pendant toute l'accélération
Démarrage	Brutal dont la durée n'est fonction Progressif sans à-coup et contrôlé que des caractéristiques du moteur et de la charge entraînée (couple résistant, inertie)	Progressif sans à coup et contrôlé (rampe linéaire de vitesse par exemple)
Vitesse	Variante légèrement selon la charge (proche de la vitesse de synchronisme N_s)	Variation possible à partir de zéro jusqu'à une valeur supérieure à la vitesse de synchronisme N_s
Couple maximal C_m	Elevé, de l'ordre de 2 à 3 fois le couple nominal C_n	Elevé disponible sur toute la plage de vitesse (de l'ordre de 1,5 fois le couple nominal)

Tableau. I-2 : comparatif des caractéristiques de fonctionnement montrant tout l'intérêt des variateurs de vitesse de type « convertisseurs de fréquence ».

I-2-2-Principe :

Il consiste à fournir au moteur une onde de tension à amplitude et fréquence variables, en maintenant le rapport tension / fréquence sensiblement constant.

Le convertisseur comprend :

- un pont redresseur mono ou triphasé à diodes associé à un condensateur formant une source de tension continue (Bus à tension continu ou Bus DC).
- Un pont onduleur généralement à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), alimenté par la tension continue et générant une onde de tension alternative à amplitude et fréquence variables par la technique de « Modulation de Largeur d'Impulsions » ou MLI.
- une unité de commande fournissant les ordres de conduction aux IGBT en fonction des consignes fournies par l'opérateur (ordre de marche, sens de marche, consigne de vitesse...). [7]

Le principe de la MLI utilisée dans le pont onduleur consiste à appliquer aux enroulements du moteur une suite d'impulsions de tension, d'amplitude égale à la tension continue fournie par le redresseur. Les impulsions sont modulées en largeur de manière à créer une tension alternative d'amplitude variable. [9]

I-2-3-Caractéristiques du courant absorbé par le variateur de vitesse :

- Forme d'onde

Dans le cas d'une alimentation triphasée le pont redresseur associé au condensateur de filtrage prélève au réseau un courant non sinusoïdal.

I-3-Création du champ tournant dans la machine asynchrone :

On alimente 3 bobines, identiques placées à 120° par une tension alternative triphasée :

* Si une aiguille aimantée, placée au centre, on remarque qu'elle est entraînée en rotation ; il y a donc bien création d'un champ tournant.

*Si en place un disque métallique en aluminium ou en cuivre on voit aussi qu'il est entraîné dans le même sens que l'aiguille aimantée.

Un champ tournant produit la rotation d'un disque de cuivre ce disque tourne à une vitesse inférieure à celle du champ tournant.

En inversant deux des trois fils de l'alimentation triphasée, l'aiguille ou le disque tourne en sens inverse.

Les trois champs alternatifs produits par les bobines alimentées en courant triphasé se composent pour former le champ tournant. [7]

I-4- Glissement :

Le glissement est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à une machine synchrone hypothétique construite avec le même stator.[1] Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pour-cent : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut atteindre 10 % pour les petites machines monophasées. Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité se doit de fonctionner avec un faible glissement. Comme on peut le définir c'est l'écart relatif de la vitesse du rotor par rapport à la vitesse de champ tournant statorique. [7]

Le glissement est donné par :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Avec : $n = \frac{60\Omega}{2\pi}$ et $\Omega_s = 2\pi \frac{f}{p}$

g : glissement de la machine asynchrone.

n_s : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en [tr/mn].

n : vitesse de rotation du rotor en [tr/mn].

Ω_s : vitesse angulaire du champ tournant [rad/s].

Ω : vitesse angulaire de rotation du rotor en [rad /s].

• Les différents cas glissement de la machine asynchrone :

$g = 0$ pour $n = n_s$, il n'aura pas de couple.

$g < 0$ pour $n > n_s$, la machine fonctionne en régime génératrice asynchrone.

$g > 0$ pour $n < n_s$, la machine fonctionne en régime moteur asynchrone.

$g = 1$ pour $n = 0$, le moteur est à l'arrêt à l'instant du début de démarrage.

$g > 0$ pour $n < 0$, la vitesse de rotation est inverse à celle du champ tournant, le moteur fonctionne en freinage.

I-5-L'entrefer :

Les deux parties statoriques et rotoriques sont séparées par l'entrefer de faible épaisseur. Il permet le mouvement du rotor par rapport au stator. La grande perméabilité magnétique des matériaux ferromagnétiques vis à vis de l'air permet de supposer que toute induction dans l'entrefer est normale au stator et donc radiale. [9]

I-6- Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :

Le principe des moteurs à courants alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives. La circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique B . Ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et son intensité sont en fonction du courant I . [7]

Si le courant est alternatif, le champ magnétique varie en sens et en direction à même fréquence que le Courant.

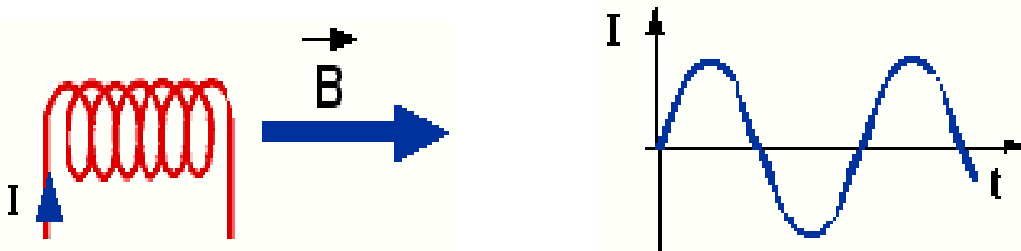


Fig. I.6: la direction du champ dans l'axe de la bobine.

Si deux bobines sont placées à proximité l'une de l'autre, le champ magnétique résultant est la somme vectorielle des deux autres.

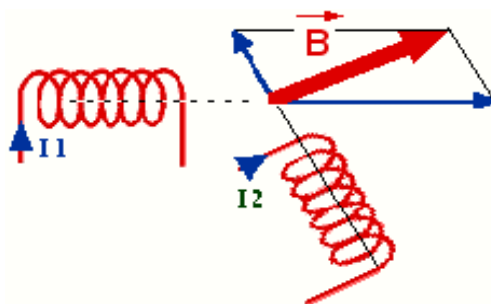


Fig. .I.7 : champ magnétique résultant entre deux bobines.

Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à 120° les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés. Compte-tenu de la

nature du courant sur le réseau triphasé, les trois champs sont déphasés. Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant soit 50 tr/s. [1]

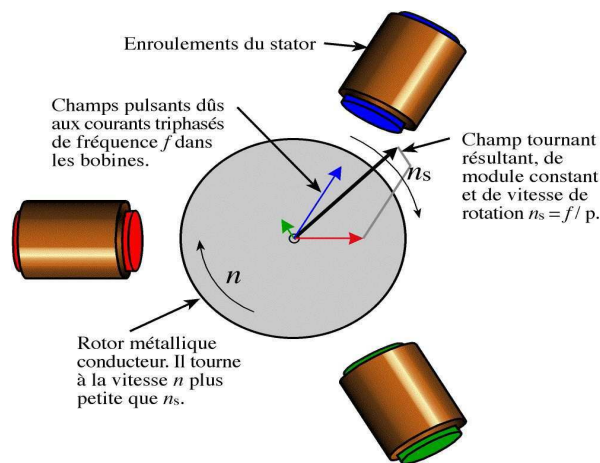


Fig. I.8 : champ magnétique résultant dans un moteur triphasé.

Les 3 enroulements statoriques créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Si on place une boussole au centre, elle va tourner à cette vitesse de synchronisme. Le stator est constitué de barres d'aluminium noyées dans un circuit magnétique. Ces barres sont reliées à leur extrémité par deux anneaux conducteurs et constituent une "cage d'écureuil".

Cette cage est balayée par le champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors traversés par des courants de Foucault induits. Des courants circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor.

D'après la loi de Lenz les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ mais avec une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme de ce dernier. Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, sinon la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom de moteur asynchrone. [8]

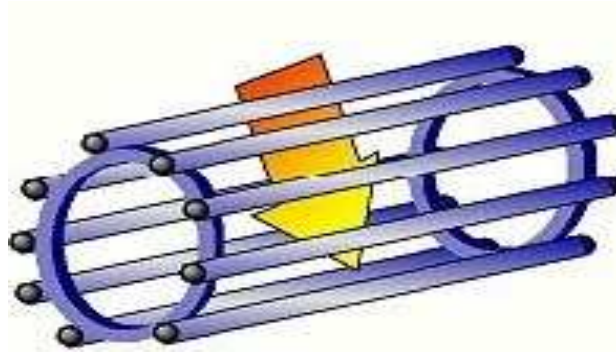


Fig. .I.9 : direction de champ magnétique dans le stator de la MAS.

I-7-Le bilan des puissances :

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique. Le bilan, peut être résumé à l'aide de schéma suivant :

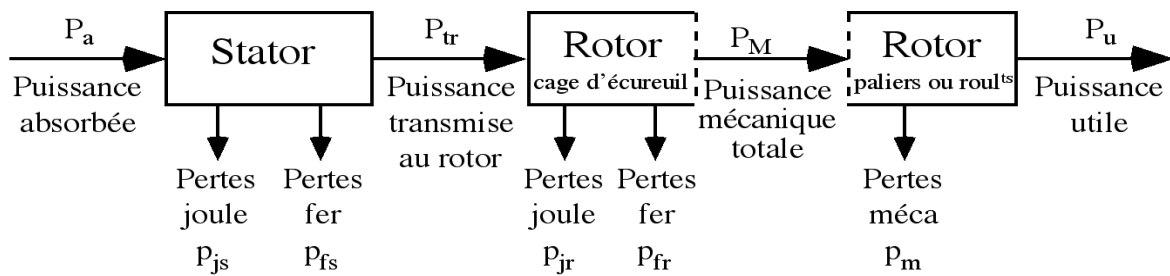


Fig .I.10: Bilan des puissances d'un moteur asynchrone.

Toutes les puissances mises en jeu dans ce bilan peuvent être calculées à partir des relations qui suivent.

➤ **Puissance électrique absorbée :**

$$P_a = UI\sqrt{3} \cos\varphi \tag{I.1}$$

P_a : La puissance électrique absorbée en watts [W].

U : La tension entre deux phases en volts [V].

I : L'intensité du courant de ligne en ampères [A].

φ : L'angle de déphasage entre courant et tension en degrés [°].

➤ **Les pertes joules statorique :**

1^{er} cas : La résistance R est donnée entre deux bornes de phases

$$P_{js} = \frac{3}{2} R I^2 \quad (I.2.1)$$

P_{js} : Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W].

R : La résistance entre deux bornes de phases en ohms [Ω].

I^2 : L'intensité du courant de ligne en ampères carré [A^2].

2^{ème} cas : La résistance R' est celle d'un enroulement

• **Couplage étoile :**

$$P_{js} = 3R' I^2 \quad (I.2.2)$$

P_{js} : Les pertes par effet Joule dans le stator en watt [W].

R' : La résistance d'un enroulement en ohms [Ω].

I^2 : L'intensité du courant de ligne en ampères carré [A^2].

• **Couplage triangle :**

$$P_{js} = 3R' J^2 \quad (I.3)$$

P_{js} : Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W].

R' : La résistance d'un enroulement en ohms [Ω]

J^2 : L'intensité du courant dans un enroulement en ampères carré [A^2].

Les pertes dans le fer du stator :

$$P_{fs} = P_{\text{magnétique}}$$

P_{fs} : Les pertes dans le fer du stator en watts [W]

Les pertes magnétiques, dans les tôles de l'armature du stator sont pratiquement indépendantes de la charge, elles sont liées à la valeur efficace U et à la fréquence f de la tension composée $u(t)$. Pour un réseau donné, ces pertes sont considérées comme constantes, elles sont données, ou calculées par un essai à vide.

➤ **La puissance transmise au rotor :**

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \quad (I.4.1)$$

P_{tr} : La puissance transmise au rotor en watts [W].

P_a : La puissance électrique absorbée en watts [W].

P_{js} : Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W].

P_{fs} : Les pertes dans le fer du stator en watts [W].

On peut aussi les calculées par la relation suivante :

$$\bullet P_{tr} = T \Omega_s \quad (I.4.2)$$

P_{tr} : La puissance transmise au rotor en watts [W].

T : Le moment du couple transmis au rotor en Newton-mètres [Nm].

Ω_s : La vitesse angulaire du champ \vec{B} en radians par seconde [rad.s⁻¹].

➤ **Les pertes par effet Joule dans le rotor :**

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad (1.5)$$

P_{jr} : Les pertes par effet Joule dans le rotor en watts [W].

g : Le glissement du moteur asynchrone [sans unités].

P_{tr} : La puissance transmise au rotor en watts [W].

➤ **Les pertes dans le fer du rotor :**

$$P_{fr} \approx 0 \text{ W} \quad (1.6)$$

P_{fr} : Les pertes dans le fer du rotor en watts [W].

Le rotor est également le siège d'un autre type de pertes. Les pertes fer ou magnétiques. Cependant ces pertes sont souvent négligées devant les autres, la fréquence des courants étant très faible.

La puissance électromagnétique

➤ **Puissance mécanique :**

$$\bullet P_M = P_{tr} - P_{jr} \quad (I.7)$$

P_M : La puissance mécanique en watts [W].

P_{tr} : La puissance transmise au rotor en watts [W].

P_{jr} : Les pertes par effet Joule dans le rotor en watts [W].

On peut aussi les calculées par la relation suivante :

$$\bullet P_M = T \cdot \Omega \quad (I.8)$$

P_M : La puissance mécanique en watts [W].

T : Le moment du couple transmis au rotor en Newton-mètres [Nm].

Ω : La vitesse angulaire du rotor en radians par seconde [rad.s⁻¹].

➤ **Les pertes mécaniques :**

$$P_{\text{méc}}$$

P_m : Les pertes mécaniques dans le rotor en watts [W]. Ces pertes sont considérées comme constantes, elles sont données, ou calculées par un essai à vide. Très souvent elles sont égales aux pertes dans le fer du stator, la somme de ces deux types de pertes sera communément appelée les pertes constantes.

➤ **La puissance mécanique utile sur l'arbre du rotor :**

$$\bullet P_u = T_u \cdot \Omega \quad (I.9.1)$$

P_u : La puissance mécanique utile sur l'arbre du rotor en watts [W].

T_u : Le moment du couple utile disponible en Newton-mètres [Nm].

Ω : La vitesse angulaire du rotor en radians par seconde [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$].

➤ **1-La puissance utile :**

$$\bullet P_u = P_M - P_m \quad (I.9.2)$$

P_u : La puissance utile en watts [W].

P_M : La puissance mécanique en watts [W].

P_m : Les pertes mécaniques dans le rotor en watts [W].

➤ **2- En peut aussi calculé de la manière suivante :**

$$\bullet P_u = P_a - P_{js} - P_{fs} - P_{jr} - P_m \quad (I.9.3)$$

P_u : La puissance utile en watts [W].

P_a : La puissance absorbée en watts [W].

P_{js} : Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W].

P_{fs} : Les pertes dans le fer du stator en watts [W].

P_{jr} : Les pertes par effet Joule dans le rotor en watts [W].

P_m : Les pertes mécaniques dans le rotor en watts [W].

- Les pertes magnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault se bilan met en évidence le fait que la puissance absorbée est obligatoirement la puissance la plus importante, elle ne cesse de diminuer en progressant vers la puissance utile qui est évidemment la plus faible, ainsi :

- Les pertes magnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault se produisent uniquement dans les tôles du stator.
- Les pertes mécaniques dues aux frottements se situent au niveau des paliers du rotor.

I-8-Le rendement :

Le rendement est le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance électrique absorbée par, d'où :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I.10})$$

η : Rendement du moteur [sans unités].

P_u : La puissance utile en watts [W].

P_a : La puissance absorbée en watts [W].

I-9-Démarrage du moteur asynchrone :

Lors d'un démarrage d'une machine asynchrone, le courant d'enclenchement peut atteindre plusieurs fois le courant nominal de la machine. Si l'application utilise un variateur ou un démarreur, c'est ce dernier qui se chargera d'adapter les tensions appliquées à la machine afin de limiter ce courant. En l'absence de variateur de vitesse, il existe plusieurs méthodes permettant de limiter le courant de démarrage. [1]

I-9-1-Méthode de démarrage de moteur asynchrone :

I-9-1-1-Démarrage direct :

C'est le plus simple qui ne peut être exécuté qu'avec le moteur asynchrone à rotor à cage.

- **couplage et procédure de commutation :**

Les enroulements du stator sont couplés directement sur le réseau et le moteur démarre sur ses caractéristiques naturelles. Au moment de la mise sous tension, le moteur se comporte comme un transformateur dont le secondaire, constitué par la cage du rotor très peu résistante, est en court-circuit. Le courant induit dans le rotor est important, il en résulte une pointe de courant sur le réseau : $I_{\text{démarrage}} = 5 \text{ à } 8 I_{\text{nominal}}$.

Le couple de démarrage est en moyenne : $C_{\text{démarrage}} = 0.5 \text{ à } 1.5 C_{\text{nominal}}$.

Malgré les avantages qu'il présente, le démarrage direct ne peut convenir que dans les cas où :

- la puissance du moteur est faible par rapport à la puissance du réseau, de manière à limiter les perturbations dues à l'appel de courant. [6]
- la machine entraînée ne nécessite pas une mise en vitesse progressive où comporte un dispositif amortisseur qui réduit le choc du démarrage.

- le couple de démarrage peut être élevé sans incidence sur le fonctionnement de la machine.

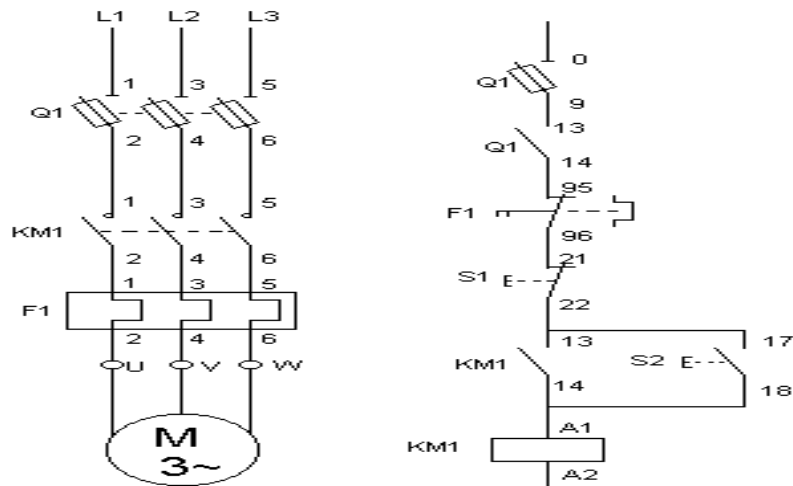


Fig..I.11: démarrage direct.

I-9-1-2-Démarrage sous tension réduite :

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur ce qui est un moyen de limiter l'intensité du courant de démarrage.

L'inconvénient est que le couple moteur est également diminué et que cela augmente la durée avant laquelle la machine atteint le régime permanent. [7]

I-9-1-3-Démarrage étoile-triangle :

Ce procédé ne peut s'appliquer qu'aux moteurs dont toutes les extrémités d'enroulement sont sorties sur la plaque à bornes, et dont le couplage triangle correspond à la tension du réseau. Le démarrage s'effectue en 2 temps.

- premier temps : mise sous tension et couplage étoile des enroulements. Le moteur démarre à tension réduite.
- deuxième temps : Suppression du couplage étoile, et mise en couplage triangle Le moteur est alimenté sous pleine tension.[9]

Le principe consiste à démarrer le moteur en couplant les enroulements en étoile sous la tension réseau, ce qui revient à diviser la tension nominale du moteur en étoile par $\sqrt{3}$

La pointe de courant de démarrage est divisée par 3.

Le couple de démarrage étant proportionnel au carré de la tension d'alimentation, il est lui aussi divisé par 3 : $C_d = 0.2 \text{ à } 0.5 C_n$

La vitesse du moteur se stabilise quand les couples moteur et résistant s'équilibrent, généralement entre 75 et 85 % de la vitesse nominale. [6]

Les enroulements sont alors couplés en triangle et le moteur rejoint ses caractéristiques naturelles. Le passage du couplage étoile au couplage triangle est commandé par un temporisateur. La fermeture du contacteur triangle s'effectue avec un retard de 30 à 50 millisecondes après l'ouverture du contacteur étoile, ce qui évite un court-circuit entre phases, les deux contacteurs ne pouvant être fermés simultanément.

Le courant qui traverse les enroulements est interrompu à l'ouverture du contacteur étoile. Il se rétablit à la fermeture du contacteur triangle.

Ce passage en triangle s'accompagne d'une pointe de courant transitoire très brève mais très importante, due à la force contre-électromotrice du moteur. [7]

Le démarrage étoile-triangle convient aux machines qui ont un faible couple résistant ou qui démarrent à vide. [6]

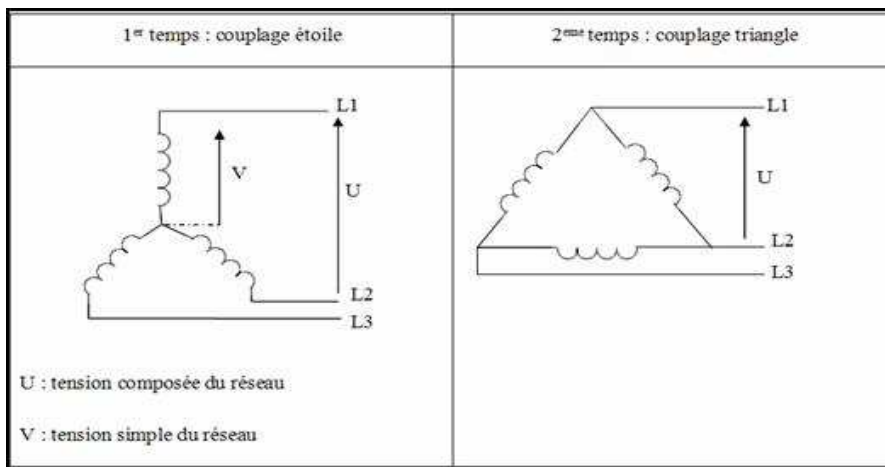


Fig. I .12 : Couplage étoile triangle.

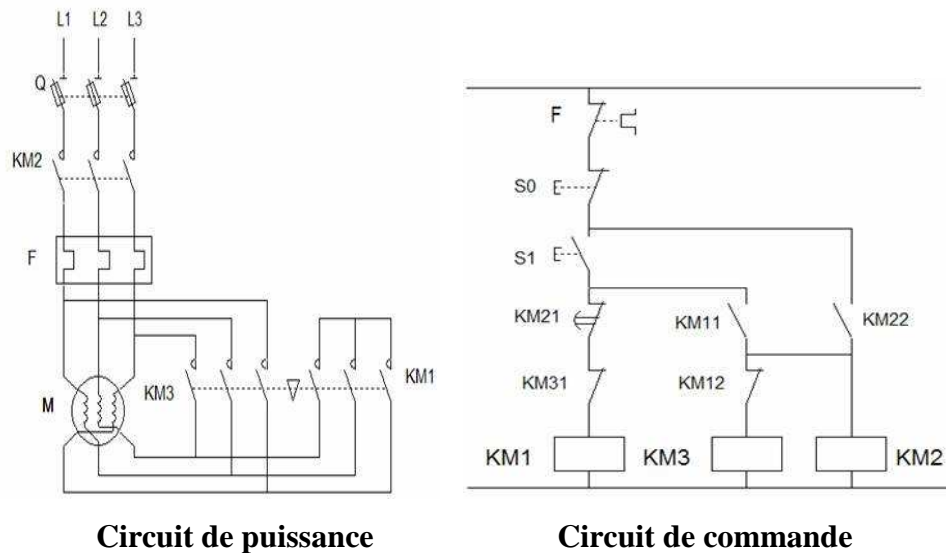


Fig. I.13: démarrage étoile-triangle.

I-9-1-4-Démarrage par autotransformateur :

Au moment de démarrage, la tension est réduite au moyen d'un autotransformateur.

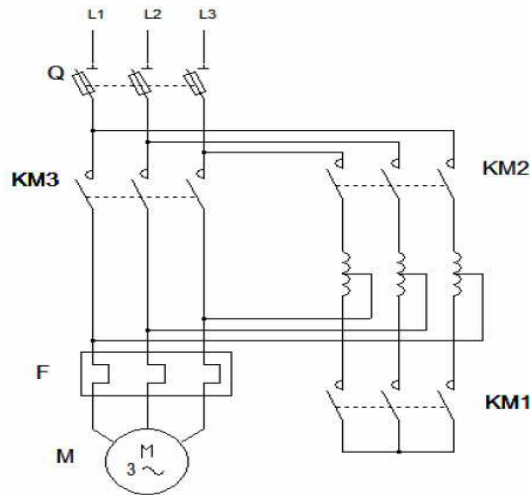
- 1- Temps, Autotransformateur en Y le moteur est alimenté à tension réduite.
- 2- Temps, Ouverture du point Y, seul la self de la partie supérieure de l'enroulement limite le courant.
- 3- Temps, Alimentation du moteur sous pleine tension.

- **procédure de couplage :**

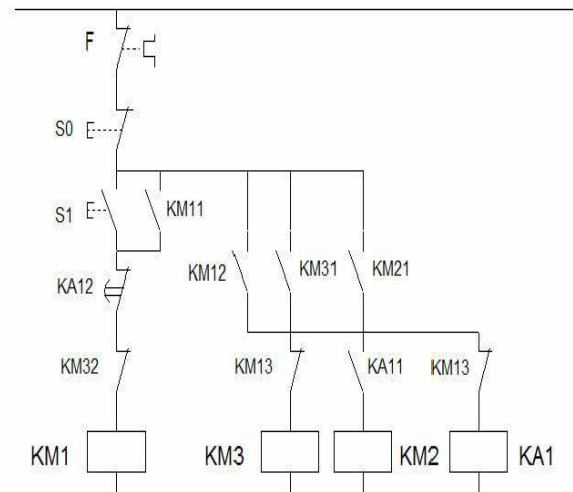
Le moteur est alimenté sous tension réduite par l'intermédiaire d'un autotransformateur qui est mis hors circuit quand le démarrage est terminé.

Le démarrage s'effectue en trois temps :

- au premier temps, l'autotransformateur est d'abord couplé en étoile, puis le moteur est couplé au réseau à travers une partie des enroulements de l'autotransformateur. Le démarrage s'effectue sous une tension réduite qui est fonction du rapport de transformation.
- avant de passer au couplage pleine tension, l'entoilage est ouvert. La fraction de bobinage raccordée au réseau constitue alors une inductance en série avec le moteur. Cette opération est effectuée lorsque la vitesse d'équilibre est atteinte à la fin du premier temps.
- le couplage pleine tension intervient après le deuxième temps généralement très court. [6]



Circuit de puissance



Circuit de commande

Fig. I.14: démarrage par autotransformateur.

I-9-1-5-Démarrage résistif :

Le principe consiste à démarrer le moteur sous tension réduite en insérant des résistances en série avec les enroulements.

Lorsque la vitesse se stabilise, les résistances sont éliminées et le moteur est couplé directement sur le réseau. Cette opération est généralement commandée par un temporisateur.

•Couplage et procédure de commutation :

Dans ce mode de démarrage, le couplage des enroulements du moteur n'est pas modifié. Il n'est donc pas nécessaire que les deux extrémités de chaque enroulement soient sorties sur la plaque à bornes.

La valeur de la résistance est calculée en fonction de la pointe de courant au démarrage à ne pas dépasser, ou de la valeur minimale du couple de démarrage nécessaire compte tenu du couple résistant de la machine entraînée.

Pendant la phase d'accélération avec les résistances, la tension appliquée aux bornes du moteur n'est pas constante. Cette tension est égale à la tension du réseau diminuée de la chute de tension dans la résistance de démarrage.

La chute de tension est proportionnelle au courant absorbé par le moteur.

Comme le courant diminue au fur et à mesure de l'accélération du moteur, il en est de même pour la chute de tension dans la résistance. La tension appliquée aux bornes du moteur est donc minimale au moment du démarrage, et elle augmente progressivement.

Le couple étant proportionnel au carré de la tension aux bornes du moteur.

Ce mode de démarrage convient donc bien aux machines ayant un couple résistant croissant avec la vitesse, comme par exemple les ventilateurs ou les pompes centrifuges. [6]

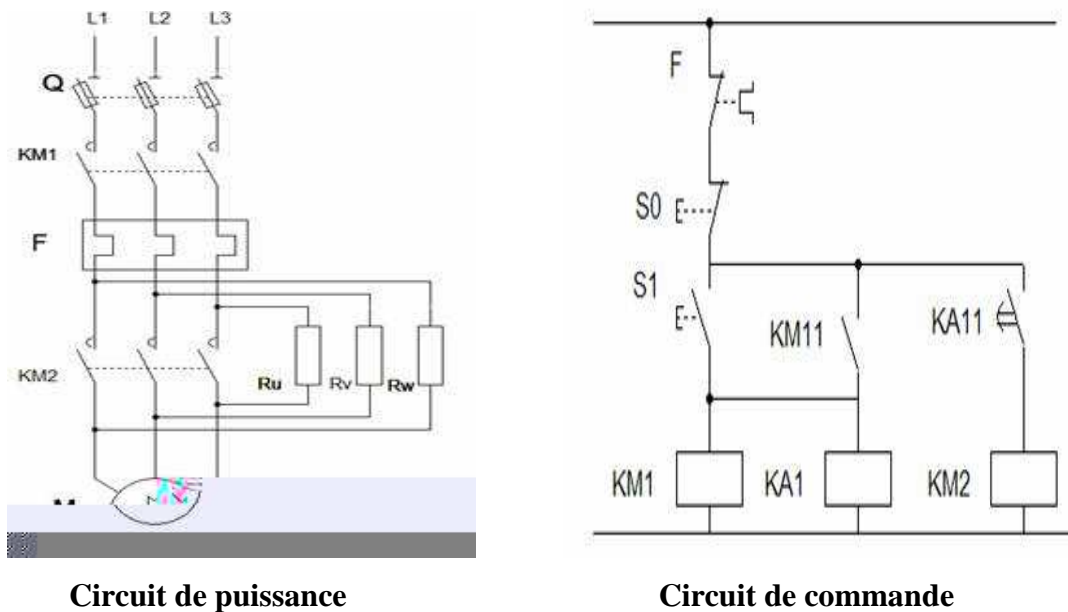


Fig. I.15: Démarrage par des résistances statoriques.

I-9-1-6-Démarrage rotorique :

Lors d'un démarrage rotorique, des résistances de puissance sont insérées en série avec les enroulements du rotor. Ce type de démarrage permet d'obtenir un fort couple de démarrage avec des courants de démarrage réduits mais il ne peut être mis en œuvre qu'avec des machines à rotor bobiné muni de contacts glissants (bagues et balais) permettant les connexions électriques des enroulements rotoriques. [6]

I-10 - Problème de démarrage de la machine asynchrone :

I-10-1 - Courant de démarrage :

Le démarrage du moteur asynchrone fait appel à des pics de courant qui peuvent provoquer des risques sur le moteur, et ce conduit au dysfonctionnement des appareils voisins. Pour chaque type de moteur une limite supérieure au rapport de courant de démarrage sur le courant nominal est imposée.

I-10-2 - Le couple de démarrage :

Le moteur démarre si le couple de démarrage (C_d) est supérieur au couple résistant (C_r).

I-10-3-Le point de fonctionnement de la machine asynchrone :

En régime permanent, ou régime établi, le couple utile (T_u) délivré par le moteur est égal au couple résistant (T_R) que lui oppose la charge mécanique :

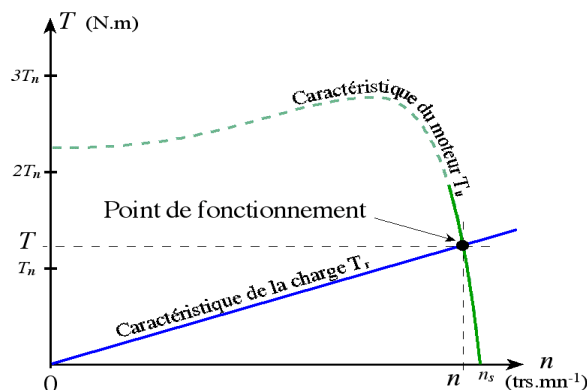
En régime permanent :

$$T_u = T_R$$

T_u : Le couple utile délivré par le moteur en newtons mètres [Nm]

T_R : Le couple résistant de la charge mécanique en newtons mètres [Nm]

du moteur et de la courbe qui caractérise le couple résistant de la charge.



Courbe. I.1 : La courbe de point de fonctionnement de la machine asynchrone.

I-11: Freinage :

On distingue plusieurs types de freinage :

I-11-1-Arrêt en roue libre : mise hors tension du stator.

I-11-2-Arrêt piloté : Tension statorique progressivement passé à tension nulle.

I-11-3-Freinage hypersynchrone :

Lorsque la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse du champ tournant, le moteur freine. Couplé à un variateur de fréquence qui diminue progressivement la vitesse du moteur on peut arrêter un moteur. Cette méthode n'est donc pas très efficace pour freiner rapidement une machine asynchrone.[7]

I-11-4- Arrêt par injection de courant continu :

L'alimentation en courant continu du stator crée un champ fixe dans la machine qui s'oppose au mouvement. C'est la méthode la plus efficace pour freiner la machine, mais les contraintes en courant sont également très sévères. La commande de l'intensité du courant continu permet de piloter le freinage. [7]

I-11-5-Arrêt à contre-courant :

Le principe consiste à inverser deux phases pendant un court instant. Ceci est donc équivalent à un freinage hypersynchrone, mais à fréquence fixe. Le couple résistant est donc faible et le courant appelé est également très important (de l'ordre de 10 à 12 fois l'intensité nominale). La conséquence en est que les enroulements du moteur risquent un sur-échauffement : on peut prévoir des résistances supplémentaires afin de diminuer l'intensité. Enfin, avec cette méthode, le couple décélérateur reste négatif même lorsque la vitesse est égale à 0 tr/min, il faut donc prévoir de couper l'alimentation quand la vitesse est nulle (temporisation, contact centrifuge), sinon la rotation s'inverse. [7]

I-11-6 : Freinage mécanique par électro-frein :

Ce système est constitué d'un frein à disque solidaire de l'arbre de la machine asynchrone et dont les mâchoires initialement serrées hors tension sont commandées par un électroaimant. Après alimentation de l'électroaimant, les mâchoires se desserrent laissant la rotation libre. La coupure de l'alimentation provoque le freinage. Ce dispositif aussi appelé « frein à manque de courant » est souvent prévu comme dispositif d'arrêt d'urgence.[7]

I-12 : Inversion de sens de rotation du moteur asynchrone :

L'inversion de sens de rotation de la machine asynchrone est effectuée en inversant le sens du champ glissant, et pour avoir cette inversion on doit permuter les connexions de deux phases des trois phases qui alimentent le moteur.

I-13 : Mode de réglage de la vitesse du moteur asynchrone :**I-13-1 : Réglage par variation du nombre de pair de pôle :**

Ceci donnant une variation non continue de la vitesse ce mode n'est donc pas envisagé pour un réglage fin du point de fonctionnement désiré. [9]

I-13-2 : Réglage par variation de tension :

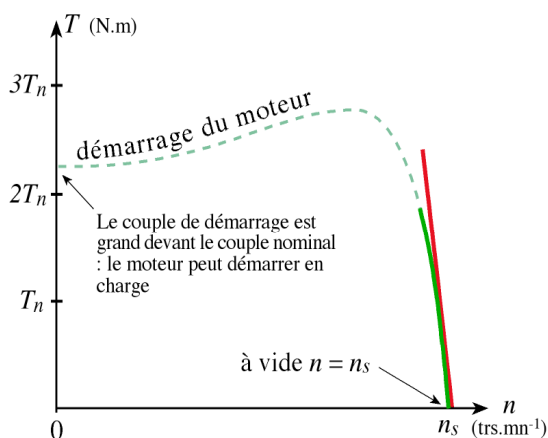
Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique avec un gradateur triphasé. [9]

I-13-3 - Réglage par action sur le glissement :

L'utilisation de Résistances rotorique permet un réglage de la vitesse au dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. [9]

I-13-4 - Réglage par variation de fréquence :

La fréquence de rotation de la machine étant au glissement près proportionnel à la fréquence d'alimentation des enroulements statorique . [9]

I-14- Caractéristique mécanique $T_u = f(n)$ **Légende**

- T_n Couple nominal
- Couple de démarrage du moteur.
On constate que ce couple est fort : la machine peut démarrer en charge.
- Zone de fonctionnement du moteur.
On constate qu'elle est presque linéaire.
Cette partie de la courbe est très verticale : la vitesse varie peu avec la charge.
- La zone de fonctionnement peut être modélisée par une droite

Courbe .I.2: des caractéristiques mécanique $T_u = f(n)$.

Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons fait une présentation de la structure de la machine asynchrone au niveau du rotor et du stator et les bobinages triphasés dans les deux parties fixe et tournante et nous avons aussi parlé de son fonctionnement, la technique et les particularités d'emploi des moteurs asynchrones, notamment les principaux dispositifs de démarrage, le réglage de vitesse et le freinage qui leur sont associés. Il est une base de connaissance minimale pour bien comprendre toute la problématique que représentent le pilotage et la protection des moteurs.

Comme nous avons abordé le variateur de vitesse qui est un équipement électrotechnique alimentant un moteur électrique de façon à pouvoir faire varier sa vitesse de manière continue.

Introduction

La transformation de l'énergie électrique dans une machine asynchrone à cage, soit l'énergie électrique en énergie mécanique (régime moteur) ou l'énergie mécanique en énergie électrique (régime génératrice), s'accompagne toujours de pertes de puissance [4], en général les causes de ces pertes et leurs distributions dans les machines électriques tournantes et dans les machines à induction en particulier sont complexes. Cette complexité est due à plusieurs raisons dont on peut citer :

-Le courant électrique et le champ magnétique sont les causes principales des pertes. La localisation de ces derniers est difficile car la distribution du champ et du courant est assez complexe.

-L'échauffement de la matière et son refroidissement se fait d'une manière très complexe car la partie de la machine est constituée de matériaux conducteurs et isolants dont les conductivités thermiques sont différentes suivant la direction de l'écoulement de la chaleur. [1]

Face à ces complexités plusieurs classifications de ces pertes ont été adaptées dans la pratique.

Dans ce chapitre nous contenterons d'annoncer certaines d'entre elles :

- Pertes dans le circuit électrique.
- Pertes dans le circuit magnétique.
- Pertes mécaniques.
- Pertes supplémentaires.

Et dans ce chapitre on parlera de ces différents types de pertes dans la machine asynchrone.

II.1. Les pertes dans le circuit électrique:

Elles portent le nom du physicien anglais James Prescott Joule qui l'a étudié vers 1860. [7]

Sont les pertes par effet Joule dans toutes les parties conductrices de la machine asynchrone traversées par des courants (enroulements statoriques et cage rotorique), elles varient en fonction du carré des courants circulant dans ces enroulements. [2]

On distingue les pertes Joules statoriques et rotoriques comme suit :

II.1.1.les pertes Joules statoriques :

Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{js} = 3 R_s I_s^2 \quad [w] \quad (II.1)$$

Avec:

R_s : Résistance d'une phase statorique [Ω].

I_s : Le courant dans la phase statorique [A].

II.1.2.Les pertes Joules rotoriques :

Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{jr} = 3 R_r I_r^2 \quad [A] \quad (II.2)$$

Avec :

R_r : Résistance d'une phase rotorique [Ω].

I_r : Le Courant induit dans le rotor [A].

II.2.Les pertes mécaniques :

Les pertes mécaniques dans une machine asynchrone se composent :

- du frottement dans les paliers ; frottement solide/solide.
- du frottement des balais sur le collecteur ou sur les bagues ; frottement solide/solide.
- du frottement de l'air sur le rotor et sur le ventilateur ; frottement solide/fluide.

Les frottements solide/solide sont proportionnels à la vitesse relative entre les pièces en mouvement alors que les frottements solide/fluide sont proportionnels au carré de cette vitesse.[2]

On peut donc conclure que les pertes mécaniques ne sont fonction que de la vitesse de rotation de la machine.

$$P_{méca} = f(\Omega)$$

Donc les pertes mécaniques sont constituées de pertes par frottement (roulements-arbre de la machine) et par ventilation.

Le refroidissement dans une machine électrique est assuré par un ventilateur monté au bout de son arbre, la puissance absorbée par ce ventilateur représente les pertes par ventilation.

Ces pertes dues au frottement de l'arbre sur les paliers et à la résistance de l'air au mouvement du rotor, ne dépendent que de la vitesse. [1]

En réalité impossible de séparer les pertes par frottement et par ventilation, car elles sont toutes les deux associées à la rotation.

Cependant, en basse vitesse les pertes par ventilation associées à la rotation sont faibles et les pertes par frottements sont estimées.

Les pertes mécaniques peuvent être globalement exprimées par la relation suivante:

$$P_{mec} = K_t(n/10)^2 D_e \quad [W] \quad (II.3)$$

Avec :

K_t : facteur de majoration, il est donné en fonction de nombre de paires de pôles et diamètre extérieur de rotor.

$$2P \geq 4 \quad ; \quad K_t = 1,3(1 - D_e) \quad ; \quad \text{pour } 0,1m \leq D_e \leq 0,5m$$

$$2P = 2 \quad ; \quad K_t = 1$$

D_e : diamètre extérieur du stator [m].

n : vitesse de rotation synchrone [trs/min].

II.3. Les pertes dans le circuit magnétique:

Sa règle de base est la suivante : toute variation de flux dans une matière magnétique provoque, à l'intérieur de celle-ci une dissipation d'énergie. Cette énergie apparaît, le plus souvent, sous forme de chaleur et n'est par conséquent pas récupérable. [7]

Elles sont appelées aussi pertes fer, du fait que les matériaux utilisés sont habituellement à base du fer ; elles regroupent les pertes par hystérésis qui sont minimisées par l'utilisation d'un matériau ferromagnétique doux et les pertes par courant de Foucault qui sont minimisées par l'utilisation de tôles magnétiques vernies donc isolées électriquement les uns des autres pour constituer le circuit magnétique : $F = P_h + P_f$, elles ne dépendent que de la tension d'alimentation U et la fréquence donc à fréquence constante on peut les considérer comme proportionnelles au carré de la tension d'alimentation, indépendantes des courants.

Elles représentent une part non négligeable des pertes totales. Ce sont des pertes qui ont lieu dans le circuit magnétique, constitué d'alliages ferromagnétiques largement utilisés dans la construction des circuits magnétiques. [7]

Une grande partie de ces pertes se dissipe au niveau des dents et de la culasse du stator, mais dans le rotor ces pertes sont négligeables à cause de la faible fréquence de la variation du flux au régime nominal. [2]

II.3.1. pertes par hystérésis :

L'hystérésis : du grec HUSTEREIN veut dire retard à l'aimantation et la désaimantation d'un métal.

Les pertes par hystérésis sont liées à l'existence "d'un frottement" de particules dues aux changements continuels du sens de l'aimantation. Ces pertes augmentent avec la fréquence et avec la surface du circuit magnétique. [7]

Les pertes par hystérésis résultent des transformations de l'organisation de la matière sous l'effet de la variation en intensité et/ou en direction du champ magnétique appliqué.

Ces pertes sont en fonction du volume et nombre de fois que le cycle est parcouru par unité de temps. Elles sont aussi en fonction du matériau utilisé et de la densité maximale du flux. [1]

On les calcule par la relation suivante :

$$P_h = K_h f B_{\max}^2 \quad [W] \quad (II.4)$$

P_h : pertes par hystérésis [watts] ;

K_h : coefficient des pertes par hystérésis ;

f : fréquence [Hertz].

B_{\max} : induction maximum [teslas].

II.3.2. Pertes par courant de Foucault :

Ce phénomène a été découvert par le physicien français **Léon Foucault** en **1851**.

Le flux alternatif Φ à travers le circuit magnétique crée dans celui-ci comme dans toute masse métallique les courants induits appelés courant de Foucault qui entraîne l'échauffement du circuit magnétique. Ces pertes d'énergie P_F dépendent comme P_H de la nature du matériau de son volume de la fréquence f , du champ magnétique B . [7]

Pour limiter ces pertes, on feuillette le circuit magnétique.

Elles résultent des variations temporelles des flux qui induisent des f.é.m. dans la masse du fer. Ces f.é.m. donnent naissance à des courants qui se referment dans la masse du fer. [1]

L'expression qui nous permet de calculer ces pertes est la suivante :

$$P_f = K_f (e \cdot B_{\max} \cdot f)^2 \quad (\text{II.5})$$

P_f : pertes fer [W] ;

K_f : coefficient caractéristique de la tôle ;

e : épaisseur de la tôle [m] ;

B_{\max} : induction maximal [T] ;

f : fréquence des champs tournant résultant [Hz] ;

II.4. Les pertes supplémentaires :

Ce sont des pertes dues à tous les phénomènes parasites, en particulier celles qui correspondent aux flux de fuites, à la fréquence fondamentale et harmonique. [7]

II.4.1. Pertes fer supplémentaires :

C'est la somme des pertes à la surface du rotor, et les pertes par harmoniques du flux dans les dents statoriques et rotoriques.

a. Pertes fer supplémentaires à la surface d'un pôle :

Ces pertes sont dues aux variations locales de l'induction provoquées à la surface d'un pôle par son déplacement relatif vis-vis des dents de l'induit. [2]

b. Pertes fer supplémentaires dues aux pulsations dans les dents :

Ce sont les pertes créées dans les dents du rotor par les variations périodiques de l'induction dues au passage des dents statorique. On trouve aussi des pertes analogues qui sont créées dans les dents du stator par le passage des dents rotoriques, elles n'existent que dans les machines à stator et à rotor denté. [1]

II.4.2. Pertes supplémentaires dans le circuit électrique :

Les conducteurs logés dans les encoches sont soumis aux flux qui modifient la densité du courant en charge par création des courants de Foucault. Ils provoquent ainsi une augmentation de la résistance des conducteurs (effet de peau), donc une augmentation des pertes par effet Joule, pour réduire ces pertes il faut diminuer le diamètre des conducteurs en les subdivisant en brins élémentaires isolés les uns des autres. [4]

D'autres pertes apparaissent à causes des discontinuités géométriques de la machine au niveau de l'entrefer. Ainsi des flux de fuite harmoniques de phases et d'encoches apparaissent et engendrent des pertes dans les conducteurs rotorique des machines asynchrones dont l'entrefer est particulièrement faible. [2]

a. Pertes dues au flux de fuite d'encoches :

Lorsque le nombre d'encoches par phases soit fini entraîne une distribution non sinusoïdale de la f.m.m dans l'entrefer.

De ce fait, un flux de fuite d'encoche ou flux différentiel ou encore flux zigzag apparait et engendre des pertes qui sont déterminées par l'expression suivante : [1]

$$P_{de} = m_1 I_1^2 r' K_i K_{di} \quad (II.6)$$

M_1 : nombre de phases au stator.

I_1 : courant d'une phase au stator.

r' : résistant d'une phase rotorique ramenée au stator, à la température de fonctionnement.

K_i : coefficient d'augmentation des pertes dues à l'effet de peau .

K_{di} : coefficient de distribution de l'enroulement statorique.

b. Pertes dues au flux de fuite de phases :

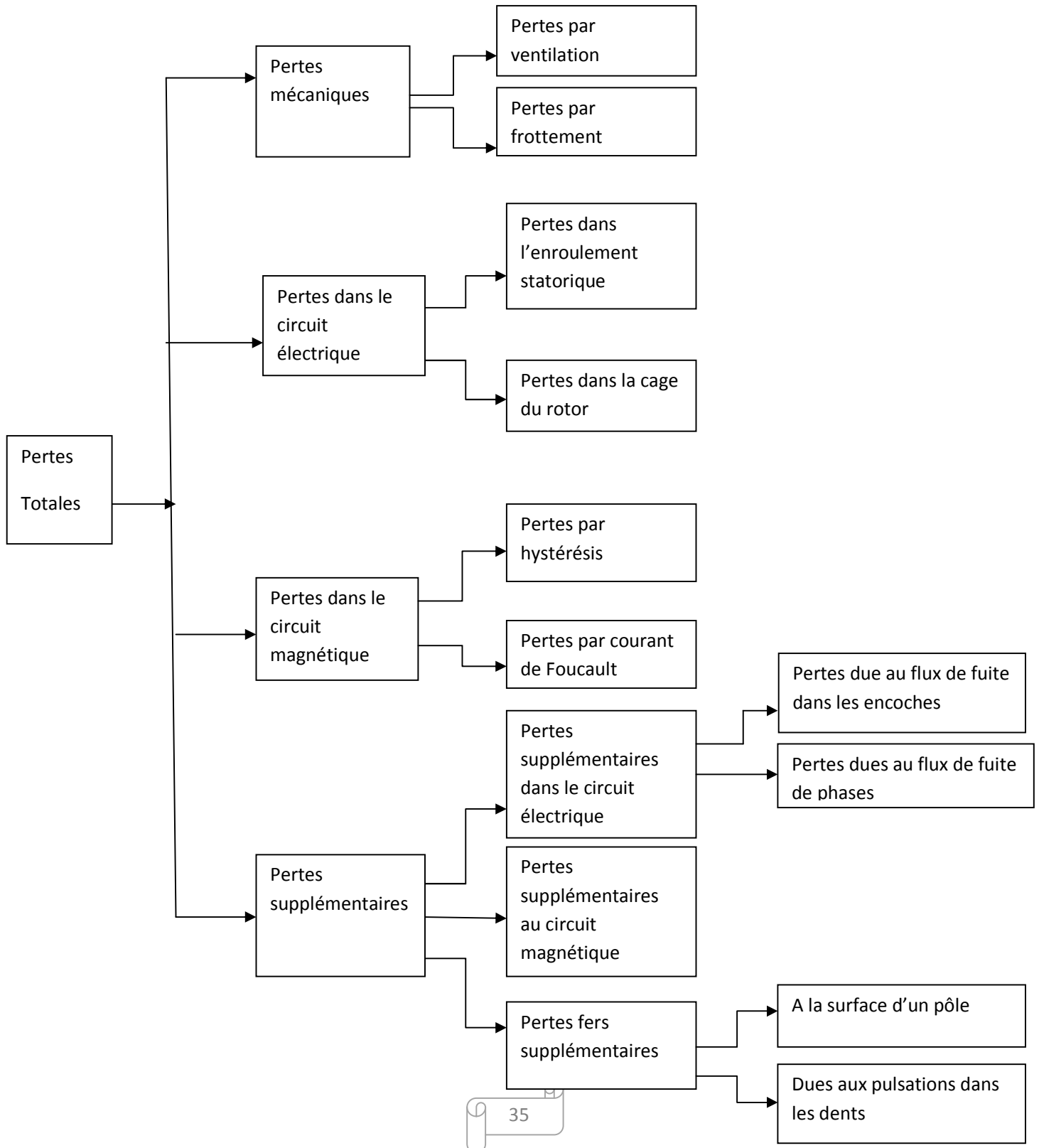
Le fait que le nombre de phases soit fini entraîne une distribution non sinusoïdale de la f.m.m dans l'entrefer. Un flux de fuite de phases apparait, celui-ci engendre des pertes non négligeables. [1]

II.4.3. Pertes supplémentaires dans le circuit magnétique :

Il existe des pertes dues aux variations de l'induction dont la fréquence est beaucoup plus élevée. Elles sont produites par les discontinuités de la machine.

La présence des encoches dans l'entrefer implique une distribution discontinue de la f.m.m ce qui entraîne des pertes par pulsation dans les dents et des pertes à la surface des pôles lisses.

II.5.Schéma des différentes pertes dans la MAS



Conclusion :

Dans ce chapitre on a résumé les pertes dans les différentes parties de la machine asynchrone à cage lors de son fonctionnement. Une connaissance exacte de la distribution des pertes est indispensable pour le calcul de l'élévation de la température, qui forme l'un des objets majeurs de la modélisation thermique quand va étudier dans ce chapitre suivant.

Introduction :

Dans les machines électriques tournantes le passage de courant et le mouvement de rotation s'accompagnent de pertes d'énergie qui se traduisent par la transformation d'une partie des énergies électrique et mécanique en énergie thermique, ce qui engendre des élévation de la température à l'intérieur de certains éléments .[2]

Donc une machine électrique tournante est toujours le siège de dissipation de différentes origines. Elles sont largement distribuées dans sa structure et plus rarement dans le fluide de refroidissements lui-même (machine à grande vitesse de rotation). Le dimensionnement thermique d'une machine électrique, c'est-à-dire le calcul du champ de température et la détermination des voies d'évacuation de chaleur, fait appel à des lois générales et à des relations particulières que chapitre vise de synthétiser. [7]

Comme nous avons entrepris de présenter dans ce chapitre, les principales méthodes utilisées pour traiter et modéliser les phénomènes thermiques dans les machines électriques et en particulier dans le type de machines faisant l'objet de notre travail. [3]

III-1-Définition des grandeurs fondamentales :**III-1-1 –Température :**

La température est la quantité physique qui caractérise la quantité de chaleur contenue dans un corps Lorsque deux parties d'un système thermodynamique sont en contact thermique, la chaleur s'écoulera d'une partie à l'autre. On dit que la chaleur est transférée spontanément de la partie la plus chaude, à la plus froide. Cet écoulement se poursuivra jusqu'à l'atteinte d'un équilibre. Les parties en contact seront alors à la même température. [3]

On peut aussi définir la température comme étant une variable d'état qui de point de vue de la structure interne de la matière caractérise le degré d'agitation de ses particules, c'est la manifestation mesurable de la chaleur stocké. [7]

III-1-2-Gradient de température :

Le gradient de température désigne généralement la quantité de variation de température de l'atmosphère avec l'altitude ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$).Cependant la variation de température est irrégulière et localement on observe rarement ce gradient. La troposphère se divise plutôt en couches horizontales ayant chacune son propre gradient de température. Dans la plupart de ces couches le gradient de températures est négatif, c'est à dire que la température diminue avec

l'altitude, mais dans certaines couches il peut aussi être nul ou positif (température constante ou augmentant avec l'altitude). On utilise aussi le terme gradient de température lorsqu'on parle de la baisse de température d'une particule d'air ascendante en raison de la diminution de pression avec l'altitude. Il s'agit dans ce cas d'un phénomène thermodynamique.[7]

III-1-3-Le flux de chaleur :

Le flux de chaleur à travers une surface c'est la quantité de chaleur qui traverse la surface considérée pendant l'unité de temps le symbole utilisé ϕ , l'unité de système international est le watt

$$d\phi = dQ^2/dt \quad (III.1)$$

III-1-4-la densité de flux de chaleur :

C'est la quantité de chaleur qui traverse l'unité de surface pendant l'unité de temps c'est donc le flux de chaleur par unité de surface (densité de flux) on la notera φ . L'unité dans le système internationale est le W/m^2

$$\varphi = d\phi/ds \quad (III.2)$$

III-1-5-Conductivité thermique des solides hétérogènes :

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. [2]

Notée λ (ou k en anglais), cette constante apparaît par exemple dans la loi de Fourier. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre.

$$\lambda = \overline{\varphi} / \overline{grad T} \quad (III.3)$$

III-1-6-Notion de la résistance thermique :

Pour les solides purs on peut facilement trouver la valeur de conductivité thermique, il n'en est pas de même dans le cas de matériaux solides composés hétérogènes très répandus dans la construction des convertisseurs électromécaniques.

Une solution intéressante consiste à définir une conductivité thermique équivalente lorsque la configuration de l'ensemble ramène à des structures géométriques régulièrement simples. Pour cela on utilise la notion des résistances thermiques qui est analogue, en électrocinétique, à la résistance électrique. [3]

Pour déterminer la conductivité thermique des solides hétérogène, on utilise la notion de la conduction à travers un matériau de conductivité d'épaisseur(x) et de section (s) dans la direction de la conduction.

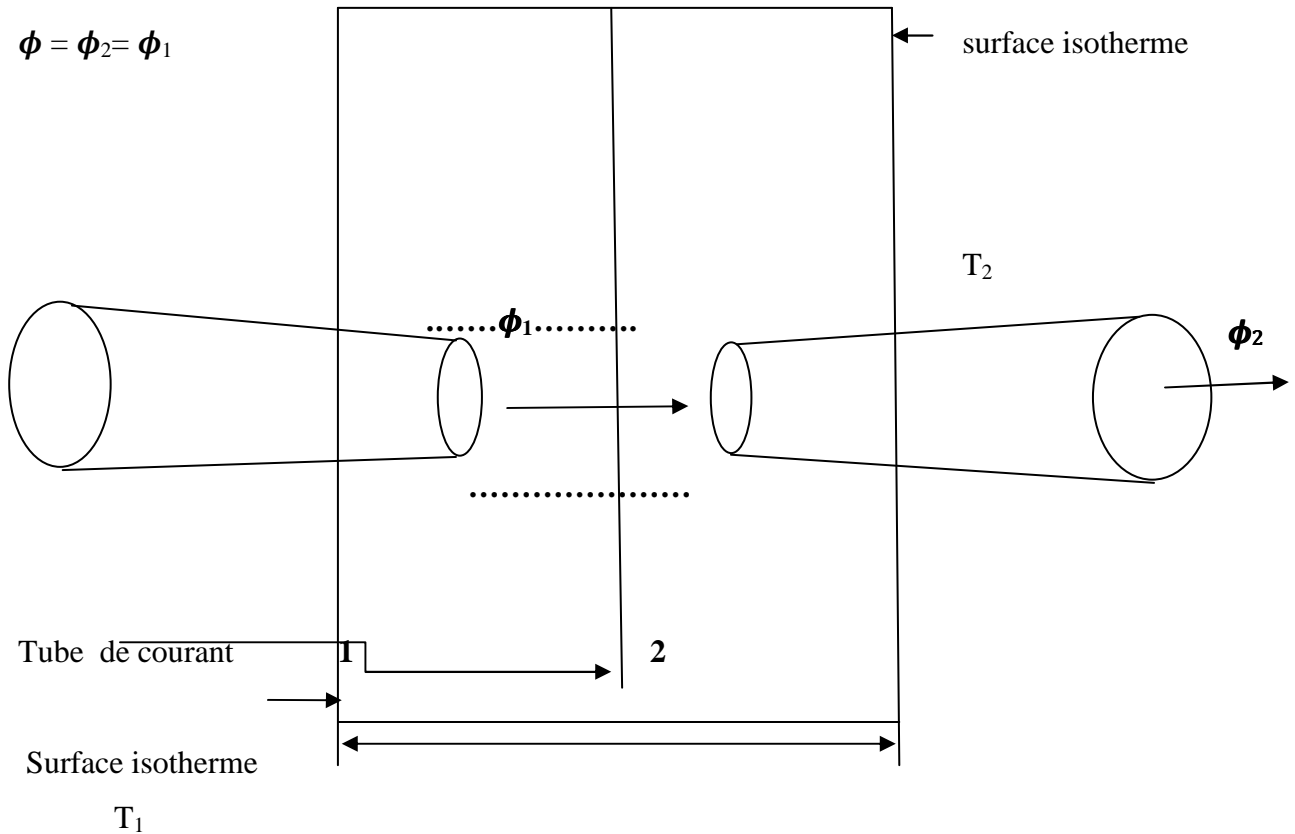


Fig .III.1: Représentation schématique de la résistance thermique dans un circuit thermique.

Sachant que la quantité de chaleur transmise par conduction entre deux surfaces égales et parallèles est donnée par la loi de Fourier suivante :

$$\phi = \frac{\lambda \cdot s}{x} (T_1 - T_2) \quad (\text{III.4})$$

Avec :

ϕ : flux d'énergie transmise. [W]

S : surface à travers laquelle se propage le flux thermique [m²].

λ : conductivité thermique [w/mc⁰].

x : distance entre deux surface dont la température est T₁ et T₂. [m]

Que l'en peut écrire comme suit :

$$T_1 - T_2 = \frac{x}{\lambda \cdot S} \phi \tag{III.5}$$

D'après cette relation on peut déduire l'expression de la résistance thermique par analogie avec la loi d'Ohm

$$R = \frac{x}{\lambda \cdot S} = \frac{T_1 - T_2}{\phi} \tag{III.6}$$

Remarque : cette notion est généralisée pour un milieu de différente forme, on peut l'écrire de la manière suivante :

$$R = \frac{x}{\lambda \cdot S_{moy}} \tag{III.7}$$

Dans le cas d'un cylindre :

$$S_{moy} = \frac{s_1 \cdot s_2}{\log(s_2/s_1)} \tag{III.8}$$

S_{moy} : la moyenne logarithmique des surfaces (1) et (2) des surfaces externe du cylindre

- **Pour une sphère :**

$$S_{moy} = \sqrt{S_1 \cdot S_2} \tag{III.9}$$

S_{moy} : la moyenne géométrique des surfaces internes et externes.

Pour plusieurs couches (i) de milieux différent mais de formes semblables traversées par un flux de chaleur on distingue deux cas : association série et association parallèle.

- **Association série :**
-

La conduction thermique est déduite de la relation suivante

$$\frac{x}{\lambda_{eq} \cdot S} = \sum x_i / \lambda_i \cdot S_i \tag{III.10}$$

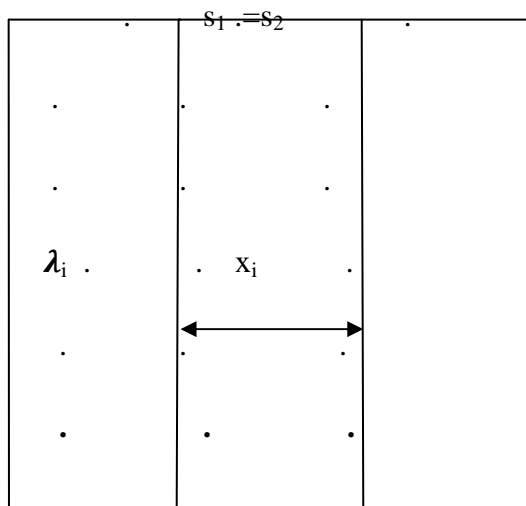


Fig .III.2: Association série.

Association parallèle :

La conductivité thermique est déduite par la relation suivante :

$$\lambda_{eq}(s/x) = \sum \lambda_i s_i / x_i \quad (III.11)$$

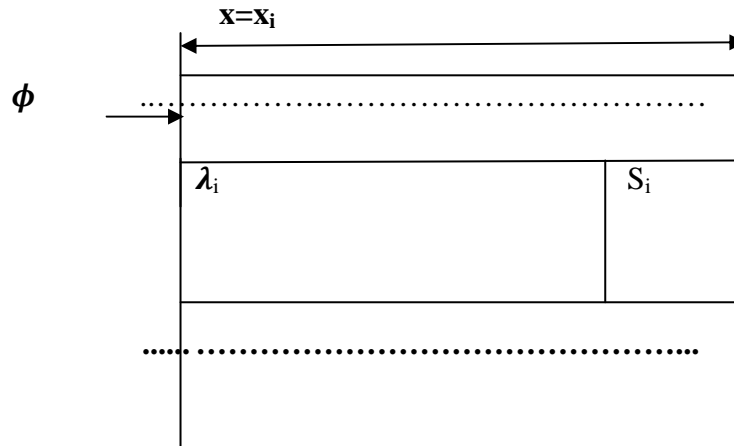


Fig.III.3: Association parallèle.

III-2-Définition de transfert thermique :

La conduction thermique (diffusion thermique) est un mode de phénomène de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu, ou entre deux milieux en contact, et se réalisant sans déplacement global de matière (à l'échelle macroscopique) par opposition à la convection qui est un autre transfert thermique. Elle peut s'interpréter comme la transmission de proche en proche de l'agitation thermique : un atome (une molécule) cède une partie de son énergie cinétique à l'atome voisin.

De tous temps, les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, mais aussi pour des opérations de transformations chimiques.[7]

Le potentiel qui provoque le transport et le transfert de l'énergie thermique est la température. Si deux points matériels placés dans un milieu thermiquement isolé sont à la même température, on peut affirmer qu'il n'existe aucun échange thermique global entre ces deux points dits en équilibre thermique (il s'agit bien d'un équilibre thermique car chacun des points matériels émet une énergie thermique nette de même module, mais de signe opposé).

III-3-La conduction :

La conduction est le mode de transfert de chaleur existant dans un milieu donnée sans qu'il y ait déplacement apparent de matière. C'est ce qui se passe en particulier dans un milieu solide homogène (métal, paroi...).

La conduction ne peut exister que s'il existe des écarts de températures c'est-à-dire si le gradient de températures n'est pas nul. Dans le cas contraire le milieu est en équilibre thermique est aucun transfert de chaleur ne peut se produire, pour que ce gradient de température existe.[7]

La chaleur se propage suivant des lignes de flux normal à des surfaces isothermes Ce phénomène est régi par la loi de Fourier. Pour un milieu isotrope et homogène la densité de flux est proportionnelle :

- À l'opposé du gradient de température.
- À la conductivité thermique, dépendent de la température, dont l'ordre de grandeur varie suivant la nature de corps

La densité de flux de chaleur s'écrit :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{grad} T \quad (III.12)$$

φ : la densité de flux thermique [W/m²]

λ : la conductivité thermique [W/m°C]

T : Température [°C]

III-4- Convection :

Dans la convection, la chaleur est entraînée par les mouvements d'un fluide. Puisque la convection dépend du déplacement de molécules d'un endroit à un autre, elle ne se produit que dans les fluides qui peuvent se déplacer librement. Il n'y a pas de convection dans les solides. La convection peut être naturelle ou forcée comme nous l'expliquons plus bas.[7]

III-4-1-Convection forcée :

Dans ce type de convection, les différences de pression forcent le mouvement du liquide. Différents équipements peuvent produire cette différence de pression : pompes, ventilateurs, compresseurs. [3]

III-4-2-Convection naturelle :

S'il n'y a pas de mécanisme externe, on parle de convection naturelle, aucune pompe ne force le mouvement du fluide. Les différences de masse volumique ou de pression dans le liquide causées par le transfert de chaleur sont à la source du mouvement.

Les liquides plus denses, plus lourds descendent, ce qui force le mouvement ascendant du liquide plus léger. [3]

Quel que soit le type de convection, le débit de chaleur diffusée d'un corps, à un corps, est proportionnel à la différence de température entre le corps et le fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton. [7]

$$\varphi = h (T_p - T_f) \quad (\text{III.13})$$

φ : densité de flux de chaleur [W/m^2]

h : Coefficient de convection [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$]

T_p : la température de la paroi du solide [C]

T_f : Température du fluide loin de la paroi [°C]

Le transfert de chaleur par convection est un processus extrêmement complexe et la simplicité de la (III.13) ne reflète guère les difficultés inhérentes au calcul du coefficient h . Ce dernier dépend de l'écoulement du fluide et des conditions géométriques et physiques d'échanges. A partir des relations mathématiques on peut introduire le coefficient d'échange h . [3]

III-5-transfert de chaleur par rayonnement :

Le rayonnement est un transfert de chaleur entre deux corps, séparés par un vide ou un milieu transparent, par l'intermédiaire d'onde électromagnétiques.

Le rayonnement est une transmission directe de la chaleur d'un corps chaud sur un corps froid. Lorsque deux corps sont en présence, cette énergie rayonnante devient chaleur, chaque corps absorbe une partie de l'énergie rayonné par l'autre, une partie est réfléchi et une troisième peut traverser le corps si celui-ci est transparent.[1]

Le rayonnement thermique n'exige pas de support matériel pour se propager. Ces échanges peuvent avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.[1]

Si on considère deux surfaces planes infinies, face à face la loi de BOLTEZMAN permet de calculé le flux échangé entre ces deux surfaces par la relation suivante :

$$= \frac{F_{1-2}(T_2^4 - T_1^4)}{1 + (1 - \varepsilon_1) \varepsilon_1 F_{1-2} + (1 - \varepsilon_2) \varepsilon_2 F_{1-2}} \quad (\text{III-14})$$

III-6-source de chaleur dans une machine électrique fermée auto ventilée :

La figure suivante présente l'illustration des différentes sources de chaleur et la circulation de l'air dans une machine électrique.

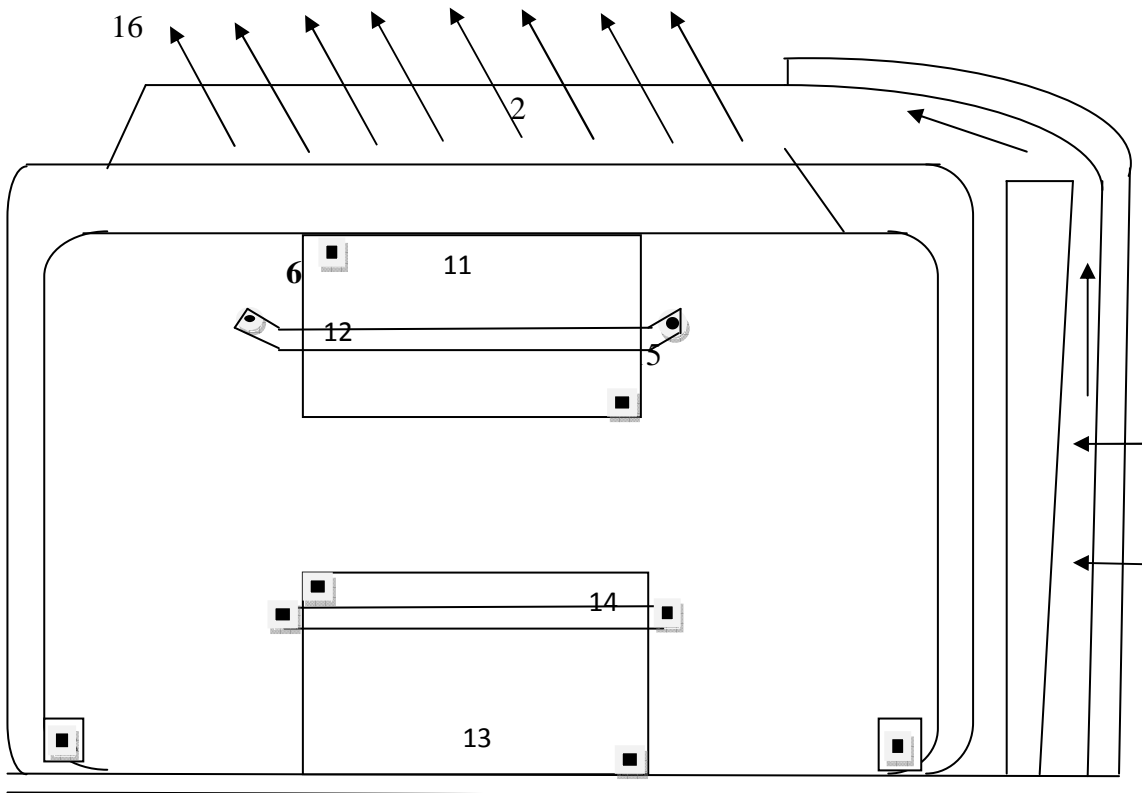


Fig.III.4 : Source de chaleur d'une machine asynchrone

: Circulation de l'air

: Source de chaleur

- | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 1 : carcasse | 2 : ailette | 3 : cache ventilateur |
| 4 : ventilateur | 5 : flasque | 6 : roulement |
| 7 : air emprisonné | 8 : tête de bobine statorique | |
| 9 : anneau de court circuit | 10 : entrefer | 11 : fer statorique |
| 12 : encoche statorique | 13 : fer rotorique | 14 : encoche rotorique |
| 15 : arbre | 16 : air ambiant | |

III-7-carte d'échange thermique dans une machine électrique :

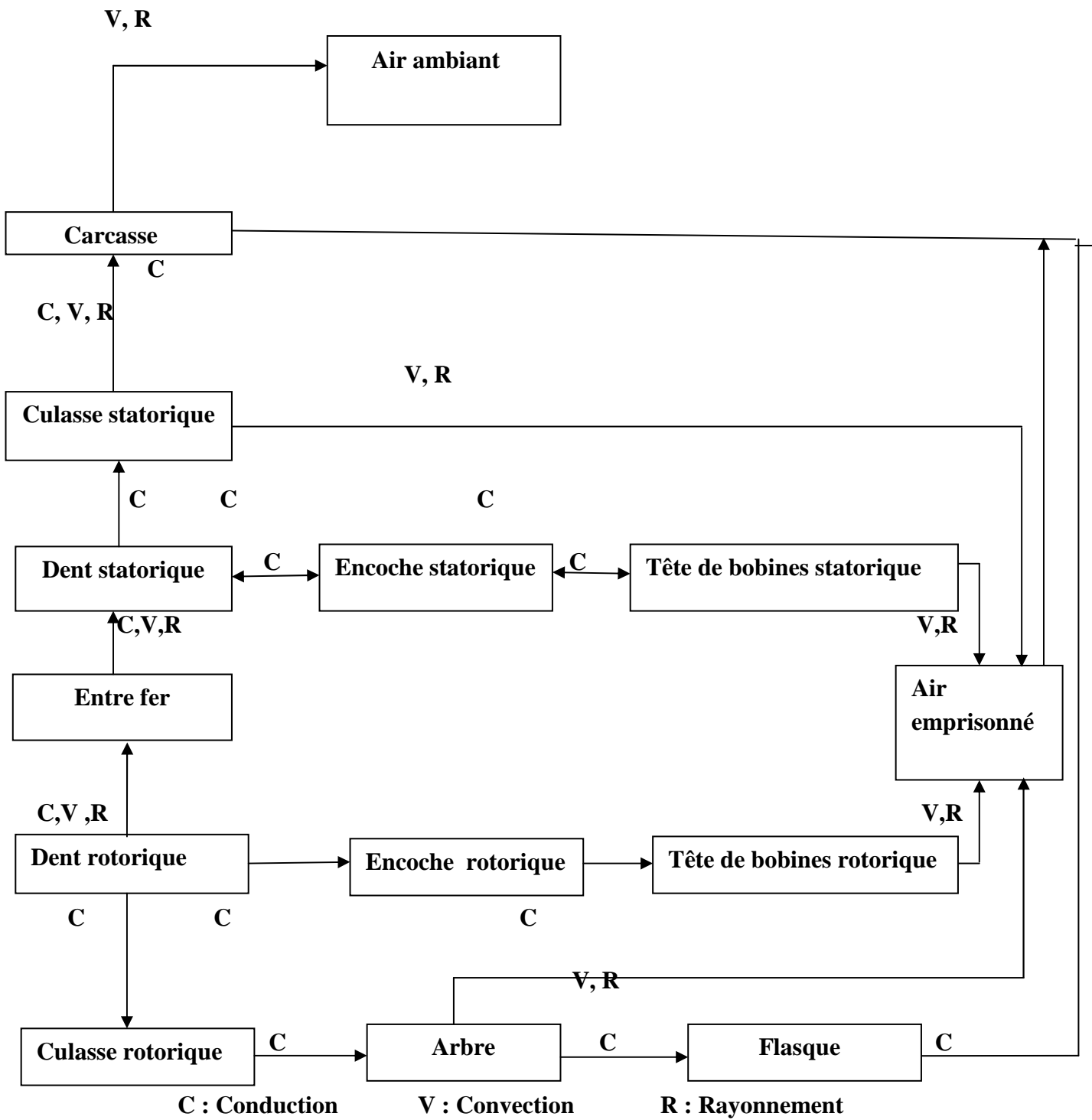


Fig.III.5 : Carte des échanges thermiques dans une machine fermée auto ventilée.

Cette figure représente la carte des échanges thermique dans une machines fermée auto ventilée qui parle de la machine asynchrone à cage dans notre cas qui est représentée sur la fig.III.4 qui est une machine de faible puissance, totalement fermée et auto ventilée.

On dans cette machine le ventilateur monté au bout d'arbre, tourne avec le rotor auquel il est solidaire et débite un flot d'air sur la surface extérieure de la carcasse. La surface d'échange essentielle avec l'environnement est justement celle de cette carcasse elle-même augmentée d'ailettes pour accentuer le transfert de chaleur qui se fait principalement par convection forcée.[3]

A l'intérieur de la machine, le transfert de chaleur entre les parties solides se fait par conduction. Le rotor tourne dans l'air emprisonné qui sert l'intermédiaire pour le transfert de chaleur entre les différentes surfaces internes.[5]

A travers l'entrefer et en absence de circulation axiale de l'air, la chaleur est transférée radialement depuis la surface du rotor vers le stator. Les modes de transfert de chaleur que l'on retrouve alors sont la conduction et la convection.

Axialement, les transferts de chaleur par l'intermédiaire de l'arbre sont réduits compte tenu des surfaces d'échanges réduites disponibles. Les modes de transferts utilisables sont la convection et le rayonnement (négligeable) travers l'air emprisonnée qui véhicule la chaleur des extrémités des parties solides (anneaux de court circuit, têtes de bobines, circuits magnétiques) vers les flasques.[3]

III-8-Les méthodes d'études thermiques :

Nous pouvons distinguer deux axes principaux sur lesquels s'appuient les recherches dans le domaine de modélisation thermique des actionneurs électromécaniques :

- Le premier concerne la réalisation de maquettes expérimentales souvent nécessaires afin de déterminer avec le maximum de précision la distribution de la température dans la machine et de maîtriser les phénomènes d'échanges de chaleur ayant lieu aussi bien à l'intérieur de la machine qu'avec le milieu environnant. L'association de données expérimentales et de modèles thermiques théoriques permet de vérifier la validité de ce dernier et de déterminer certains paramètres plus ou moins sûrs du modèle (coefficient d'échange de chaleur, résistances et capacités thermiques...).
- Le deuxième axe concerne la modélisation théorique ou l'on distingue trois techniques classiquement proposées :

- Les méthodes dites empiriques,
- La méthode d'analyse nodale,
- Et les méthodes numériques (élément finis).

III-8-1- Méthode empirique :

Nous retrouvons ces méthodes dans les ouvrages de construction de machines électriques [11,12] destinés à la formation des ingénieurs. Ces méthodes permettent d'évaluer la température du point de fonctionnement nominal en régime permanent. Cette estimation, quoique très délicate, au vu du nombre important de paramètres qui interviennent, est rendue possible en utilisant des abaques et de formules plus ou moins exactes issues de l'expérience acquise dans le domaine de la construction des machines électriques.

III-8-2- Méthode d'analyse nodale :

Le principe de cette méthode consiste à ramener l'étude du comportement thermique à un schéma équivalent électrique en utilisant les notions de résistances et de capacités thermiques. Les pertes constituent alors les sources de courant. Le potentiel aux différents nœuds donne la température.

III-8-3- Méthode numérique (éléments finis) :

Cette méthode est basée sur un découpage plus ou moins fin du système modélisé et permet de tenir compte de plusieurs paramètres (non linéarité, géométrie, complexe,...) qu'on ne peut généralement pas considérer avec les méthodes analytiques

La méthode des éléments finis permet la résolution numérique des équations dérivées de la forme variationnelle de l'équation de la chaleur.

Conclusion :

Dans ce troisième chapitre nous avons constaté que la conversion de l'énergie électromécanique dans les machines électriques s'accompagne de pertes (électromagnétique et mécanique) qui se transforment en énergie calorifique. Ceci se traduit par des élévations de température à l'intérieur de la machine. Le transfert de chaleur se fait essentiellement par conduction thermique des parties actives internes vers le milieu ambiant où la chaleur est cédée par convection et rayonnement.

Comme nous avons aussi exposé dans ce chapitre les différentes méthodes d'étude du comportement thermique des machines électriques, ces méthodes théoriques, que ce soit nodale ou par éléments finis présentent des difficultés dues à la complexité du transfert de chaleur et les méthodes empiriques semblent être de plus en plus abandonnées lorsque une plus grande précision est recherchée dans le cas d'une optimisation des dimensions de la machine.

Introduction :

La connaissance de la température en tout point de la machine électrique en particulier dans la machine asynchrone est très importante dans le domaine d'étude thermique qui nous permet d'améliorer la résistance de ces machines face aux températures élevées et prendre des précautions lors de leurs utilisations.

Les élévations de température sont liées aux pertes générées dans différentes parties de la machines d'une part et d'autre part aux caractéristiques thermiques des matériaux utilisées et aux conditions de refroidissement.

La machine asynchrone à étudier est équipée de plusieurs capteurs de températures placés dans différents endroits fixes et tournant de la machine. Par la suite une modélisation thermique du moteur asynchrone avec le logiciel FEMM et par la méthode d'analyse nodale en régime établi est effectuée.

IV-1-L'étude expérimentale du moteur asynchrone :

L'objectif de la présente étude est la mise en place de banc expérimental utilisé et l'interprétation des différents résultats des essais effectués et réalisés au sein de laboratoire de machine électrique du département d'Electrotechnique (Université Mouloud Mammeri de Tizi_Ozou).

IV-2-Présentation du moteur asynchrone a étudié :

Le moteur utilisé pour effectuer les différents essais est un moteur asynchrone triphasé à cage comportant les caractéristiques suivantes [annexe I-3] :

- De type 890-100-1064-0041.
- De marque ENEL (électro-industrie) N°22-128-02.
- De puissance 2,2 KW.
- Fonctionne sous une tension nominale de 380V.
- Absorbe un courant nominal de valeur 5,2A en triangle.
- Une vitesse de rotation de 1410 trs/min.
- Son coefficient de puissance, $\cos\varphi=0,83$.
- De classe d'isolation F (155°C).

IV-4-Description du banc d'essai :

Pour réaliser les différents essais pour la mesure de température dans la machine asynchrone à cage, nous avons utilisé le matériel suivant :

- Une génératrice à courant continu (excitatrice) pour les essais en charge. Elle possède les caractéristiques suivantes :
de type DL2062, puissance nominale 2,4 KW, tension nominale 220V, courant nominale 10,9A, vitesse nominale 1420 trs/min, courant d'excitation égale à 1,6 A et elle est de classe d'isolation F.
- une source d'alimentation triphasé fixe (380 V/6A), variable en alternatif et une source continue
- différents appareils de mesure (Ampèremètres, voltmètres, chronomètre, thermomètre, wattmètres)
- onduleurs : De type télémechanique altivar 31, de puissance 7.5KW/10HP et une tension alternative 380/500 V
- capteur de température de type thermocouple
- un enregistreur de température (CA 625 ECOPOINTER)
- des files électriques

IV-4-Description de l'enregistreur de température :

L'ECOPOINTER a six voies de mesure, il enregistre toute variable physique préalablement en signale électrique comme la température, la pression, le débit, la puissance la vitesse ...

Les voies d'entrées sont indépendantes, six mesure peuvent êtres enregistré en même temps en plus de ça il nous donne directement les valeurs de la température. [1]

IV-5-Capteur de température (thermocouple) :**IV-5-1- Définition de thermocouple :**

En physique, les thermocouples sont utilisés pour la mesure de température. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Leur principal défaut est leur imprécision : il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à 0,1 °C - 0,2 °C. La mesure de température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck. [7]

IV-5-2- Effet Seebeck :

Thomas Johann Seebeck (1770-1831) est le premier à avoir mis en évidence le fait que dans un circuit fermé constitué de deux conducteurs de nature différente (un métal **A** et un métal **B**), il circule un courant lorsqu'on maintient entre les deux jonctions une différence de température. Ce courant est dû à l'apparition d'une force électromotrice (fém) directement liée à la différence entre les températures T_1 et T_2 des deux jonctions. [7]

IV-5-3-principe de mesure de température de thermocouple :

Dans un circuit comportant deux conducteurs de nature différente il apparaît une force électromotrice lorsque la variation de température est appliquée entre les deux soudures du couple ainsi formé. [2]

Le générateur thermoélectrique fournit une différence de potentiel (ddp) directement exploitable à l'entrée d'un amplificateur. Cette ddp est en fonction de la différence de température entre la jonction dite de mesure (appelée aussi soudure chaude) et celle de référence (appelée aussi soudure froide) supposée connue.

Si les températures T_1 et T_2 sont identiques, la force électromotrice produite sera nulle même si les points intermédiaires des métaux **A** et **B** sont portés à des températures différentes de T_1 et T_2 . [7]

On appelle :

- **Soudure chaude** : Jonction de l'ensemble thermocouple soumis à la température à mesurer : c'est la jonction Capteur.
- **Soudure froide** : Jonction de l'ensemble thermocouple maintenu à une température connue ou à $0\text{ }^\circ\text{C}$: c'est la jonction Référence. Donc un thermocouple produit une f.é.m. en rapport avec les températures des deux jonctions.

T_1

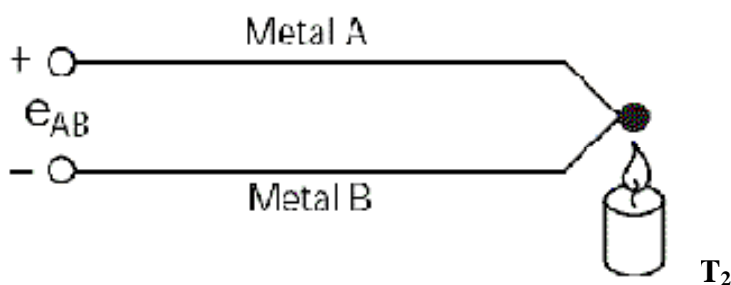


Fig-IV-1 : Schéma descriptif d'un thermocouple.

IV-5-4-Avantage et inconvénient de thermocouple :**a- Avantages :**

- Robustesse
- Une grande souplesse d'utilisation et non encombrante
- Gamme de température très large
- Une vitesse de réponse élevée

b- inconvénients :

- Température de référence doit être connue
- Défauts d'isolement au-delà de 1 800 K ou isolement difficile
- La non-linéarité
- La nécessité d'une correction automatique ou manuelle due à la température de la soudure froide,
- Faible amplitude du signal

IV-5-5-Emplacement des capteurs dans la machine asynchrone :

Les capteurs sont placés dans différents endroits accessibles de la machine, susceptibles d'être des sources de chaleur. Ceci que ce soit sur la partie fixe ou la partie tournante.

Le capteur placé sur la carcasse est un référence aux autres points et la l'ambient sert de référence à tout les points.

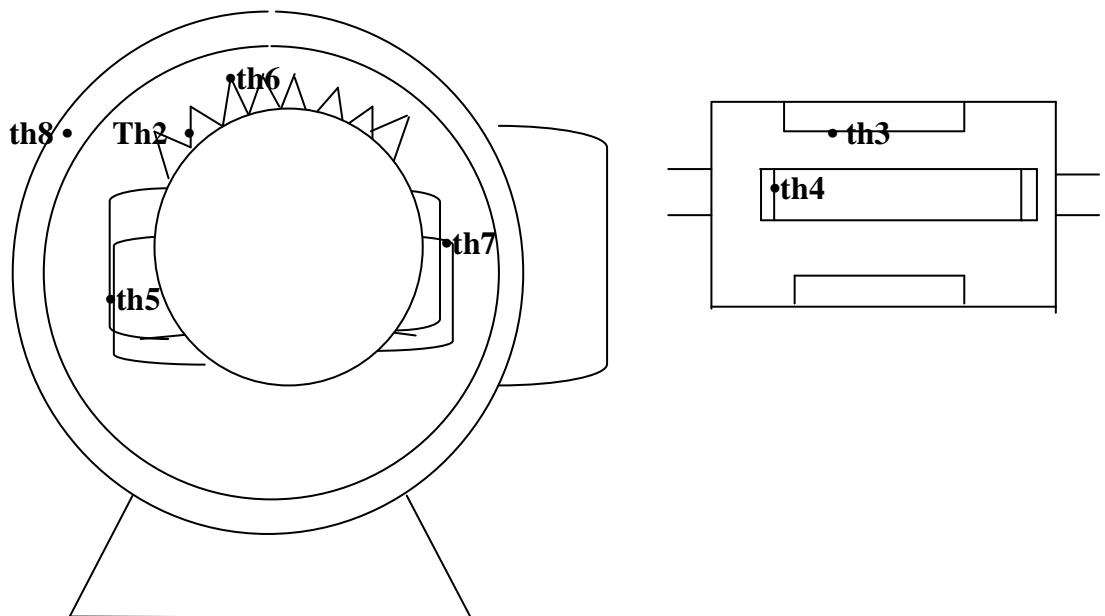


Fig. IV.2 : Emplacement des thermocouples dans la machine asynchrone.

Th2 : la dent statorique Th3: l'entrefer Th4: anneaux de court circuit sur le rotor
Th5: tête de bobine coté non ventilé Th6 : l'encoche statorique
Th7: tête de bobine coté ventilé Th8 : carcasse

IV-5-6-Difficulté de mesure de température rotorique :

Au court de notre travail nous avons rencontré des problèmes de mesure au niveau du thermocouple placé sur le rotor, que nous avons résolu par un système bagues –balais.

Mais le système provoque une chute de tension aux bornes du capteur.

Pour en tenir compte de cette chute, un essai d'entraînement du moteur asynchrone par un moteur à courant continu est effectué. Pour cet essai, la vitesse de rotation est située dans les limites de fonctionnement nominal. Vers la fin nous avons déduit une chute de tension équivalente à une température de l'ordre de 3°C qui nous a permis de corriger les températures rotoriques.

IV-5-7- Photographie du banc d'essai :

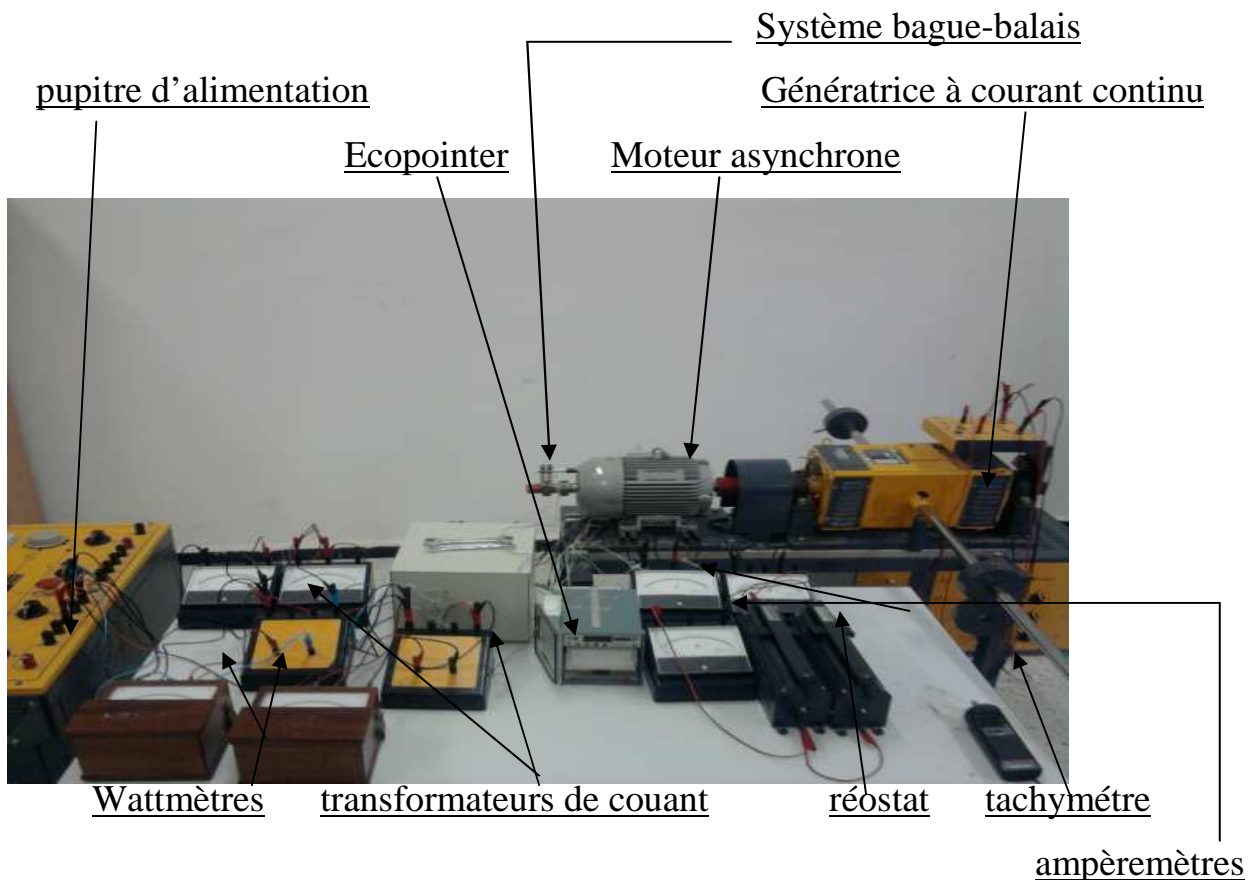


Fig. IV.3 : Photographie de banc d'essai.

IV-6- Les différents essais expérimentaux effectués sur le moteur :

- Essai à vide sans ventilation alimentation sinusoïdale.
- Essai à vide sans ventilation avec onduleur.
- Essai à vide avec ventilation alimentation sinusoïdale.
- Essai à vide avec ventilation et avec onduleur.
- Essai en charge nominale.
- Essai en charge nominale avec onduleur.

Remarque :

ΔT : représente la différence de température entre deux thermocouples placés dans deux endroits différents

T_i : la température ambiante initiale.

T_f : la température ambiante finale.

C_n : le couple nominal.

TH: thermocouple.

IV-7 : Présentation des résultats des différents essais effectués :**IV-7-1-Essai à vide sans ventilation avec une alimentation sinusoïdale :**

Cet essai consiste à alimenter le moteur avec ses paramètres nominaux sans être couplé à la charge c'est-à-dire que le couple est approximativement égale a zéro et une vitesse de rotation proche de la vitesse de synchronisme. Son schéma du montage est représenté par la figure suivante :

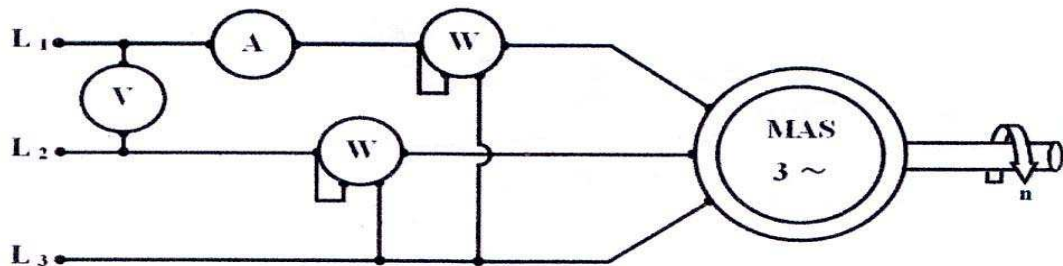
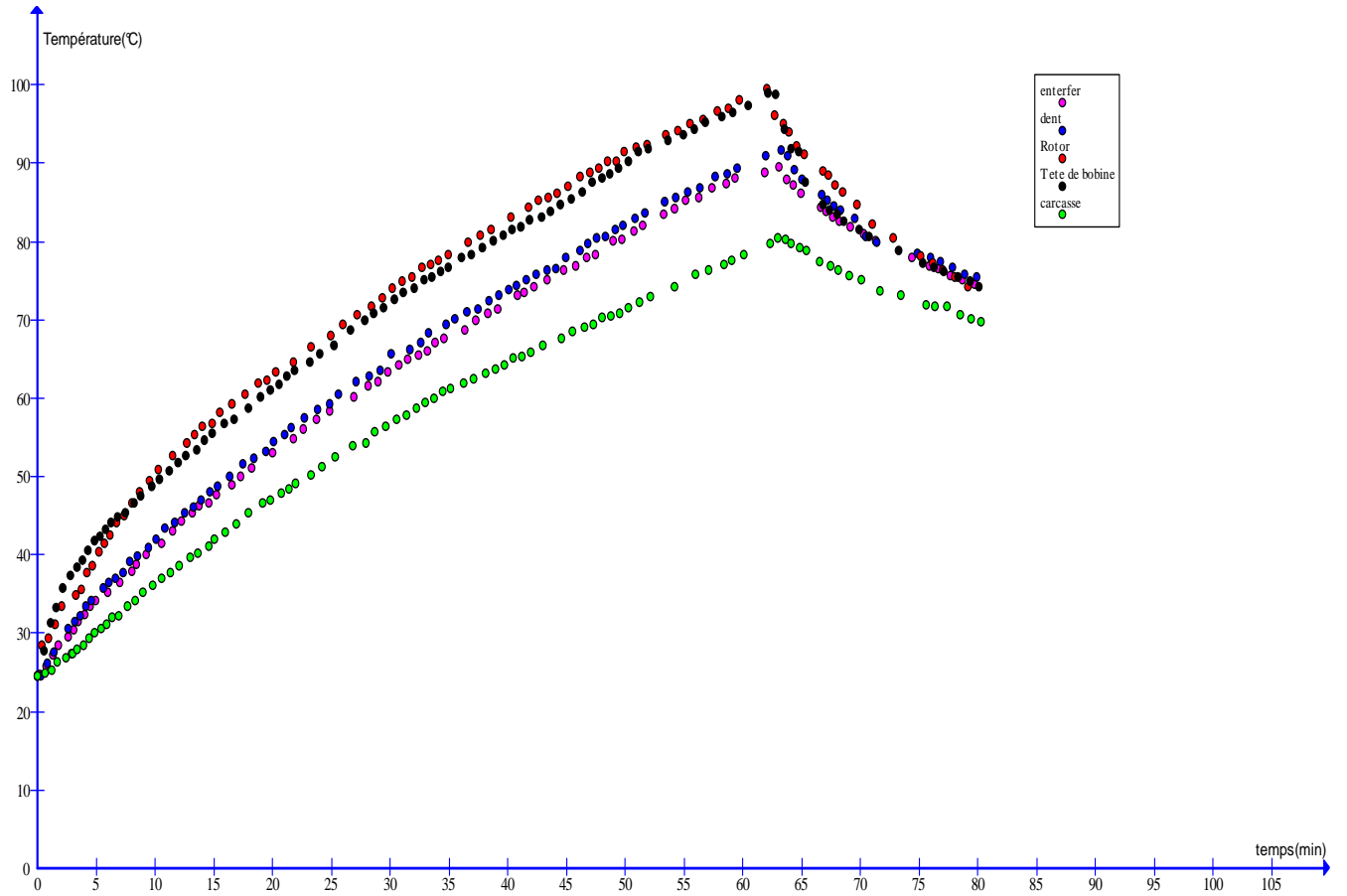


Fig. IV.4: schéma du montage de l'essai à vide.

La figure suivante illustre l'évolution de température de l'essai effectué



Courbe. IV.1 : l'essai à vide sans ventilation alimentation sinusoïdale.

$T_{ai}=24.5^{\circ}\text{C}$

$T_{ai}=25^{\circ}$

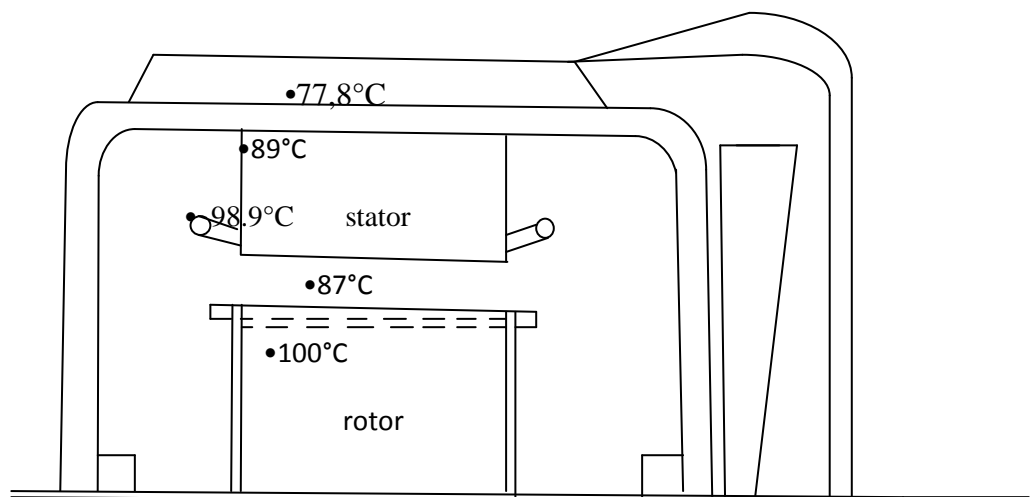


Fig. IV.5 : Emplacement des thermocouples et indications des températures de l'essai à vide sans ventilation, en régime établi.

La température ambiante au début de l'essai est de (24.5°C), et la fin elle atteint (25°C). La différence de température entre le thermocouple(Th4) le plus chaud placé sur rotor et le thermocouple le moins chaud (Th8) placé sur la carcasse est de (22.2°C).

Et la différence de température entre le point le plus chaud (Th4) le rotor et l'air ambiant est de (75.25°C). Les courbes d'échauffements obtenues par cet essai forment trois catégories :

La première est formée par les courbes des thermocouples (Th4) placé sur le rotor et le thermocouple (Th5) placé sur la tête de la bobine côté non ventilé, ils enregistrent les températures les plus élevées car sont les plus proches de la source de chaleur.

La deuxième catégorie est formée par les thermocouples (Th3) et (Th2) situé respectivement aux niveaux de l'entrefer et la dent, la température enregistrée est intermédiaire.

La troisième est formée par le thermocouple (Th8) placé sur la carcasse qui est la zone la moins chaude.

Pour le refroidissement on remarque une chute de température de (3.8°C) au niveau du rotor et de tête de bobine, et pour la dent et l'entrefer le refroidissement ce fait doucement de (1.2°C). Pour la carcasse, lors de l'arrêt du moteur, la température augmente après un moment puis elle commence à diminuer jusqu'à atteindre la température ambiante.

Courant de ligne (I)	Tension entre phase (U)	Puissance absorbée(P)	ΔT
3.71(A)	378(V)	320(W)	75.3°C

Tableau. IV.1 : différentes mesures des grandeurs de l'essai à vide sans ventilation.

IV-7-2-Essai à vide sans ventilation avec onduleur :

Dans cet essai nous avons alimenté le moteur avec ses paramètres nominaux avec un onduleur pour faire varier la fréquence du moteur avec le schéma du montage est présenté par la figure suivante :

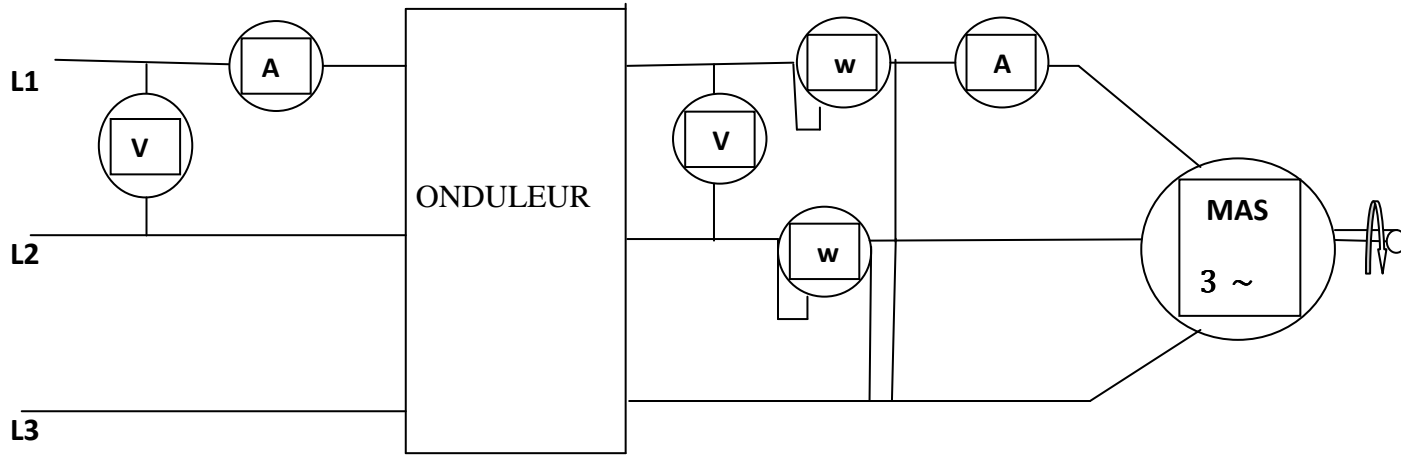
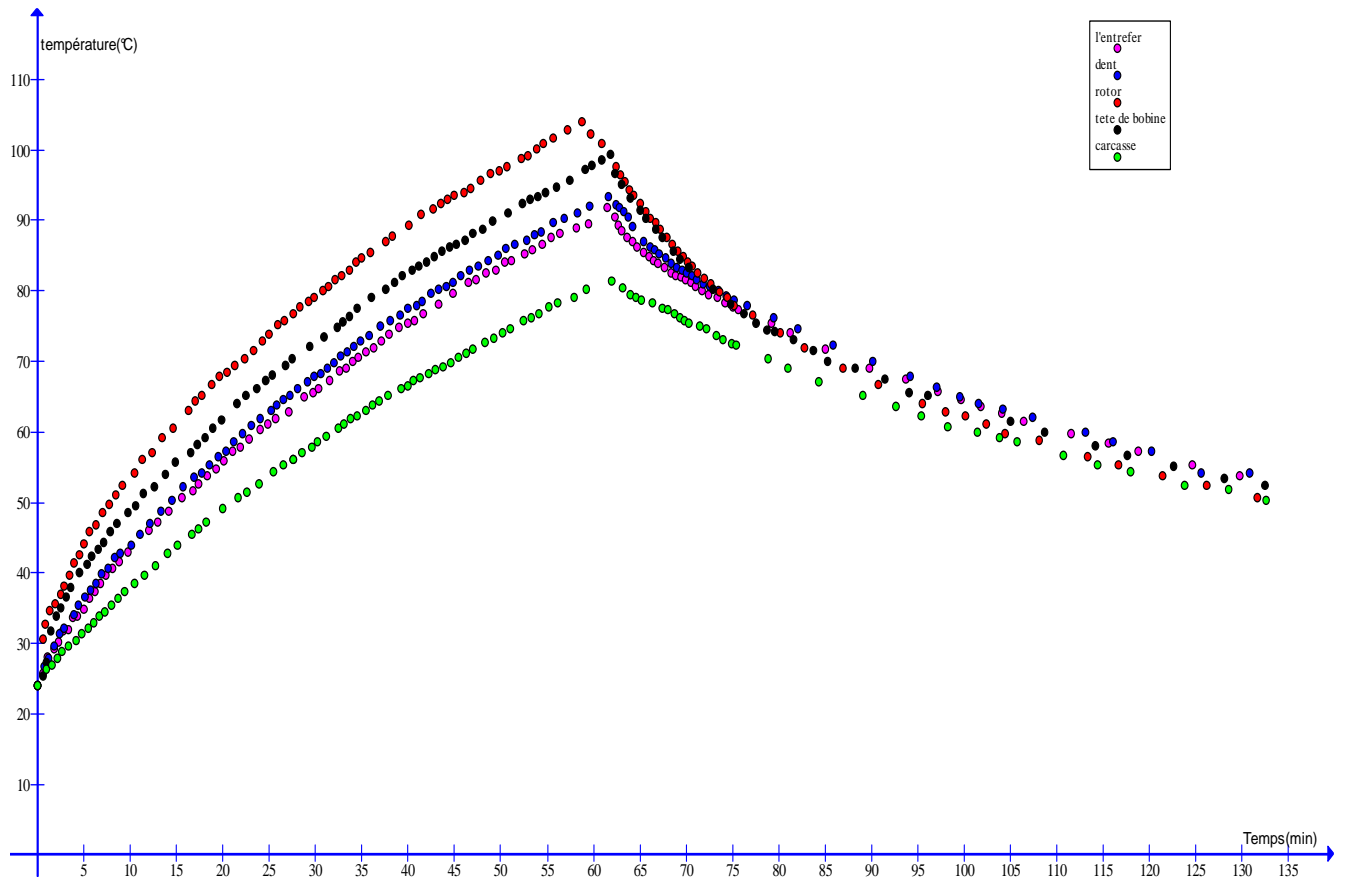


Fig. IV.6: schéma du montage de l'essai à vide avec onduleur.



Courbe.IV.2 :l'échauffement et le refroidissement du moteur de l'essai à vide sans ventilation avec onduleur.

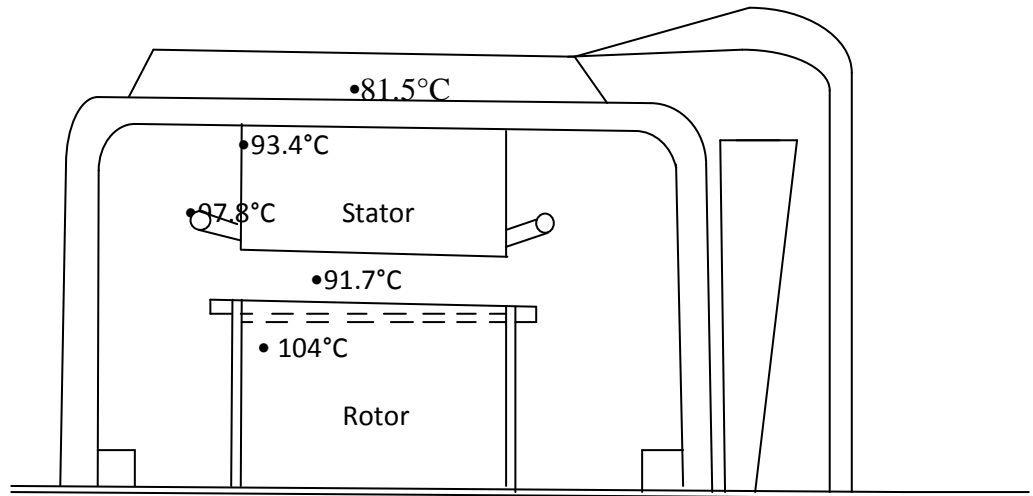
$T_{ai} = 24^{\circ}\text{C}$
 $T_{af} = 25^{\circ}\text{C}$


Fig. IV.7: Emplacement des thermocouples et indications des températures de l'essai à vide sans ventilation avec onduleur, en régime établi.

La température au début de l'essai est (24°C), elle atteint (25°C) vers la fin.

Nous avons constaté que les températures dans les différentes parties de la machine sont légèrement supérieures à celles obtenues lors de l'essai à vide sans ventilation et sans onduleur.

La différence de température entre le thermocouple le plus chaud placé au rotor (Th4) et le moins chaud qui se trouve sur la carcasse (Th8) est de (22.5°C). Et la différence de température entre le rotor (Th4) du thermocouple le plus chaud et l'air ambiant est de (79.5°C).

D'après les courbes obtenues nous avons constatés que les températures les moins chaudes se trouvent au niveau de la carcasse (Th8), car c'est la plus loin de la source de chaleur.

En second on trouve les thermocouples (Th2), (Th3) qui se situent respectivement sur la dent et l'entrefer qui sont des températures intermédiaires.

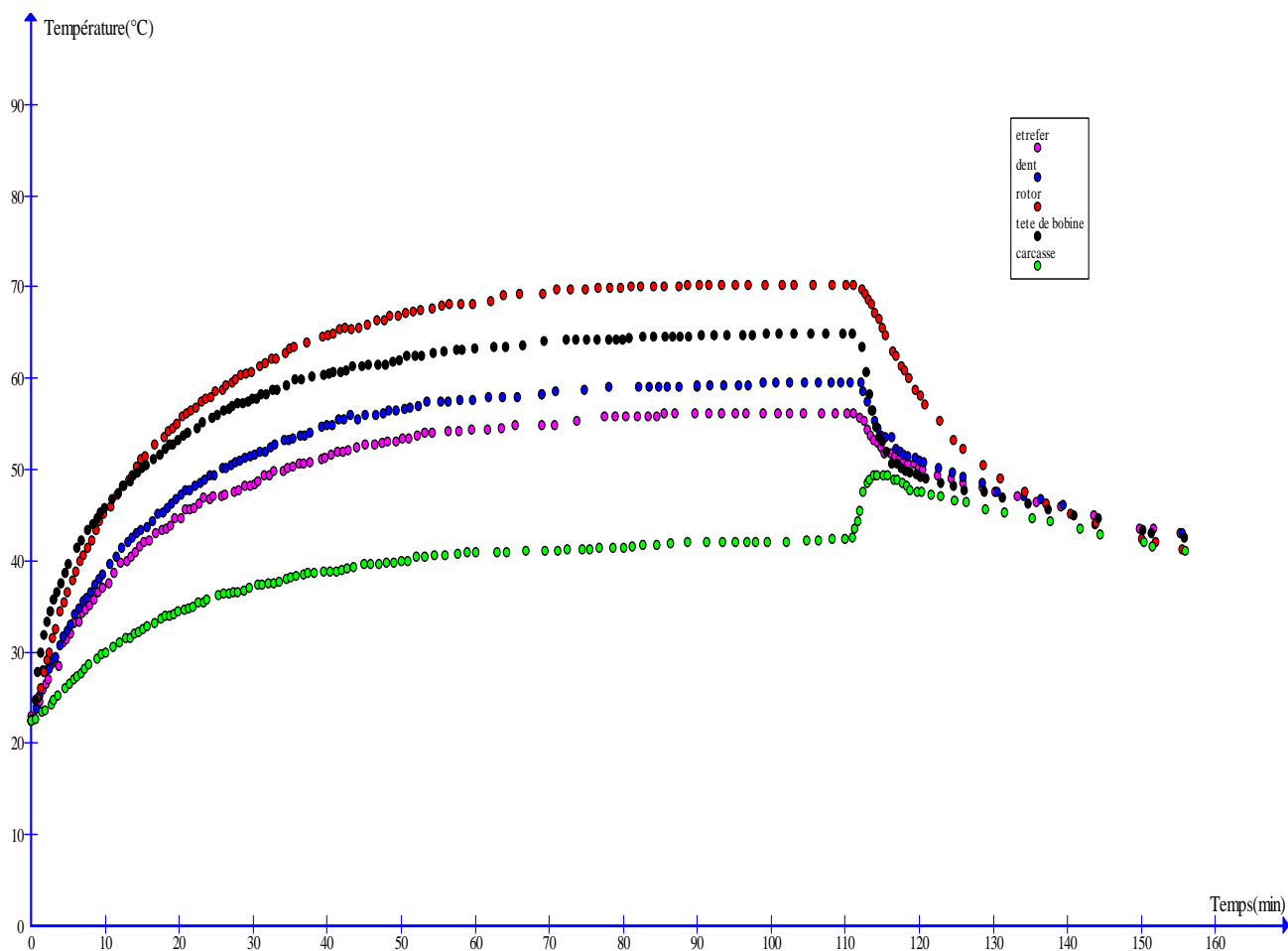
Et pour les thermocouples les plus proches de la source de chaleur (du rotor et la tête de bobine) donnent des températures élevées par rapport aux autres capteurs placés dans les autres endroits de la machine.

Le courant de ligne à l'entrée de l'onduleur (I ₁)	Le courant de ligne à la sortie de l'onduleur (I ₂)	La tension entre phase à l'entrée de l'onduleur (U ₁)	La tension entre phase à la sortie de l'onduleur (U ₂)	La puissance absorbée (P)	ΔT
2.1(A)	3.4 (A)	387 (V)	381(V)	440 (W)	80°C

Tableau. IV.2 : différentes grandeurs de mesure de l'essai à vide sans ventilation avec onduleur.

VI-7-3 : Essai à vide avec ventilation et sans onduleur :

La figure suivante illustre l'évolution de la température de l'essai effectué :



Courbe. IV.3 : courbe d'échauffement et de refroidissement lors de l'essai à vide avec ventilation et sans onduleur.

$$T_{ai} = 23.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{af} = 24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

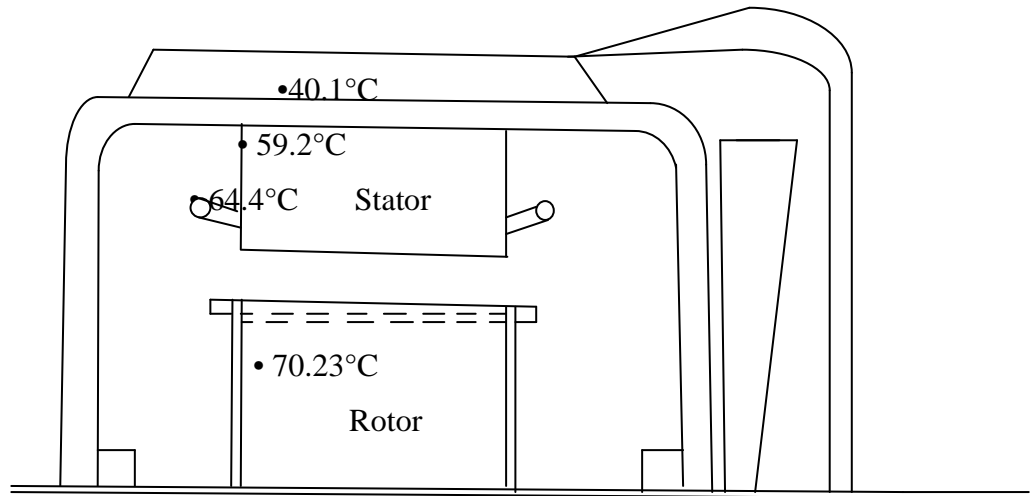


Fig. IV.8 : Emplacement des thermocouples et indications des températures de l'essai à vide avec ventilation, en régime établi.

Lors de l'échauffement :

- le rotor (TH4) est le plus chaud, puis la tête de bobine côté non ventilé (TH5) car ils enregistrent des températures plus importantes.

- ensuite, la dent statorique (TH2), puis l'entrefer (TH3) il s'agit des températures intermédiaires.

- en dernier, la carcasse (TH8) qui se situe dans la zone la moins chaude.

Dans cet essai d'échauffement on a l'augmentation de la température dans toutes les courbes (les courbes de variation de la température en fonction du temps) jusqu'à atteindre le régime permanent, et le classement de ces courbes dépend de l'emplacement des capteurs par rapport à la source de chaleur. Le rotor et la tête de la bobine coté non ventilé qui sont les plus chaud, représentent les sources de chaleur. Ensuite, la dent et l'entrefer qui sont un peu loin et en dernier vient la carcasse qui est loin de la source de chaleur donc la moins chaude.

A l'arrêt du moteur on remarque une chute directe de toutes les courbes, sauf, la carcasse car au bout de (104.2mn) du fonctionnement du moteur le (TH8) atteint (42.6°C), mais juste à l'arrêt on remarque une augmentation d'environ (2.5°C), après la courbe de la carcasse commence à chuter progressivement jusqu'à atteindre la valeur de la température ambiante.

On a la température ambiante au début de l'essai est de (22,5°C) et à la fin atteint (23°C). La différence de température en régime établi entre le thermocouple (TH4) le plus chaud et le

(TH8) le moins chaud est de (30°C), on a une différence de (46.48°C) entre la zone plus chaude (TH4) et l'air ambiant.

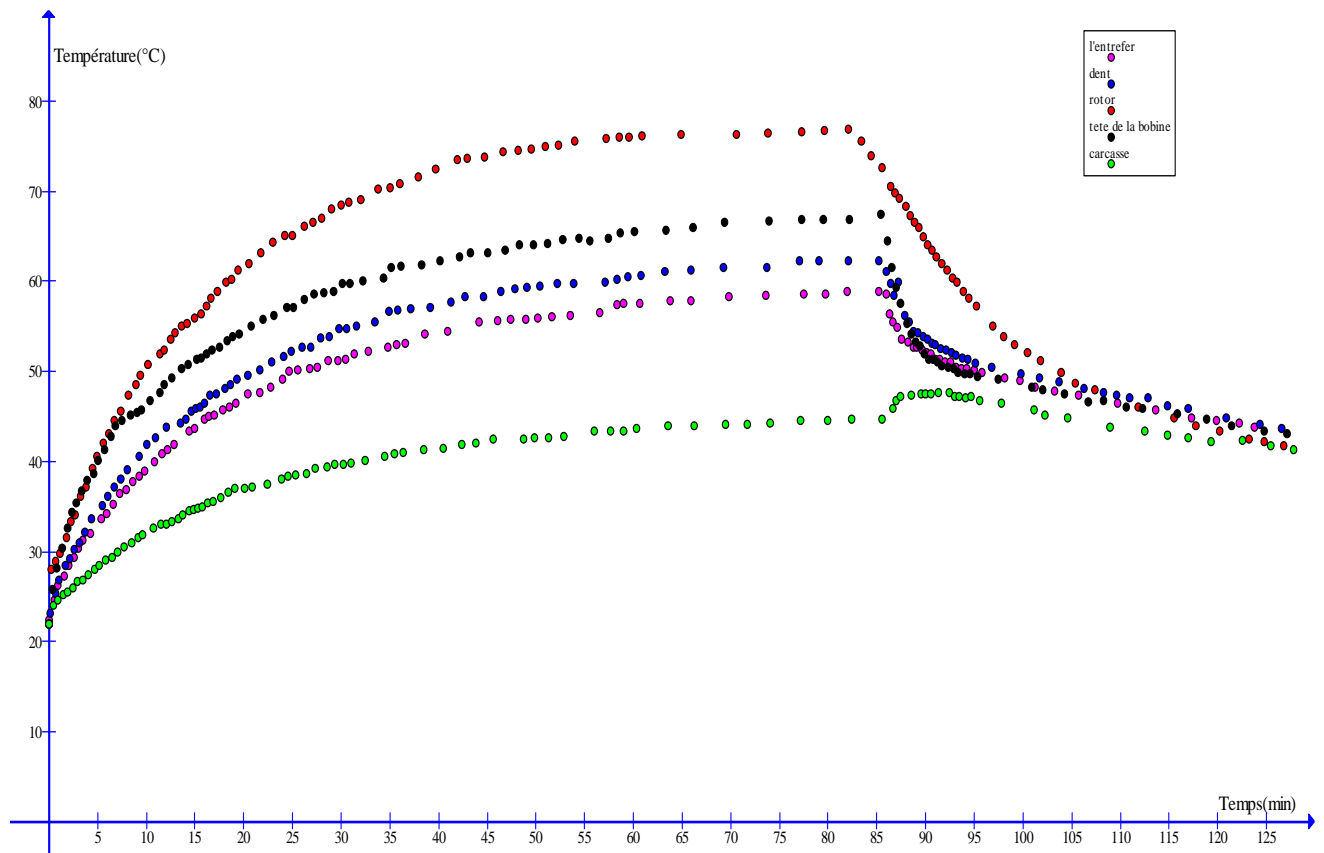
On a remarqué que la courbe de temps d'échauffement de l'enroulement au niveau des têtes de bobines, plus faible par rapport aux autres points relevés. Comme le rotor chauffe plus que les têtes, une intersection des courbes respectives se produit après (12.3mn) d'échauffement.

Courant de ligne(I)	Tension entre phase(U)	La puissance absorbée(W)	ΔT
3.50 A	387 V	310 W	46.1°C

Tableau-IV-3. Différentes mesures des grandeurs de l'essai à vide avec ventilation sans onduleur.

IV-7-4 : Essai à vide avec ventilation et onduleur :

La figure suivante illustre le changement de Température en fonction de Temps :



Courbe. IV.4 : Courbe d'échauffement et de refroidissement de la MAS lors de l'essai à vide avec ventilation avec onduleur.

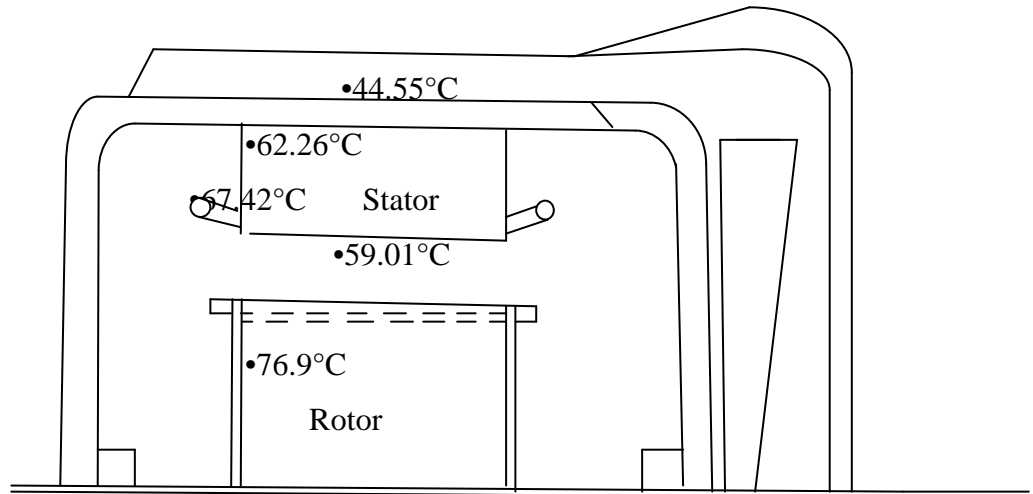
$T_{ai} = 22\text{ °C}$ $T_{af} = 23\text{ °C}$ 

Fig. IV.9 : Emplacement des thermocouples et indications des températures de l'essai à vide avec ventilation et onduleur, en régime établi.

Les courbes d'échauffement suivent la même allure et forment trois catégories, la plus chaude formée par les courbes (TH4) et (TH5), celle de la température intermédiaire est formée par les courbes de (TH2) et (TH3), et les moins chaudes est formé par la courbe (TH8).

Le refroidissement se fait doucement et naturellement, on remarque que certains thermocouples comme la carcasse (TH8) augmente un peu puis après un certains temps elle diminue jusqu'à avoir la même valeur dans tous les thermocouples, puis baisse jusqu'à atteindre la température ambiante.

La Température ambiante au début de cet essai est de (22°C) et elle est à (23°C) à la fin de l'essai.

La différence de Température entre le Thermocouple(TH4) le plus Chaud et le(TH8) le moins chaud est de 30.8°C en régime établi. Et une différence de 51°C entre la zone la plus chaude (TH4) et l'air ambiant.

On à l'intersection des deux courbes de (TH4) et (TH5) qui se fait au bout de 13min c'est l'équilibre thermique entre le rotor et la tête de bobine coté non ventilé.

Courant d'entrée I1 (A)	Tension d'entrée U1(V)	Courant de ligne(A)	Tension entre phase(V)	Puissance absorbée (W)	ΔT
1.9 A	387 V	3.4 A	384 A	310 W	43.9°C

Tableau IV.4 : tableau représentant les grandeurs mesurées à la fin de l'essai.

IV-7-5-Essai en charge avec une alimentation sinusoïdale :

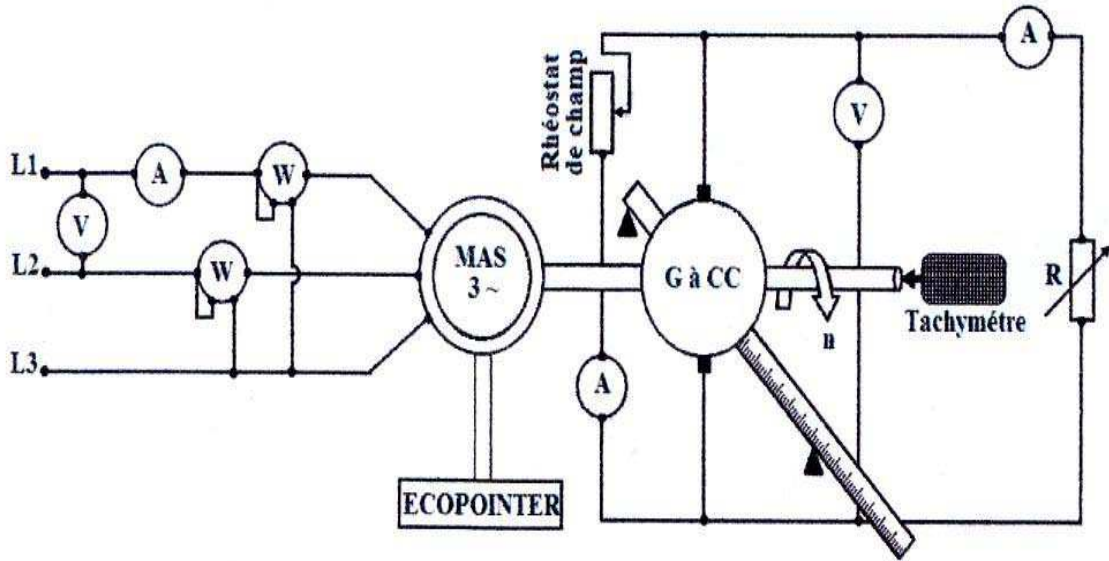
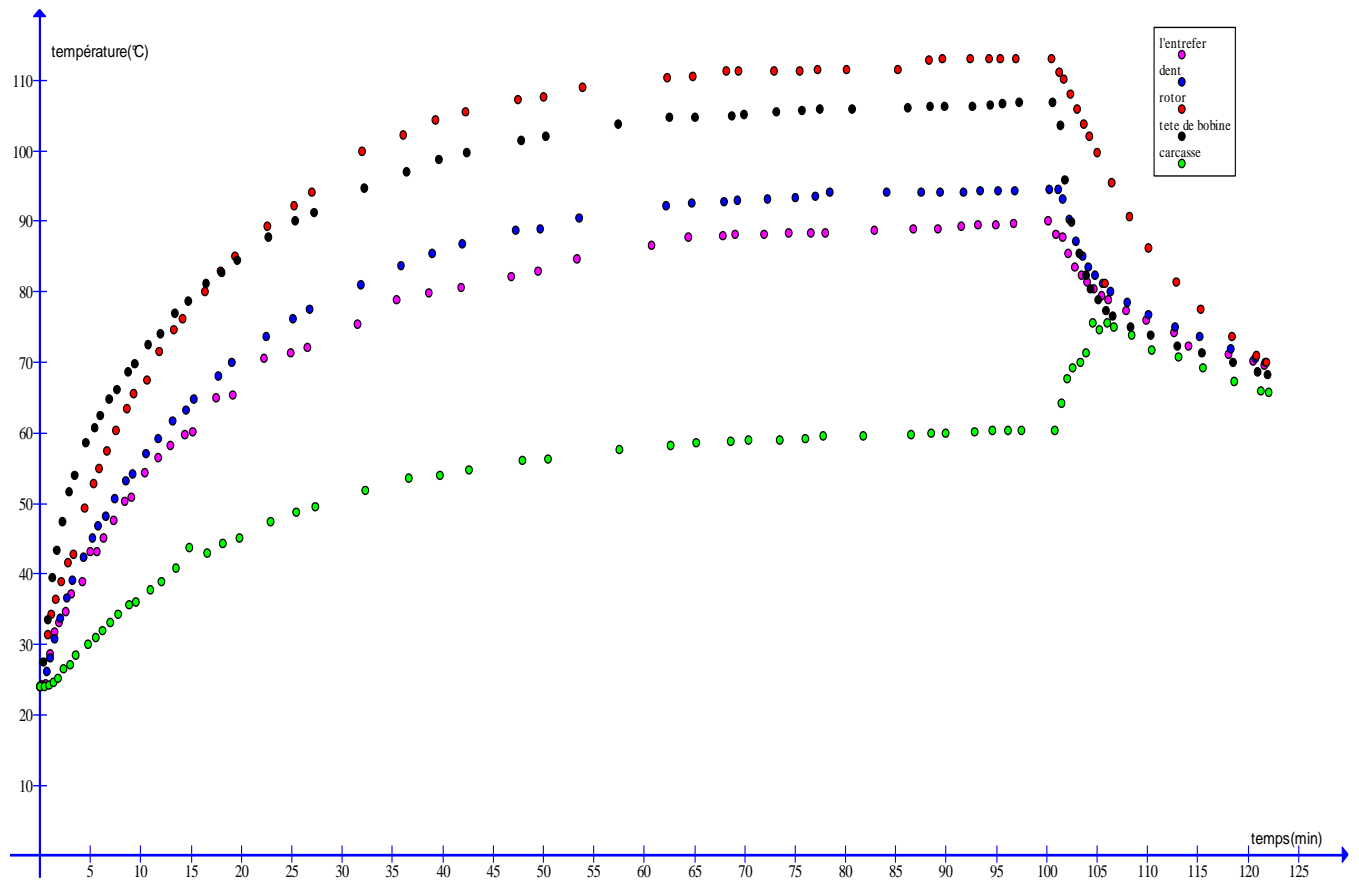


Fig. IV.6.10 : Schéma du montage de l'essai en charge.

Courbes obtenus a partir de cet essai est la suivante :



Courbe.IV.5 : Courbe d'échauffement et de refroidissement de la MAS lors de l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale.

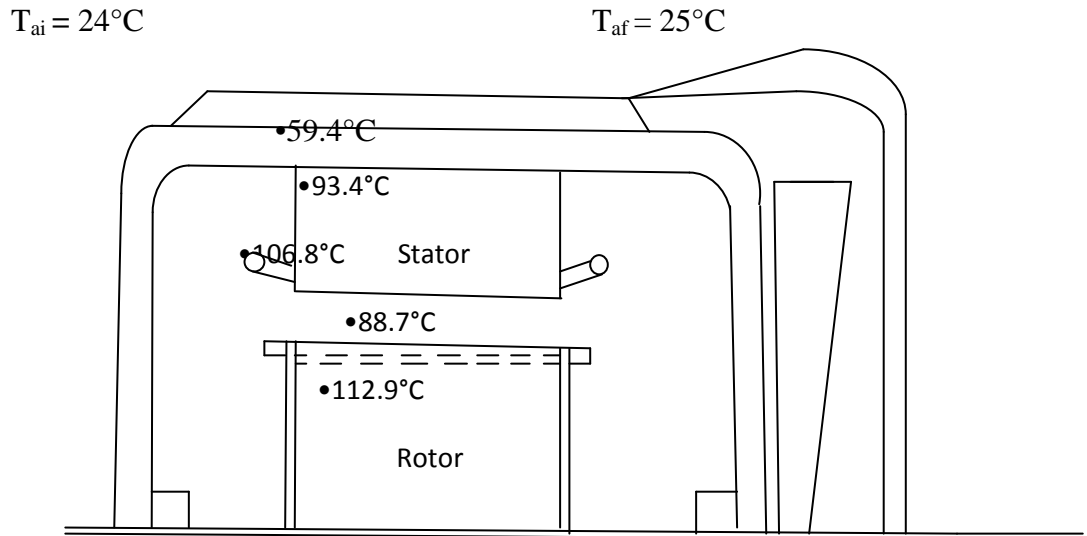


Fig. IV.11: Emplacement des thermocouples et indications des températures lors de l'essai en charge, en régime établi.

À partir de l'essai en charge on a constaté que l'échauffement dans les différentes parties du moteur est réparti en trois zones :

- La zone la plus chaude, est la plus près de la source de chaleur.
- La zone des températures intermédiaires.
- la zone la moins chaude.

Pour les capteurs qui indiquent des températures les plus chaudes se trouvent au niveau du rotor et sur la tête de la bobine côté non ventilé, au démarrage la température sur la tête de la bobine est supérieure par rapport à celle du rotor. Au bout de (18mn) l'équilibre thermique est atteint dans les deux parties, après cet instant c'est le rotor qui chauffe le plus jusqu'à atteindre (113°C) en régime permanent.

Et pour les capteurs (Th2) et (Th3) qui se situent sur la dent et au niveau de l'entrefer indiquent des températures inférieures à celles mesurée dans les parties les plus proches de la source de chaleur.

Et pour terminer le thermocouple qui indique la température la moins chaude est celui de la carcasse (TH8).

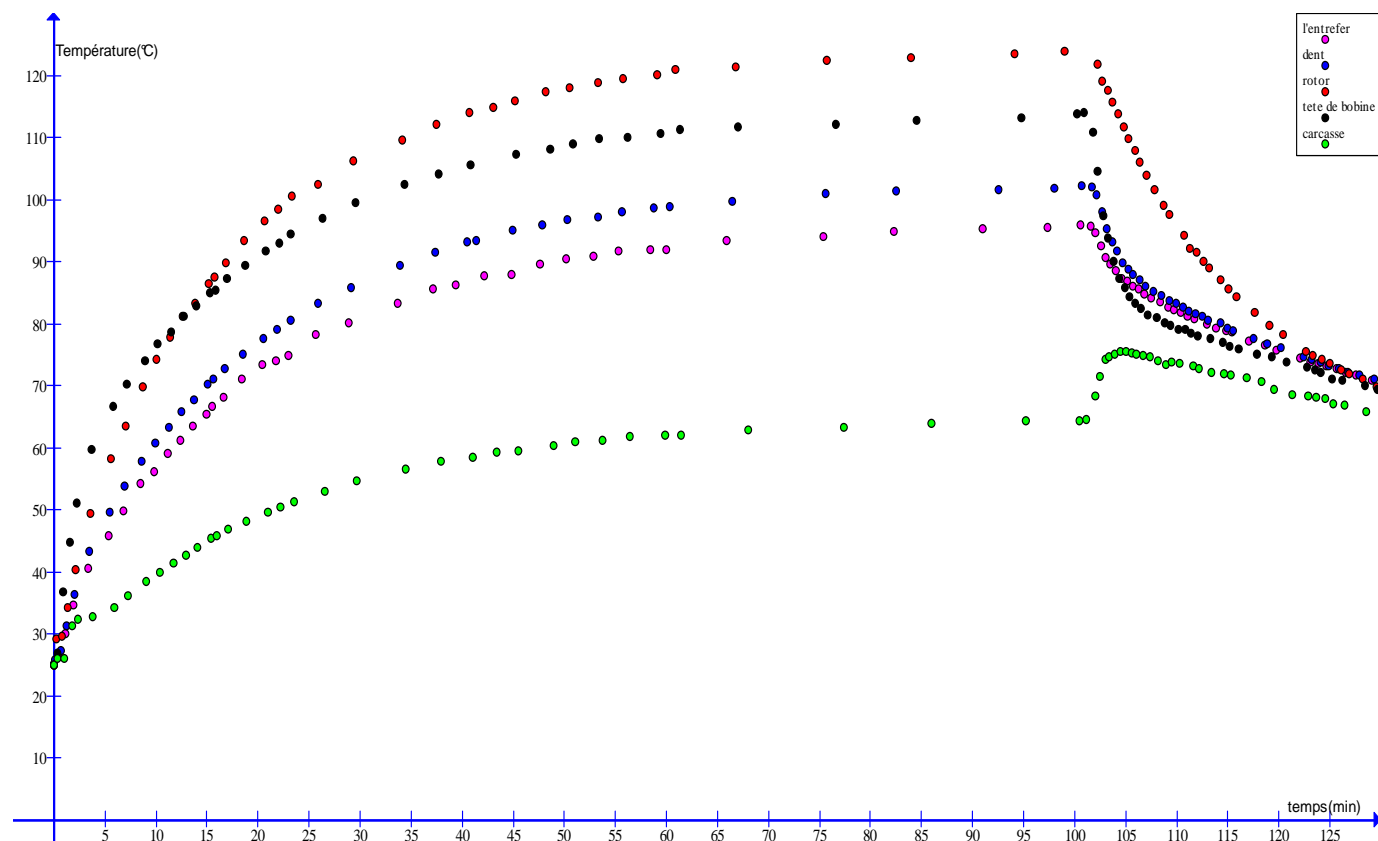
Pour le refroidissement nous avons constaté que juste à l'arrêt du moteur la température chute doucement et naturellement au niveau de toutes les parties du moteur, sauf, au niveau de la carcasse ou la température augmente pendant un certain temps puis elle baisse jusqu'à atteindre la température ambiante.

La différence de température entre le thermocouple le plus chaud placé au niveau du rotor (TH4) et le moins chaud placé sur la carcasse (TH8) est de (53.5°C). La différence de température entre le rotor et l'air ambiant est de (88.4 °C).

Courant de ligne (I)	Tension de phase (U)	Puissance absorbée (P)	Vitesse de rotation (N)	ΔT
5.3 (A)	390 (V)	2600 (W)	1410 (trs/mn)	89°C

Tableau. IV.5 : Tableau des différentes grandeurs de mesure lors de l'essai en charge.

VI-7-6-Essai en charge avec onduleur :



Courbe. IV.6 : L'échauffement et refroidissement du moteur lors de l'essai en charge avec onduleur.

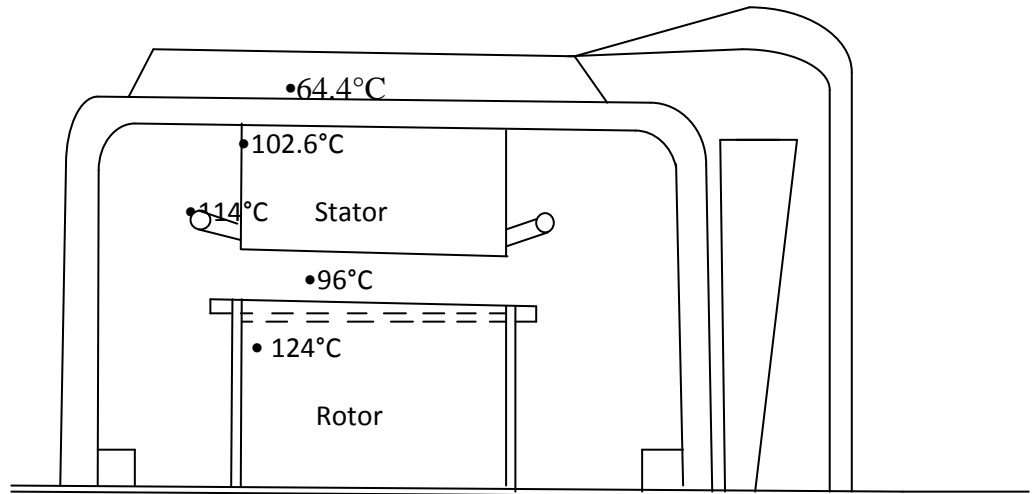
$T_{ai} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{af} = 27^{\circ}\text{C}$ 

Fig. IV.12: Emplacement des thermocouples et indications des températures lors de l'essai en charge avec onduleur, en régime établi.

Dans cette figure nous avons présenté l'évolution de température dans le moteur lors de l'essai en charge avec onduleur, nous avons constaté que la température au niveau du rotor (Th_4) est très importante elle dépasse la température mesurée avec le même essai sans onduleur de (11°C). Comme nous avons constaté un dépassement de température du rotor sur la tête de la bobine côté non ventilé au bout de (13mn).

La température la plus élevée au niveau du stator c'est celle de la tête de la bobine coté non ventilé (Th_5) puis celle qui se trouve au niveau de la dent (Th_2).

Comme nous avons enregistré des températures importantes au niveau de l'entrefer (Th_3) mais le thermocouple qui indique la température la moins chaude est le (Th_8) placé sur la carcasse

A l'arrêt du moteur nous enregistrons des diminutions de températures au niveau de tous les capteurs, sauf, sur la carcasse ou la température augmente un certain temps puis diminue jusqu'à atteindre la température ambiante.

Courant de ligne (I)	Tension de phase (U)	La puissance absorbée (P)	La vitesse de rotation (N)	ΔT
5.2 (A)	318 (V)	2920 (W)	1498 (trs/mn)	98 °C

Tableau .IV.6 : Tableau des différentes grandeurs de mesure lors de l'essai en charge avec onduleur.

Nous avons remarqué qu'il y a des points en commun entre les résultats obtenus. Le thermocouple le plus chaud c'est celui du rotor (TH3) puis la tête de la bobine coté non ventilé (Th5). Le thermocouple le moins chaud est celui placé sur la carcasse (Th8). A l'arrêt du moteur, la température diminue dans toutes les parties ou on a placé les thermocouples sauf, sur la carcasse ou la température augmente après un certain temps puis elle diminue.

IV-8-Interprétations des courbes :

Les courbes d'échauffements que nous avons relevées indiquent que la quantité d'énergie thermique dissipée depuis la surface d'une partie donnée de la machine augmente avec la surélévation de la température.

Le phénomène d'échauffement augmente rapidement au début après un certain temps il commence à ralentir progressivement, ensuite il se stabilise ce qui veut dire que le régime permanent est atteint.

A partir des essais effectués nous avons constaté que le régime permanent est atteint plus rapidement avec ventilation que sans ventilation car dans l'essai avec ventilation le R.P.est atteint à peu près au bout de (50mn) et sans ventilation au bout de (63mn). Ce qui montre que la ventilation accélère les transferts thermiques et limite ainsi l'élévation des températures à des valeurs admissibles.

La présence de la ventilation a pour effet d'augmenter la puissance massique de la machine.

Lors de l'essai à vide sans ventilation sans onduleur on constate que la température moyenne enregistré à partir des thermocouples est de (92.7°C) et pour ceux de l'essai à vide sans ventilation avec onduleur cette température atteint (93.66°C). Donc une augmentation de température implique une augmentation des pertes et cette différence est due à la présence de pertes causées par les harmoniques. Présence de l'onduleur ou de variateur de vitesse dans les

machines électriques ne délivrent pas des tensions parfaitement sinusoïdales, ou continues introduit des harmoniques qui entraînent des modifications de la répartition et du degré d'échauffement des machines électriques alimentés par ce dernier.

Lors de l'essai à vide sans ventilation et sans onduleur la température moyenne est de (92.7°C) et celle de l'essai à vide avec ventilation sans onduleur elle est de (58°C), une différence de (34.64°C) et cela explique l'intérêt du ventilateur dans le transfert de chaleur et le refroidissement de la machine ainsi que la diminution des pertes.

Dans l'essai à vide avec ventilation et onduleur le régime permanent est atteint après 54mn de fonctionnement, et l'essai à vide avec ventilation sans onduleur son régime permanent est atteint au bout de (69mn).

Dans l'essai à vide sans ventilation avec onduleur son régime permanent est atteint au bout de (58mn), et le régime permanent dans l'essai à vide sans ventilation sans onduleur après (62mn) de fonctionnement.

A partir des résultats obtenus nous constatons que l'utilisation de l'onduleur permet d'atteindre le régime permanent rapidement.

Donc si on veut atteindre le régime permanent dans les autres essais sans onduleur il faudra plus de temps.

Au niveau du stator la température la plus élevée est celle enregistrées par thermocouple (TH5) placé dans sur la tête de la bobine, cela peut être expliqué par les pertes Joules qui occupent la majorité des pertes globales dans le stator de la machine asynchrone.

A l'arrêt les courbes de tous les essais commencent à chuter, sauf au niveau de la carcasse (TH8) où la température augmente un certain temps puis diminue. Ce qui peut être expliqué par le fait que la différence de la température, est assez importante entre les parties internes les plus chaudes et les parties externes les moins chaudes, provoque ainsi, un transfert de chaleur vers le milieu ambiant, une partie de cette chaleur est absorbée d'abord par la carcasse, avant d'être dissipée à son tour dans milieu ambiant.

Remarque :

Nous avons représenté les différents résultats expérimentaux qui permettent d'étudier l'échauffement dans la machine asynchrone à cage et de donner une image de la répartition de la température dans ces différentes parties.

La distribution de la température met en évidence le rôle de la ventilation dans le refroidissement du moteur.

Donc la partie la plus chaude est le rotor puis la tête de bobine coté non ventilé à cause des pertes joule qui occupent la majorité des pertes dans la machine, la partie la moins chaude est la carcasse car elle est en contact direct et permanent avec l'air ambiant et loin des sources de chaleur.

Les pertes apparaissent sous forme de chaleur dans le moteur auxquelles dépend l'échauffement, l'augmentation de ces pertes engendre une élévation de la température qui n'est pas proportionnelle à cette énergie thermique car il y a le système de refroidissement à l'intérieur de la machine comme un autre facteur principal pour son bon fonctionnement.

La ventilation joue un rôle très important dans le refroidissement de la machine, mais cela est insuffisant pour certains régimes de fonctionnement qui sont au-delà de son régime nominal. Son rôle principal est d'accélérer l'échange thermique avec l'air ambiant ce qui refroidit plus vite la machine.

IV-9-La modélisation thermique du moteur étudiée avec la méthode d'analyse nodale :

La modélisation que nous proposons est basée sur la méthode d'analyse nodale des phénomènes thermiques. Son principe nodale utilise l'analogie entre les résistances (ou conductance) et les capacités électriques et thermiques. Nous rappelons sur ce tableau IV.10 cette analogie thermoélectrique.

Nous pouvons donc utiliser, comme pour les circuits électriques, les lois de kirchoff pour analyser le schéma équivalent thermique. [3]

Grandeurs thermiques	Grandeurs électriques
Puissance calorifique	Courant
Température	Tension
Conductance thermique	Conductance électrique
Capacité calorifique	Capacité électrique

Tableau IV.10 : Analogies entre les grandeurs électriques et thermiques.

IV-10- Modèle thermique du moteur étudié :

La structure de la machine étudiée est inspirée des travaux de [G.jiménez-moreno, J. Roger_ folch]. Et de [Pcarrion-pérez]. La machine est décomposée en cinq blocs homogènes. La température ambiante sert de référence. Les différentes parties que constitue ce modèle ainsi que le transfert de chaleur entre chaque bloc sont comme suit, **fig. IV.13**

-1-Rotor

-2-enroulement dans l'encoche statorique

-3-fer statorique

-4-tête de bobine statorique coté ventilé

-5-tête de bobine statorique coté non ventilé

La structure de la machine étudiée est la suivante :

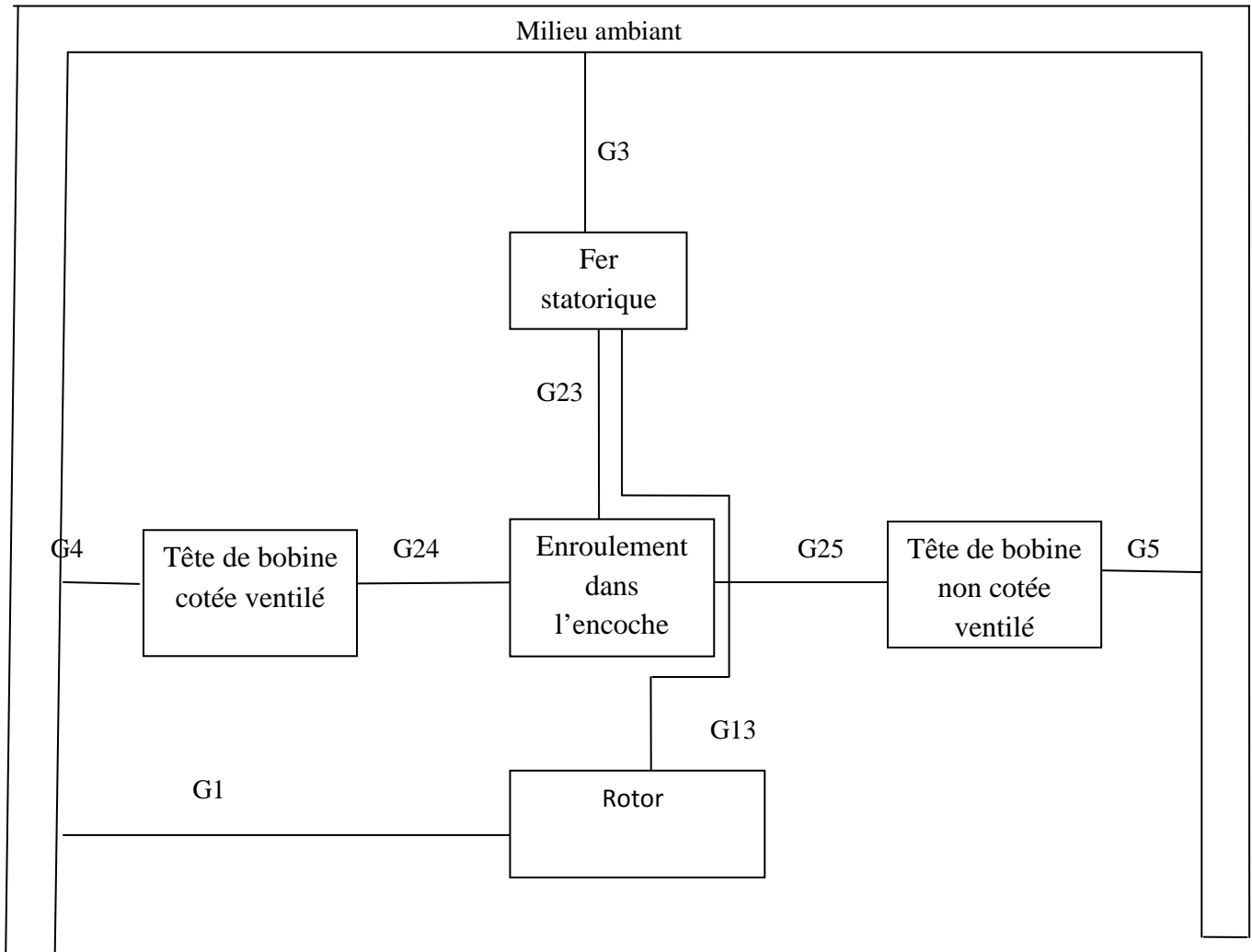


Fig. IV.13 : Schéma simplifié du modèle thermique étudié.

Le modèle thermique présenté nécessite certaines clarifications :

- Toute la chaleur générée au rotor considéré homogène est transférée vers le fer statorique, ce qui explique l'absence de connexion entre le rotor et les enroulements statorique via l'entrefer. Ceci est dû à la mauvaise conductivité radiale de l'encoche d'une part et à la faible surface d'échange qu'offre l'ouverture de l'encoche statorique d'autre part.

- Il n'y a pas de conductance thermique qui modélise l'encoche statorique car elle n'est pas en contact direct avec le milieu ambiant, son effet est pris en compte par les conductances des têtes de bobines.

Soit un réseau thermique comprenant n nœuds .si l'on considère que l'échange de chaleur entre deux éléments quelconques est proportionnel à la différence de température entre eux, à tout instant l'équation du bilan thermique s'écrit pour le nœud i ainsi :

$$G_i \theta_i + G_{ij} (\theta_i - \theta_j) + \dots \dots \dots G_{in} (\theta_i - \theta_n) + C_i \frac{d\theta_i}{dt} = P_i \quad (IV.1)$$

$\theta_i, \dots \dots \dots \theta_n$: surélévation de la température de l'élément i.....n par apport à la température du milieu ambiant [°C]

G_i : conductance thermique de connexion entre les éléments i et j [w/m°C]

C_i : la capacité thermique de l'élément i [j/°C]

P_i : chaleur par unité de temps (pertes) générer dans l'élément

En régime permanent thermique :

$$G_i \theta_i + G_{ij} (\theta_i - \theta_j) + \dots \dots \dots G_{in} (\theta_i - \theta_n) = P_i \quad (IV.2)$$

IV-11-Détermination des conductances thermiques du modèle :

Pour déterminer les conductances thermiques du modèle présenté sur la fig. IV.13 nous avons résolu le système d'équations algébriques en régime permanent présentés comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 \theta_1 + G_{13} (\theta_1 - \theta_3) = P_1 \\ G_{23} (\theta_2 - \theta_3) + G_{24} (\theta_2 - \theta_4) + G_{25} (\theta_2 - \theta_5) = P_2 \\ G_{13} (\theta_3 - \theta_1) + G_{23} (\theta_3 - \theta_2) + G_3 \theta_3 = P_3 \\ G_{24} (\theta_4 - \theta_2) + G_4 \theta_4 = P_4 \\ G_{25} (\theta_5 - \theta_2) + G_5 \theta_5 = P_5 \end{array} \right. \quad (IV.3)$$

Nous avons remarqué que le nombre d'équations est de cinq (une équation par bloc), alors que le nombre de conductances inconnues est de huit. Trois équations supplémentaires sont nécessaires pour que le système (IV.3) soit inversible. Cependant

nous avons calculé la conductance G_{13} en supposant que le transfert de chaleur dans l'entrefer était purement conductif.

A partir des dimensions géométriques de la machine [annexe II] et des caractéristiques thermo physiques de l'air [annexe I-5], G_{13} est calculé comme suit :

$$G_{13} = \frac{\lambda_{\text{moy}} \cdot S_{\text{moy}}}{e} = 1.83 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Avec: $\lambda_{\text{air}} = 0.03 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

$S_{\text{moy}} = 0.0305 \text{ m}^2$, surface moyenne de l'entrefer (forme cylindrique)

$e = 0.25 \text{ mm}$, largeur de l'entrefer

Donc pour déterminer les autres conductances, on a G_1 pour n'importe quel essai d'échauffement et à partir de la première équation du système (IV.3), on obtient :

$$G_1 = \frac{P_1 - G_{13}(\theta_1 - \theta_3)}{\theta_1} = \frac{122.14 - 1.83 \cdot 38.65}{89.65} = 0.55 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Les six conductances restantes sont identifiées par deux essais d'échauffements (à vide et en charge) on exploitants les résultats des températures trouvés par les essais expérimentaux en régime permanent et les pertes calculés en charge et à vide. Annexe [I-2]

Valeurs des températures exploités en charge et à vide :

- **Les températures en charge :**

$$\begin{array}{lll} \theta_1 = 89.65^\circ\text{C} & \theta_2 = 74.43^\circ\text{C} & \theta_3 = 50^\circ\text{C} \\ \theta_4 = 68.93^\circ\text{C} & \theta_5 = 75.85^\circ\text{C} & \end{array}$$

- **Les températures à vide :**

$$\theta_2 = 37.7^\circ\text{C} \qquad \theta_4 = 35.87^\circ\text{C} \qquad \theta_5 = 40.23^\circ\text{C}$$

$$\begin{pmatrix}
 \theta_2 - \theta_3 & \theta_2 - \theta_4 & \theta_2 - \theta_5 & 0 & 0 & 0 \\
 \theta_3 - \theta_2 & 0 & 0 & \theta_3 & 0 & 0 \\
 0 & \theta_4 - \theta_2 & 0 & 0 & \theta_4 & 0 \\
 0 & 0 & \theta_5 - \theta_2 & 0 & 0 & \theta_5 \\
 0 & \theta_4 - \theta_2 & 0 & 0 & \theta_4 & 0 \\
 0 & 0 & \theta_5 - \theta_2 & 0 & 0 & \theta_5
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 G_{23} \\
 G_{24} \\
 G_{25} \\
 G_3 \\
 G_4 \\
 G_5
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 P_2 \\
 P_3 - G_{13}(\theta_3 - \theta_1) \\
 P_4 \\
 P_5 \\
 P_{4\text{vide}} \\
 P_{5\text{vide}}
 \end{pmatrix}
 \quad (\text{IV.4})$$

Après avoir résolu le système matricielle (IV.4) nous avons obtenus les résultats suivants :

$$\begin{aligned}
 G_1 &= 0.55 \text{ W/}^\circ\text{C} & G_3 &= 8.0325 \text{ W/}^\circ\text{C} & G_4 &= 1.0475 \text{ W/}^\circ\text{C} & G_5 &= 1.1438 \text{ W/}^\circ\text{C} \\
 G_{13} &= 1.83 \text{ W/}^\circ\text{C} & G_{23} &= 5.9777 \text{ W/}^\circ\text{C} & G_{24} &= -1.8389 \text{ W/}^\circ\text{C} & G_{25} &= -1.8168 \text{ W/}^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

IV-12-Détermination des températures

Après avoir calculé les valeurs des conductances nous les avons exploité pour le calcul des différentes températures on résolvant le système d'équations si dessous (IV.5) :

$$\left\{ \begin{aligned}
 (G_1 + G_{13})\theta_1 - G_{13} \theta_3 &= P_1 \\
 (G_{23} + G_{24} + G_{25}) \theta_2 - G_{23} \theta_3 - G_{24} \theta_4 - G_{25} \theta_5 &= P_2 \\
 -G_{13} \theta_1 - G_{23} \theta_2 + (G_{13} + G_{23} + G_3) \theta_3 &= P_3 \\
 -G_{24} \theta_2 + (G_{24} + G_4) \theta_4 &= P_4 \\
 -G_{25} \theta_2 + (G_{25} + G_5) \theta_5 &= P_5
 \end{aligned} \right. \quad (\text{IV.5})$$

A partir des équations (IV-5) nous avons déduit le modèle matricielle (IV-6)

- Le modèle matricielle :

(IV.6)

$$\begin{pmatrix} G_1+G_{13} & 0 & G_{13} & 0 & 0 \\ 0 & G_{23}+G_{24}+G_{25} & -G_{23} & -G_{24} & -G_{25} \\ -G_{13} & -G_{23} & (G_{13}+G_{23}+G_3) & 0 & 0 \\ 0 & -G_{24} & 0 & (G_{24}+G_4) & 0 \\ 0 & -G_{25} & 0 & 0 & (G_{25}+G_5) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix}$$

IV-13-Les résultants obtenus à partir de l'essai en charge:

$$\theta_1=74.03^\circ\text{C}. \quad \theta_2=73.2484^\circ\text{C}. \quad \theta_3=47.7489^\circ\text{C}.$$

$$\theta_4=66.182^\circ\text{C}. \quad \theta_5=72.75^\circ\text{C}.$$

Température	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Modèle	98.53°C	97.74°C	72.248°C	90.68 °C	97.25°C
expérimental	107.60°C	95.70°C	74.50	103.85°C	105.50C

Tableau .IV.7: comparaison entre les températures simulées et mesurées en charge

Nous avons comparé pour le régime de fonctionnement en charge les valeurs mesurées expérimentalement en régime permanent et celles trouvées par la méthode d'analyse nodale appliquée sur la machine étudiée et nous avons constatés que les températures expérimentales sont élevées par rapport à celles du modèle de quelque degré : ne dépassent pas (9°C) pour le rotor, les têtes de bobines côté ventilé et les têtes de bobines côté non ventilé. Pour les encoches et le fer statorique la différence de température entre les deux essais est de (2°C).

IV-1-14-Les résultats obtenus à partir de l'essai à vide

$\theta_1=53.38^\circ\text{C}.$

$\theta_2=41.48^\circ\text{C}.$

$\theta_3=33.37^\circ\text{C}.$

$\theta_4=44.66^\circ\text{C}.$

$\theta_5=50.44^\circ\text{C}.$

Température	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Modèle	75.88°C	63.98°C	55.87°C	67.16°C	72.94°C
Expérimental	71.20°C	61.80°C	54.10°C	64.90°C	69°C

Tableau IV-8 : comparaison entre les températures simulées et mesurées à vide

Pour les résultats de l'essai à vide la différence de température du modèle et celles mesurées expérimentalement est de (3°C)

Les résultats obtenus à partir de cette méthode sont validés par les mesures effectuées expérimentalement. Les températures enregistrées au niveau du rotor et sur les têtes de bobines cotées ventilé et coté non ventilé sont très importantes et ceci montre la nécessité de refroidir dans les enroulements et sur le rotor car c'est dans ces parties où les pertes sont importantes.

Remarque et observation :

Nous avons présenté dans cette partie un exemple de modélisation thermique par un schéma équivalent basé sur la méthode d'analyse nodale appliqué sur le moteur étudié.

Les paramètres de ce modèle thermique sont pour la plupart, identifiés expérimentalement par les mesures de la température en régime permanent.

Les valeurs des conductances calculés sont acceptables car les résultats obtenus par simulation accordent avec les mesures effectués sur la machine étudiée en effet les erreurs de modélisation ne dépasse pas (9°C).

IV-15- La modélisation thermique du moteur étudié avec le logiciel FEMM

Nous avons modélisé le moteur étudié expérimentalement avec le logiciel FEMM que nous avons exploité pour l'étude thermique (répartition de la température) de la machine asynchrone.

IV-16-Présentation du logiciel :

Le logiciel FEMM est un logiciel gratuit permettant de résoudre des problèmes linéaires ou non linéaires à deux dimensions en électrostatique, électromagnétique et de flux thermique.

Les problèmes thermiques résolus par FEMM sont des problèmes en régime établi de transfert de chaleur par conduction avec des conditions aux limites. Les conditions aux limites peuvent être une température imposée, un coefficient de convection de la température du milieu extérieur. Ces problèmes sont représentés par un gradient de température et densité de flux de chaleur. La densité de flux de chaleur doit obéir à la loi de Gauss. [5]

Cette loi est représentée par la relation suivante :

$$\nabla F = \mathbf{q} \quad (\text{IV.7})$$

\mathbf{q} : représente la production volumique de chaleur.

F : représente la densité de flux de chaleur.

FEMM permet de respecter la loi de Fourier grâce à la relation :

$$\mathbf{F} = \lambda \mathbf{G} \quad (\text{IV.8})$$

λ : la conductivité thermique

Cette conductivité thermique est généralement en fonction de la température du matériau :

$$\mathbf{G} = -\nabla T \quad (\text{IV.9})$$

IV-17-Dimensionnement géométrique du moteur sous FEMM :

Nous avons donné les dimensions géométriques de cette machine. On a imposé un point (0,0) comme référence et pour tracer l'arbre du moteur ensuite nous avons pris le point A (18,5, 0) et le point B (29,5, 0,9) pour tracer la tête de bobine et le point C (41,4, 2,21) et nous avons obtenu la moitié de l'encoche, on a fait la symétrie par rapport à l'axe des X et on a obtenu une encoche statorique complète que nous avons dupliqué par 35 pour avoir les 36 encoches au niveau du stator et pour terminer

on a tracé la tôle du stator avec un autre point D (44,0), nous avons tracé le rotor avec le même principe que le stator sauf que les encoches statorique sont dupliqué par 27 voir annexe [I-4] et II.

Et figure obtenus est la suivante :

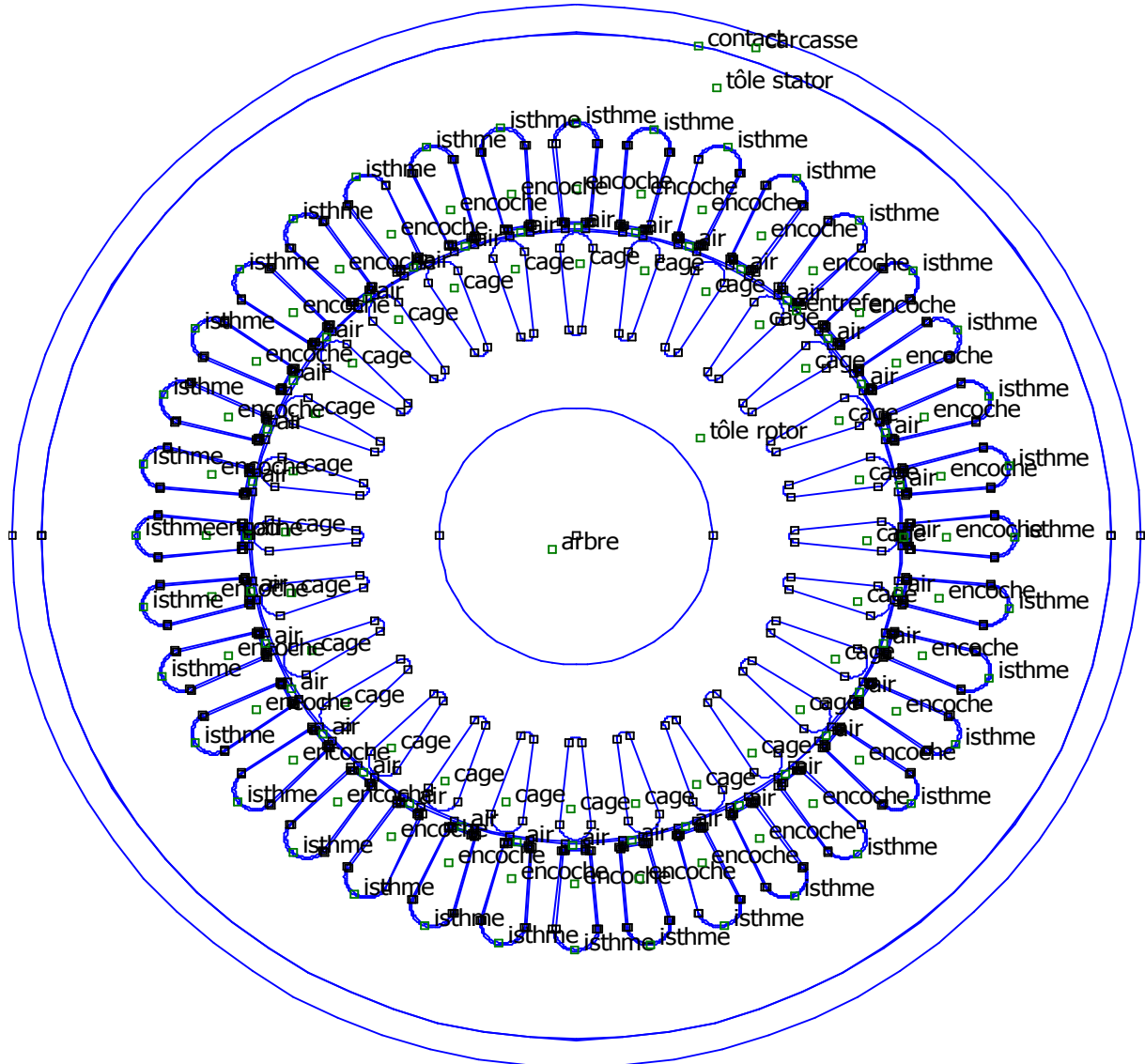


Fig. IV.14 : modélisation sous FEMM du moteur étudiée.

Nous avons ensuite défini toutes les propriétés des matériaux, leur conductivité thermique suivant les différents axes. Annexe [I-5]

Il était cependant impossible de définir le coefficient d'échange h au niveau de l'entrefer. Nous avons créé un matériau que nous avons appelé entrefer. Pour la détermination des densités de pertes nous avons calculé les volumes et les pertes dans les différentes parties. Afin de déterminer les volumes nous avons calculé les surfaces axiales multipliés par la longueur de la machine. Annexe [I-1]

Les résultats obtenus du maillage sont les suivants :

138328 nœuds et 276224 éléments

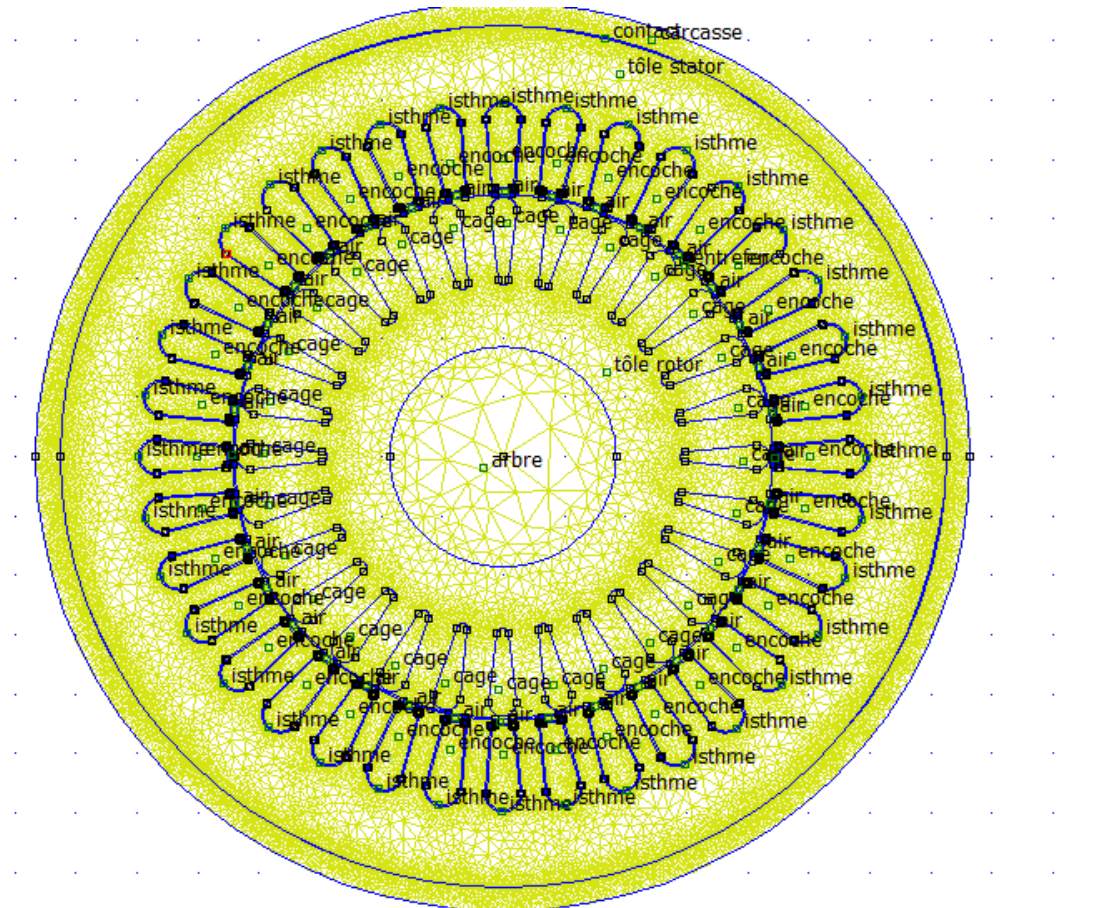


Fig. IV.15: La structure maillée du modèle de la machine étudié.

IV-18-Répartition de la température dans l'essai en charge sous FEMM

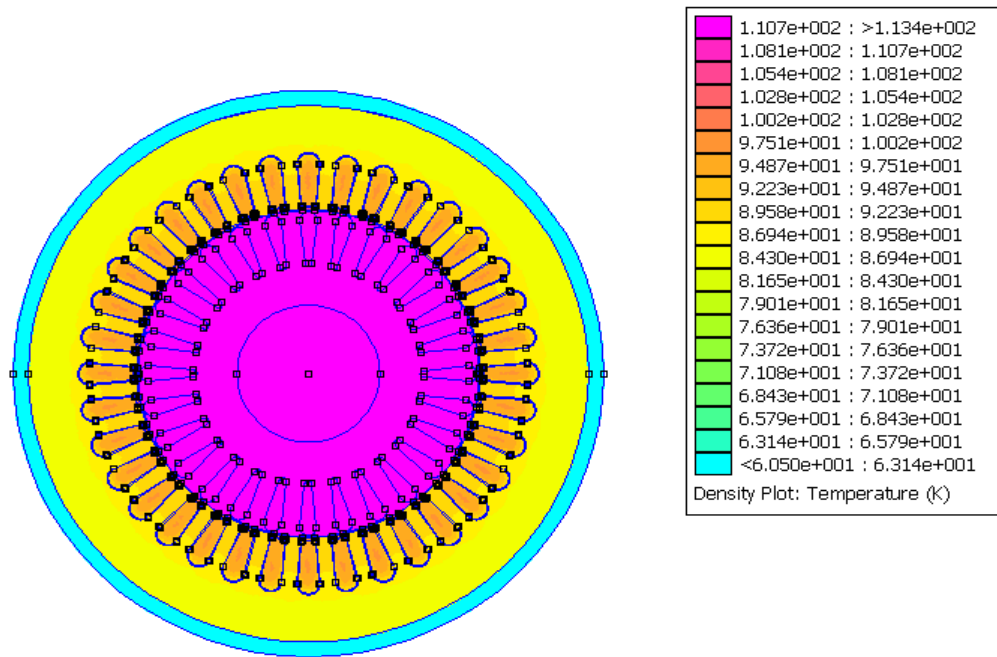


Fig. IV.16: répartition de la température de l'essai en charge sous FEMM.

IV-19-Température en fonction de la distance au centre en °C

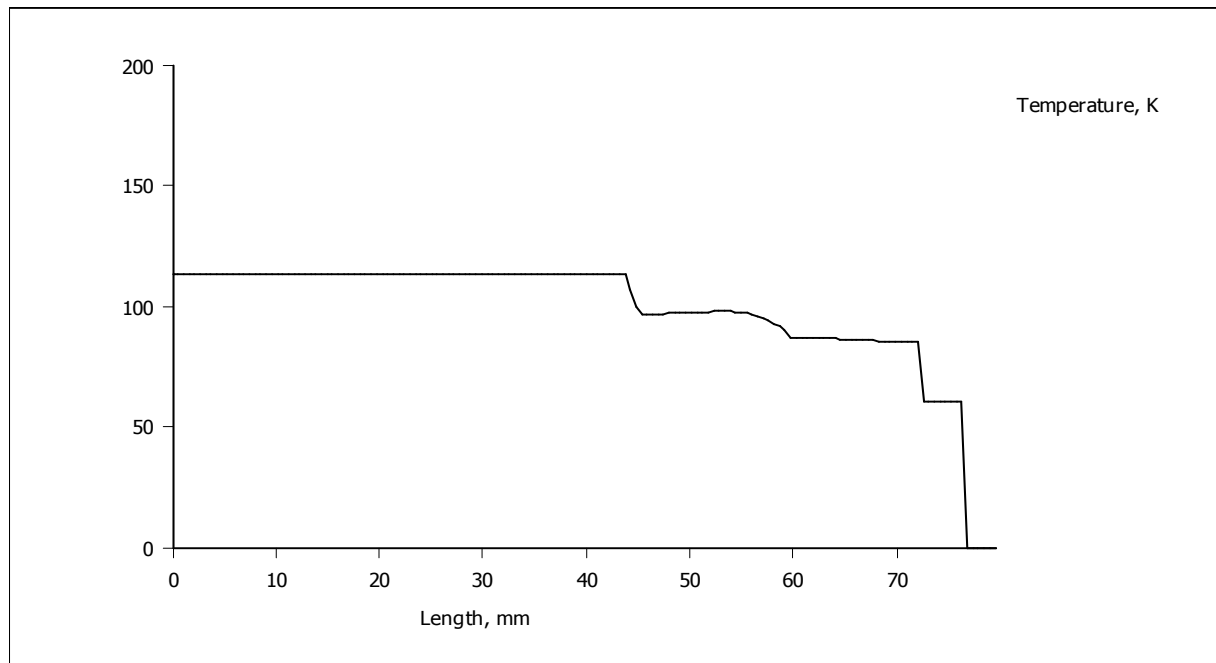


Fig. IV.17 : température en fonction de la distance au centre du moteur modélisé sous FEMM en charge.

IV-20-Comparaisons entre les valeurs obtenus par FEMM et celles obtenus expérimentalement

A partir des résultats obtenus nous avons constaté que la température au niveau du rotor est élevée est répartie d'une manière uniforme et ceci, plus en moins prévisible, et du à la très bonne conductivité thermique de l'aluminium de la cage d'une part et à la capacité de la structure rotorique. Puis on enregistre une chute de température importante au niveau de l'entrefer alors que dans les tôles statoriques la diminution de température se fait d'une manière progressive. Comme nous avons constaté des points chauds au niveau des encoches statoriques car c'est la zone où les pertes sont élevées. La chute de température devient importante sur la carcasse car c'est la plus éloigné de la source de chaleur.

IV-21-Répartition de la température dans l'essai à vide sous FEMM

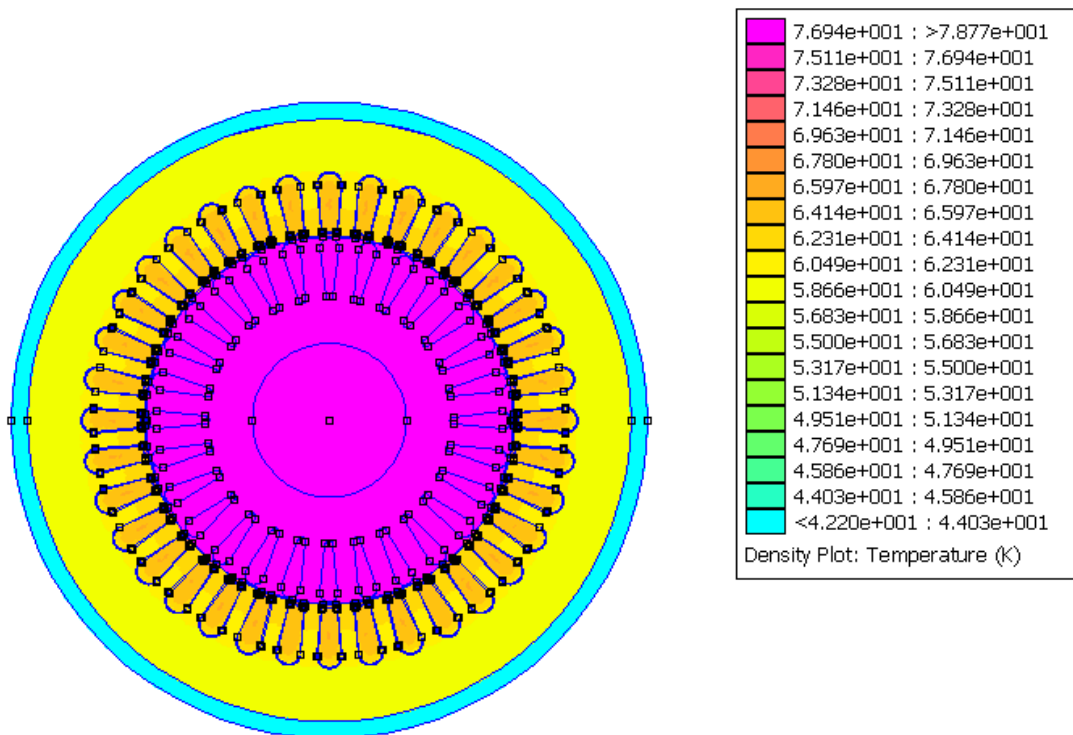


Fig. IV.18 : répartition de la température sous FEMM dans l'essai à vide.

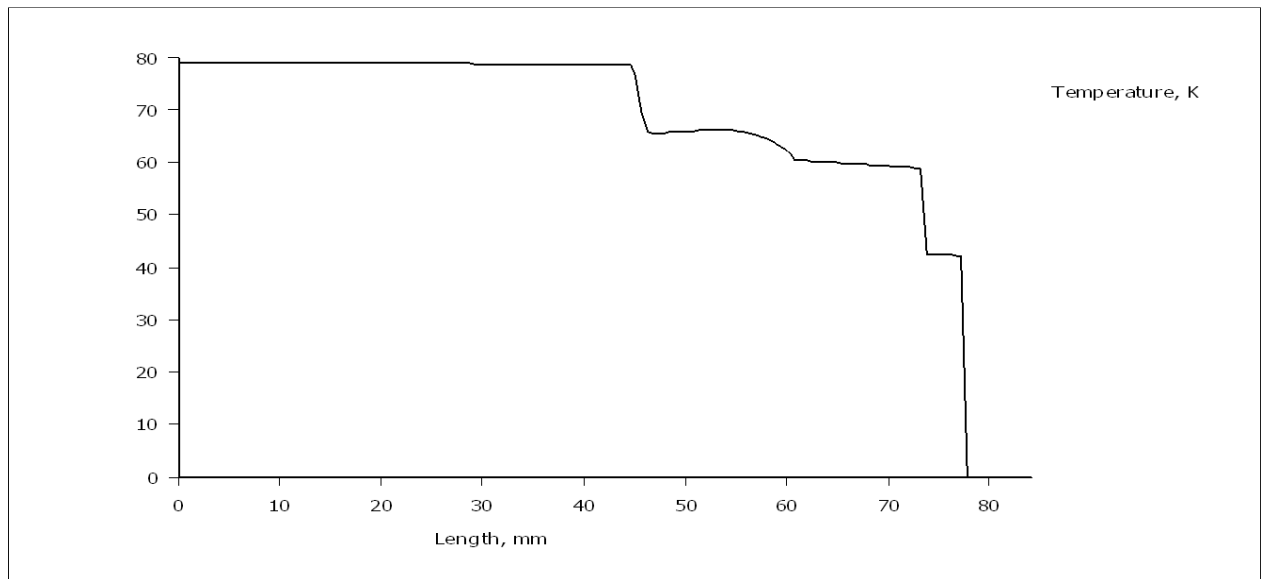
IV-22-Température en fonction de la distance au centre en °C (à vide)

Fig. IV.18: température en fonction de la distance au centre du moteur modélisée sous FEMM à vide

Les résultats obtenus à partir de l'essai à vide confirment que la température est plus élevée au niveau du rotor par rapport à celle enregistrée dans les autres parties du moteur étudié. L'entrefer est le siège d'une diminution de température alors que dans les tôles statoriques la diminution se fait d'une manière progressive, comme pour l'essai en charge nous observons des points chauds au niveau des encoches statoriques car c'est la zone où les pertes sont importantes.

IV-23-Comparaisons entre les résultats expérimentaux et celles de FEMM

- En charge

En charge	rotor	Entrefer	Les dents	Les encoches
FEMM	110°C	99°C	89.5°C	97.63°C
Expérimentales	113°C	90°C	93.4°C	105.8°C

Tableau IV-8: comparaison entre les mesures expérimentales et par FEMM en charge

- à vide

à vide	rotor	Entrefer	Les dents	Les encoches
FEMM	78.76°C	58.7°C	62.81°C	65°C
Expérimentales	78.73°C	66°C	61.2°C	66.1°C

Tableau IV-9: comparaison entre les mesures expérimentales et par FEMM à vide

Les températures mesurées expérimentalement et par simulation ne dépassent pas (3°C) pour l'essai à vide pour tous les thermocouples, dans le cas de l'essai en charge la différence de température entre les deux cas est très importantes. Au niveau de l'entrefer et des encoches (9°C) et ne dépasse pas (3°C) sur les dents et le rotor.

Les différences de températures entre le modèle effectué par FEMM et celles mesurées expérimentalement sont dû à des erreurs qui peuvent être expliqués de plusieurs façons

- Les caractéristiques des matériaux ont été prise dans des tables donc les valeurs réelles des conductivités peuvent varier légèrement.
- Même si les cotés du moteur ne sont pas ventilé, il ya des échanges à travers les flasques.
- Les pertes utilisées dans le modèles ont une estimation des pertes réelles.

IV-24-Répartition des densités de pertes en charge dans le moteur étudiée

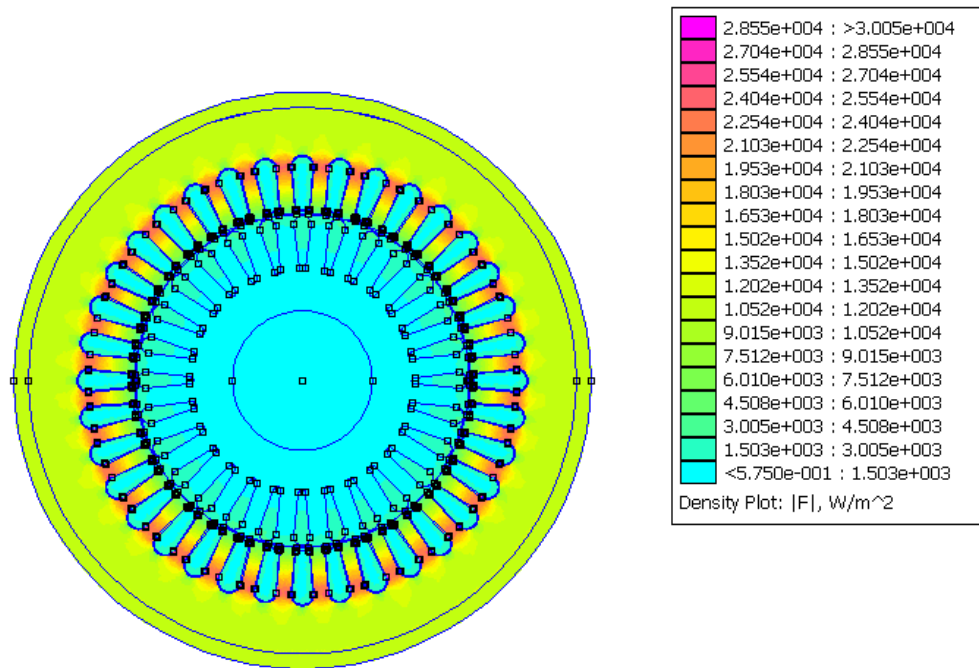


Fig. IV.19: répartition des densités de pertes lors de l'essai en charge

IV-25-Répartition des densités de pertes dans le moteur étudié à vide :

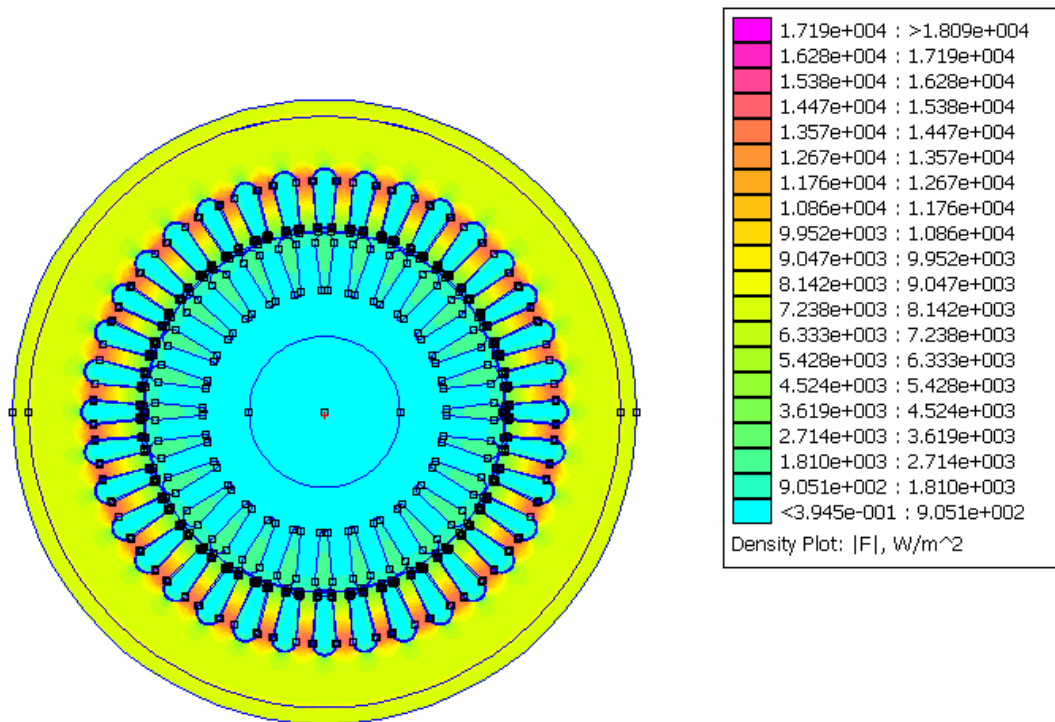


Fig. IV.20: répartition des densités de pertes lors de l'essai à vide.

À partir des deux essais à vide et en charge nous avons constaté que les densités de pertes sont très importantes aux niveaux des dents et les tôles statoriques et sur les encoches rotoriques, ces densités sont moins importantes sur les tôles rotoriques et dans les encoches statoriques.

Remarque :

La modélisation du moteur permet de localiser les points chauds et de vérifier si le système de ventilation à été correctement dimensionné. En effet la durée de vie d'un moteur est souvent conditionnée par la température atteinte par les isolants situés dans les encoches du stator. Dans le moteur étudié, les isolants sont de classe F ils peuvent donc supportés une température de 155°C.

L'étude expérimentale et par FEMM nous a permis de comprendre comment l'énergie thermique transite dans les moteur depuis sa création par les pertes joules et les pertes fer, jusqu'à leur dissipation. La comparaison entre les différentes méthodes nous a permis de valider les modèles thermiques développés.

Conclusion :

Nous avons exposé dans cette partie les différentes méthodes d'étude du comportement thermique du moteur asynchrone. Les relevés expérimentaux nous ont permis d'avoir une carte thermique de la machine étudiée, pour les points considérés. La confrontation de ces relevés avec les résultats obtenus par les deux méthodes thermique et théorique nous a permis de valider ces deux dernières en régime permanent.

La modélisation purement théorique qu'elle que soit par méthode nodale ou par FEMM présente des difficultés dues à la complexité du transfert de chaleur. Le recours à des hypothèses simplificatrices est nécessaire ce qui limite la précision des résultats.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et celles trouvés théoriquement nous a permis de valider les méthodes théoriques, la simulation des comportements thermiques se présente alors comme un outil incontournable qui sont associés à l'expérimentales.

Conclusion générale

Le fonctionnement d'une machine électrique tournante est fortement conditionné par son environnement extérieur et son mode de fabrication. Les conditions ambiantes sont très fluctuantes selon l'utilisation du moteur (température, humidité....). Des fluctuations plus ou moins brutales de charge créent des échauffements particulièrement nocifs aux parties sensibles de machines.

Le développement d'un outil de simulation thermique nécessite de quantifier, séparer et localiser les différentes sources de chaleur internes génératrices d'échauffements.

La validation de tels outils numériques demande une bonne connaissance des modes de transferts internes de la machine.

Les méthodes d'analyse numérique couramment utilisés sont initialement les méthodes nodales. Ils sont actuellement relayés par des méthodes plus globales comme les éléments finis.

Dans notre travail nous avons étudié l'échauffement et le refroidissement d'une machine asynchrone à cage de faible puissance **2.2KW** sous différents régimes de fonctionnement.

Nous avons placés des capteurs de températures (thermocouples) qui adoptent la méthode de variation de la force électromotrice (f.é.m.). Donc plusieurs capteurs de température ont été placés dans différents endroits du moteur et chaque thermocouple enregistre les températures des points correspondant. Vers la fin nous avons obtenus des courbes d'échauffements et de refroidissements de chaque essai.

Dans l'essai sans ventilation nous avons constaté que la ventilation est très importante pour le refroidissement de la machine.

Lors des essais avec variateurs de vitesse les températures enregistrées sont élevées par rapport à celles obtenues dans les essais sans variateurs de vitesse. Et ceci est certainement dû aux perturbations générées par les harmoniques.

L'essai qui a donné la température la plus haute est l'essai en charge avec onduleur, il atteint (124°C) après avoir vu les têtes de bobines en seconde place avec une température de (114°C) en régime établi. Ces résultats montrent que ces pertes joules qui occupent la majorité des pertes. Et le facteur le plus influant sur l'échauffement de la machine est le

courant qui traverse les enroulements. D'après les résultats, les sources de chaleur les plus importantes sont le rotor et la tête de bobine côté non ventilé.

Les résultats obtenus par l'expérimental et par simulation soit par la méthode d'analyse nodale ou par FEMM montrent que la partie la plus sensible à la température est le rotor car c'est celui qui donne des températures élevées. Par contre la partie la moins chaude est la carcasse car c'est la plus éloignée de la source de chaleur.

Pour l'étude complète du comportement thermique nous avons comparés les résultats expérimentaux avec ceux obtenus par méthode d'analyse nodale et FEMM. Ceci nous a permis de valider ces dernières par les essais expérimentaux.

Bibliographie :

- [1]-Z.ABDELLI et M.CHABANE : « essais d'échauffement d'un moteur asynchrone triphasé à cage » mémoire de DEUA, Université de Mouloud Mammeri (Tizi –Ouzou),2009.
- [2]-N.LARKECHE et K.MAHMOUDI : « mesures expérimentales de l'échauffement d'une machine asynchrone à cage de puissance 2,2kw » mémoire de DEUA, Université de Mouloud Mammeri (Tizi-Ouzou), 2006.
- [3]-MEZANI SMAIL « modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage »mémoire de Magister, Université des Sciences et technologie Houari Boumediene (Alger), Juillet 1999.
- [4]-A.AIGOUN et S. AMRANE : « mesure et calcul des pertes d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil » mémoire de DEUA, Université de Mouloud Mammeri (Tizi-Ouzou), 2010.
- [5]-G.LEPELTIER et T.BERTHOU « modélisation thermique d'une machine asynchrone »mémoire de 3ème année énergie électrique, ENSEM_INPL ; Université de Nancy 2009-2010.
- [6]-Schémas en électrotechnique (procédés de démarrage et freinage des moteurs asynchrones Triphasés, moteurs à courant continu).
- [7]- Technique d'ingénieur (2010), cahier technique n° 204, Protections BT et variateurs de vitesse (convertisseurs de fréquence). Proposé par : **J. SchonekY. Nebon** .
- [8]- I.P. Kopilov «projection des machines électriques(en russe) » Edition Mir, Moscou (URSS),1980, 495p.
- [9]- M.Liwshitz, L.Maret « Calcul des machines électriques », Tomes I et II, Edition SPES, Lausanne(Suisse),1967.

Annexe I

1-Calcul des densités de pertes dans les différentes parties du moteur étudié que nous avons introduit dans le logiciel FEMM dans l'essai en charge.

Calcul du volume de cuivre au niveau des encoches :

$$V_{enc} = 3 * S_{fil} * L_{fil}$$

$$D_{en} = \frac{P_{jsenc}}{V_{cui}} = \frac{3 * R_{enc} * I^2}{V_{cui}} = 1380373.057$$

L : la longueur total du conducteur dans les encoches par phase.

$$L_{fil} = 84.48m.$$

S : section du fil.

$$D_{fil} = 0.71mm \quad \longrightarrow \quad S_{fil} = 0.396mm^2$$

Calcul des densités de pertes dans les tôles statorique :

Pour le calcul de volume des encoches statoriques nous avons partagé l'encoche statorique en 3 surfaces multipliés par la longueur du moteur.

$$V_1 = \pi \left(\frac{D^2}{4} l \right) \frac{1}{2} = 1638.3012mm^3$$

$$V_2 = \frac{a+b}{2} h l = 6442.96mm^3$$

$$V_3 = a * c * l = 277.2mm^3$$

$$V_{encs} = V_1 + V_2 + V_3 = 8358.465mm^3$$

$$V_{36encs} = 300904.56mm^3$$

Calcul du volume de cylindre creux :

$$V_{cyl cre} = l (D_{ext}^2 - D_{int}^2) / 4$$

$$V_{cyl cre} = 1139193.963mm^3$$

Donc le volume des tôles statoriques = Vtotal des encoches statoriques - V de cylindre creux du stator

$$V_{TS} = 838289.403mm^3$$

La densité de perte dans les tôles statorique :

$$D_{Ts} = \frac{P_{fer}}{V_{TS}} = \frac{182}{0.000838289} = 217108.796$$

Calcul de volume d'aluminium dans la cage rotorique :

$$V_{\text{alu}} = 2 * V_{\text{ann}} + V_{\text{bar}}$$

$$V_{\text{bar}} = S_{\text{bar}} * l_{\text{bar}}$$

$S_{\text{bar}} = S$ de l'encoche rotorique

$$S_{\text{bar}} = 45.3267 \text{ mm}^2$$

$$S_{\text{Tbar}} = 28 * S_{\text{bar}} = 1269.1476 \text{ mm}^2$$

$$L_{\text{bar}} = \frac{110}{\cos 10^\circ (\text{biais})} = 111.7 \text{ mm}$$

$$V_{\text{bar}} = S_{\text{Tbar}} * l_{\text{bar}} = 141763.7869 \text{ mm}^3$$

Calcul de volume de l'anneau de court circuit :

$$V_{\text{ann}} = \pi l (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) / 4 = \pi * 13 (86.5^2 - 48^2) / 4 = 52844.04 \text{ mm}^3$$

Calcul de volume d'aluminium :

$$V_{\text{allu}} = 2 * V_{\text{ann}} + V_{\text{bar}} = 247451.8694 \text{ mm}^3$$

Calcul des densités de pertes dans les encoches rotoriques :

$$D_{\text{enr}} = \frac{P_{\text{jr}}}{V_{\text{all}}} = \frac{122.14}{0.00024745} = 493590.93167$$

Calcul des densités de pertes dans le moteur lors de l'essai à vide :

Les densités de pertes dans les tôles statoriques sont considérées constantes dans les deux essais à vide et en charge.

Pour les encoches statoriques et rotoriques les volumes sont les mêmes c'est juste les pertes qu'il faut calculer à vide

$$D_{\text{Ts}} = 217108.796$$

$$D_{\text{encs}} = \frac{P_{\text{jsenc}}}{V_{\text{cui}}} = \frac{70.62}{0.000100362} = 703651.0943$$

$$D_{\text{enr}} = \frac{P_{\text{jr}}}{V_{\text{all}}} = 0$$

2-Le calcul des différentes pertes en charge et à vide :

a- en charge :

Les pertes joules rotoriques :

$$P_{\text{jr}} = 122.14 \text{ [W]}$$

Calcul des pertes joules statorique dans la partie d'encoche :

$$P_{jsenc.} = 3.R_{enc.}.I_1^2$$

$$P_{jsenc.} = 3.5,2.(2,98)^2$$

$$P_{jsenc.} = 138,53[W]$$

Calcul des pertes joules dans les têtes de bobines du côté non ventilé :

$$P_{jstbnv.} = 3.R_{ibnv.}.I_1^2$$

$$P_{jstbnv.} = 3.3,16.(2,98)^2$$

$$P_{jstbnv.} = 84,18[W]$$

Calcul des pertes joules dans les têtes de bobines du côté ventilé :

$$P_{jstbv.} = 3.R_{ibv.}.I_1^2$$

$$P_{jstbv.} = 3.3,09.(2,98)^2$$

$$P_{jstbv.} = 82,32[W]$$

b- à vide :

Calcul de la résistance totale dans la partie d'encoche :

$$R_{enc(65^{\circ}C)} = R_{enc(115^{\circ}c)} \cdot \frac{T_2 + K}{T_1 + K}$$

$$R_{enc(65^{\circ}C)} = 5,2 \cdot \frac{65 + 234,5}{115 + 234,5}$$

$$R_{enc(65^{\circ}C)} = 4,45[\Omega]$$

Calcul de la résistance totale à 65°C :

$$R_{tot(65^{\circ}C)} = R_{tot(61^{\circ}c)} \cdot \frac{T_2 + K}{T_1 + K}$$

$$R_{tot(65^{\circ}C)} = 9,51 \cdot \frac{65 + 234,5}{61 + 234,5}$$

$$R_{tot(65^{\circ}C)} = 9,63[\Omega]$$

Calcul de la résistance des deux côtés de la bobine :

$$R_{tb} = \frac{R_{tot(65^{\circ}C)} - R_{enc(65^{\circ}C)}}{2}$$

$$R_{tb} = \frac{9,63 - 4,45}{2}$$

$$R_{tb} = 2,59[\Omega]$$

Calcul des pertes joules statorique dans la partie d'encoche :

$$P_{jsenc.} = 3.R_{enc(65^{\circ}C)}.I_{0y}^2$$

$$P_{jsenc} = 3.4,45.(2,3)^2$$

$$P_{jsenc} = 70,62[W]$$

Calcul des pertes joules dans les têtes de bobines du côté ventilé :

$$P_{jstbv} = 3.R_{tb(64^{\circ}C)}.I_{0y}^2$$

$$P_{jstbv} = 3.2,58.(2,3)^2$$

$$P_{jstbv} = 40,94[W]$$

Calcul des pertes joules dans les têtes de bobines du côté non ventilé :

$$P_{jstbnv} = 3.R_{tb(68^{\circ}C)}.I_{0y}^2$$

$$P_{jstbnv} = 3.2,61.(2,3)^2$$

$$P_{jstbnv} = 41,42[W]$$

Les pertes joules rotoriques sont négligés lors de l'essai à vide

$$p_{jr} \approx 0$$

En résumé les valeurs des différentes pertes sont les suivantes :

- **Les pertes en charge :**

$$P_{\text{rot}}=122.14 \text{ W}$$

$$P_{\text{encs}}=138.53\text{W}$$

$$P_{\text{fer}} =182\text{W}$$

$$P_{\text{tbcv}}=82.32 \text{ W}$$

$$P_{\text{tbcnv}}=84.18\text{W}$$

- **Les pertes à vide :**

$$P_{\text{rot}}=90 \text{ W}$$

$$P_{\text{encs}}=70.62\text{W}$$

$$P_{\text{fer}} =182\text{W}$$

$$P_{\text{tbcv}}=40.94 \text{ W}$$

$$P_{\text{tbcnv}}=41.42\text{W}$$

3-Caractéristiques nominales du moteur étudié :

Caracteristiques	Valeurs	Unités
Puissance utile	2.2	kW
Nombre de phase	3	-
Fréquence d'alimentation	50	Hz
Vitesse de rotation	1410	tr/min
Tension d'alimentation	380	V
Connexion	Δ	-
Courant absorber	5.2	A
Facteur de puissance	0.83	-

Tableau : Caractéristiques nominal du moteur asynchrone à cage.

4-Les dimensions géométriques de la machine :

Composante	Valeurs	Unité
Diamètre extérieur	145	mm
Diamètre intérieur	88.5	mm
Diamètre intérieur de la culasse	119.53	mm
Longueur axiale	110	mm
Nombre d'encoche	36	-
Section de l'encoche	96.4	mm ²
Diamètre du conducteur nul	0.71	mm
Diamètre du conducteur isolé	0.753	mm
Section du cuivre dans l'encoche	25.34	mm ²
Epaisseur de l'entrefer	0.25	mm
Classe d'isolation	F	-
Nombre de brins actifs par encoche	64	-

Tableau : dimension du stator

Composante	Valeurs	Unité
Diamètre extérieur	88	mm

Diamètre extérieur de la culasse	57.75	mm
Longueur axiale	110	mm
Nombre d'encoche	28	-
Section de l'encoche	45.33	mm ²
Biais d'encoche	1	-
Diamètre extérieur de l'anneau de court circuit	86.5	mm
Diamètre intérieur de l'anneau de court circuit	48	mm
Diamètre de l'arbre	37	-

Tableau : dimension du rotor.

5-Les valeurs des conductivités thermiques des matériaux :

Conductivité	K _X	K _Y
Cage	204 W/m°C	204 W/m°C
Air	0.025 W/m°C	0.025 W/m°C
Encoche (cuivre, email, air)	0.8 W/m°C	0.8 W/m°C
Arbre	75 W/m°C	75 W/m°C
Isthme	0.3 W/m°C	0.3 W/m°C
Contact	0.056 W/m°C	0.056 W/m°C
Tôle rotor	60 W/m°C	60 W/m°C
Carcasse	204 W/m°C	204 W/m°C
Tôle stator	60 W/m°C	60 W/m°C
Entrefer	0.035 W/m°C	0.035 W/m°C

Tableau : valeurs des conductivités selon l'axe X & Y

Annexe II