

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj –Bouira-



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محند أولحاج
-البويرة-

FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEE

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

DEMOUCHE Sofiane

Thème

Modélisation du transfert thermique dans les moteurs à induction

Membres du jury :

Nom et Prénom

Grade

Mr BENSALÉM Chafik

MBA

Univ. Bouira

Président

Mr MELLAH Hacene

MBA

Univ. Bouira

Promoteur

Mr AGHBANI Yanis

MBA

Univ. Bouira

Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciement

Tout d'abord, je remercie le Dieu le plus puissant pour m'avoir donné la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Mes sincères remerciements s'adressent à mes parents qui ont souffert pour que je puisse être ce que je suis et où je suis aujourd'hui.

Je tiens à remercier mon encadreur Mr Mellah Hacene pour ses qualités humaines et professionnelles, je le remercie infiniment pour ses conseils et sa disponibilité tout au long de mon travail.

Je tiens aussi à remercier les membres de jury pour avoir examiné mon travail.

Je remercie mes profs de département de Génie Mécanique.

Enfin, je tiens à remercier toutes personnes qui m'ont aidé de près ou de loin, physiquement ou moralement pour que je puisse réaliser mon travail.

Dédicaces

Je dédie mon travail :

- ✓ *A mes parents qui m'ont soutenu*
- ✓ *A mes frères et sœurs*
- ✓ *A mes ami(e)s et spécialement : Mazigh, Lijes, Ziri, slimane, abdou, Mamir, Fateh, Aris, Koukou, Yami, Wasi, Tommy, Warda, Lydia, Zahir, Bela...*
- ✓ *A toutes personnes qui m'encourage et me motive*
- ✓ *A mes collègues de département de génie mécanique*
- ✓ *A tous les membres de ma famille et la famille Demouche en général*

Demouche Sofiane

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Sommaire

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale.....12

CHAPITRE I : Généralités sur les machines asynchrone

Introduction 14

I. Généralités sur les machines asynchrones..... 14

I.1 Constitution des machines asynchrones 15

I.1.1 Le stator..... 16

I.1.2 Le rotor..... 16

I.2 Principe de fonctionnement 17

I.2.1 Le rendement de machine asynchrone17

I.3 Les différentes pertes dans la machine asynchrone..... 17

I.3.1 Les pertes par effet Joule.....18

I.3.2 Les pertes mécaniques18

I.3.3 Pertes par frottement18

I.3.3.1 Les pertes par frottement dans les paliers..... 18

I.3.3.2 Les pertes par frottement dans les roulements..... 19

I.3.3.3 Les pertes aérodynamiques..... 19

a) Cas d'un entrefer constant19

b) Cas d'un entrefer variable20

c) Influence de la température et de la pression.....20

d) Pertes aux contacts balais-collecteur et balais-bague20

I.3.3.4 Pertes par ventilation 20

I.3.4 Les pertes fer 20

I.4 Défauts des machines asynchrones entraînant l'échauffement..... 21

I.4.1 Les défauts internes :..... .22

I.4.2 Les défauts externes	22
I.4.3 Défaut statorique.....	23
I.4.4 Défauts rotorique.....	23
Conclusion.....	24

CHAPITRE II : Modélisation thermique des moteurs à induction

Introduction.....	26
II.1 Transfert thermique dans les moteurs électriques	26
II.1.1 Transfert de chaleur par conduction	26
II.1.2 Transfert de chaleur par convection	26
II.1.2.a Une convection naturelle	27
II.1.2.b Une convection forcée	27
II.1.2.c Calcul de coefficient d'échange «h»:	27
II.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement.....	28
II.2 Modélisation thermique des machines asynchrones	29
II.2.1 Méthode nodale	29
II.2.2 Principe de la méthode nodale	29
II.2.3 Description de modèle nodale	30
II.2.4 La résolution du système d'équation.....	32
II.2.4.a La détermination des conductances thermiques:	32
II.2.4.b La détermination des pertes.....	32
II.2.4.c La détermination des températures.....	32
II.2.5 Les équations du modèle nodale en régime transitoire	33
Conclusion.....	34

CHAPITRE III : Simulation & discussion

Introduction.....	36
III.1 Logiciel Motor-CAD.....	36
II.1.1 Usage de Motor-CAD.....	38
III.2 Résultats et simulation	50
III.2.1. Données du moteur.....	50
III.2.1.a. Avec ventilateur	51
III.2.1.b. Sans ventilateur	56
Conclusion.....	61
Conclusion générale	63
Bibliographie.....	65
Annexes	68

Nomenclature :

Symbole	Désignation	Unité
N_s	Vitesse de synchronisme	[tr/min]
F	Fréquence	[Hz]
P	Nombre de paires de pôles	
G	Glissement	
N	La vitesse de rotation	[tr/min]
η	Le rendement	
P_u	La puissance utile	[W]
P_d	La puissance délivrée	[W]
P_j	Perte joule	[W]
R	La résistance électrique	[Ω]
I	Intensité du courant	[A]
α_r	Coefficient de température caractéristique du matériau	[K^{-1}]
R_0	La résistance à température 0	[Ω]
φ	La densité du flux de chaleur	[J]
λ	La conductivité thermique du matériau	[$W.m^{-1}.K^{-1}$]
T	La température	[K]
φ_P	La densité du flux de convection	
H	Le coefficient de convection	[$Wm^{-2}K^{-1}$]
$T_{réf}$	La température de référence	[K]
Re	Le nombre de Reynolds	
V	La vitesse de l'écoulement	[m/s]

L_c	Dimension caractéristique de l'écoulement	[m]
ν	Viscosité cinématique de fluide	[m ² /s]
Nu	Le nombre Nuslet	
a_g	Constante géométrique	
Gr	Le nombre de Grashof	
Pr	Le nombre de Prandtl	
b_g	Constante géométrique	
β	Coefficient due à la dilatation	
ΔT	La différence de températures	[K]
μ	La viscosité dynamique	[kgm ⁻¹ s ⁻¹]
C_p	La capacité thermique massique	[JKg ⁻¹ K ⁻¹]
C_a	Couple de frottement sur les arbres	
C'_a	Couple relatif de frottement sur les arbres	
L	Longueur de palier	[m]
J	Jeu radial	
R_p	Rayon du palier	[m]
N_f	Nombre de frottement sur l'arbre	
S_n	Nombre de Sommerfeld	
W	Charge appliqué	
Q	Le débit de l'alimentation	
p_0	La pression d'arrivée dans les paliers	[Bar]
C_f	Le couple de frottement	
K_r	Coefficient variant selon le type de roulement	

F_r	Charge radiale transmise	[N]
R_r	Rayon moyen du roulement	[m]
P_a	Les pertes aérodynamiques	[w]
μ'	Viscosité dynamique du gaz	[Kg/m.K]
ε	L'entrefer simple	
S	Surface	[m ²]
D_{ex}	Diamètre extérieur du rotor	[m]
L_{rot}	Longueur du rotor	[m]
c	Facteur dépendant de la nature du gaz et de température	
P_b	Perte balais	[W]
P_B	Donné par le fabricant	[N/cm ²]
S_b	Surface de toutes les lignes de balais	[m ²]
f_b	Coefficient de frottement	
P_{V+P}	Pertes de ventilation + pertes de frottement palier	[W]
V_t	<i>Vitesse tangentiel du rotor</i>	[m/s]

Liste des figures :

Figure	Page
CHAPITRE I	
Figure I.1:exemple de fonctionnement d'un moteur asynchrone	14
Figure I.2:Moteur asynchrone	15
Figure I.3:Les différents composants d'un moteur asynchrone	15
Figure I.4: Les parties essentielles des machines asynchrones	16
Figure I.5:Décomposition d'un moteur asynchrone (rotor et stator)	16
Figure I.6:La répartition des pertes dans la machine asynchrone	21
Figure I.7:La séparation des différentes pertes dans la machine asynchrone.	21
Figure I.8:La réparation des défauts	22
Figure I.9:Les causes internes de défauts de la MAS	22
Figure I.10:Les causes externes de défauts de la MAS	23
CHAPITRE II	
Figure II.1:Le mode de transfert thermique présenter selon la partie de la machine(C : conduction, V : convection).	28
Figure II.2: volume élémentaire V_i de modèle nodale	30
Figure II.3 : Un exemple de découpage en 5 blocs	30
Figure II.4 : Schéma simplifié de modèle nodal d'une machine asynchrone.	31
CHAPITRE III	
Figure III.1: Résultat électromagnétique obtenu par Motor-CAD	37
Figure III.2 : Carte d'efficacité (Lab) Motor-CAD	37
Figure III.3 : Résultats thermique obtenu par Motor-CAD (régime transitoire)	38
Figure III.4 : Description de section radiale de motor-cad	38
Figure III.5 : Interface Motor-CAD (type de Moteur)	39
Figure III.6 : Géométrie radial d'un moteur	39
Figure III.7 : Géométrie axiale d'un moteur	40
Figure III.8 : Vue 3D d'un moteur	40
Figure III.9 : Modèle d'enroulement.	41
Figure III.10 : Le modèle linaire	41
Figure III.11 : les phases d'enroulement	42
Figure III.12 : enroulement MMF	42
Figure III.13 : Les harmoniques	43
Figure III.14 : Les facteurs d'enroulement	43
Figure III.15 : Définition d'enroulement	44
Figure III.16 : Système de refroidissement	44
Figure III.17 : Le modèle des pertes	45
Figure III.18 : La répartition des pertes	45

Figure III.19 : Choix de matériau	46
Figure III.20 : L'addition d'un matériau spécifique	46
Figure III.21 : Définir les paramètres de régime transitoire	47
Figure III.22 : Paramètres de calcul	47
Figure III.23 : Graphe de température de chaque composant constituant Moteur.	48
Figure III.24 : Diagramme des puissances	48
Figure III.25 : Schéma détaillé de réseau thermique	49
Figure III.26 : Schéma de réseau thermique de moteur	50
Figure III.27 : Les pertes thermiques de moteur	51
Figure III.28 : Les variations des températures dans les différentes parties du moteur ventilé	52
Figure III.29 : Les températures radiales du moteur ventilé	52
Figure III.30 : la variation des puissances dans un moteur ventilé	52
Figure III.31 : Les températures axiales du moteur ventilé	53
Figure III.32 : schéma de réseau thermique du moteur avec nomination des composants	53
Figure III.33 : schéma de réseau thermique du moteur à induction	54
Figure III.34 : réseau thermique des puissances du moteur	54
Figure III.35 : Les pertes thermiques du moteur à induction	55
Figure III.36 : l'enroulement sous effet thermique en 2D	55
Figure III.37 : variation des températures dans les parties d'un moteur non ventilé	56
Figure III.38 : variation des puissances dans les parties d'un moteur non ventilé	57
Figure III.39 : Les températures axiales du moteur	57
Figure III.40 : Les températures radiales du moteur non ventilé	58
Figure III.41 : schéma de réseau thermique du moteur non ventilé avec nomination des composants.	58
Figure III.42 : schéma de réseau thermique du moteur non ventilé	59
Figure III.43 : schéma de réseau thermique du moteur non ventilé représentant les puissances des composants	59
Figure III.44 : Les pertes thermiques du moteur non ventilé	60
Figure III.45 : La répartition de la température au niveau d'enroulement	60

Liste des tableaux

Tableau	page
Table I.1:défauts par leurs origine et conséquences sur la machine	24
Table II.1:Analogie thermoélectrique	29

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction Générale

Les moteurs à induction sont des machines électromécaniques largement utilisés dans les industries grâce à leurs simplicités de construction et leurs coûts réduits, ils garantissent également de bons rendements en faisant de maintenance soit préventive ou corrective et d'une façon régulière.

Lors du fonctionnement des moteurs à induction y'a une quantité d'énergie perdue sous forme d'une chaleur, cette énergie thermique perdue influence directement sur la machine en minimisant leurs rendements ou provoque des problèmes écologiques comme le développement de l'effet de serre. Cette chaleur dégagée est produite lors de la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique, et c'est à l'origine un produit de plusieurs types de perte (perte joule, perte courant de Foucault, perte mécanique...), et il faut en tenir compte que cette augmentation de température menace l'efficacité de la machine en causant la destruction ou le dysfonctionnement d'un ou plusieurs composants constituant la machine.

Donc il est indispensable de déterminer ces pertes pour préserver l'état de la machine et améliorer son rendement. Certaines pertes sont difficiles à déterminer c'est pour ça qu'on utilise le logiciel Motor-CAD qui nous permettra de connaître les parties les plus sensibles à l'échauffement et peut déterminer les pertes dans des temps records.

Le Motor-CAD donne la possibilité de connaître et de localiser les parties touchées par la température dans les régimes transitoire et permanent.

Notre mémoire est structurée comme suit :

On consacre le premier chapitre aux généralités sur les machines asynchrones, ces composants et leurs rôles ensuite on définit les pertes pendant le fonctionnement de la MAS¹.

Le deuxième chapitre est pour l'étude de trois modes d'échange de chaleur dans la machine asynchrone, et pour présenter la méthode de modélisation thermique utilisée dans notre travail.

Pour le troisième chapitre on présente l'outil utilisé dans la modélisation, et qui est Le logiciel Motor-CAD, on donne des initiations sur son usage et on termine le chapitre par les résultats et discussions obtenus dans l'étude de notre modèle de machine asynchrone.

Enfin nous terminons par une conclusion générale.

¹ Machines asynchrones

CHAPITRE I

Généralités sur les machines Asynchrones

Introduction :

Grâce à leurs rendement élevé, leurs coût réduits, la simplicité de leurs procédés de fabrication et aussi moins volumineux on trouve que les machines asynchrones (appelées aussi machine à induction) sont les plus utilisées dans les applications industrielles.

La machine à induction transforme l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique (mouvement de rotation), ce processus de transformation est accompagné par l'augmentation de température influence directement sur le rendement de la machine et cause des pertes tels que :

- les pertes de fer
- les pertes mécaniques
- les pertes joules

Dans ce chapitre nous aborderons quelques généralités sur la constitution et le fonctionnement des machines asynchrones, ensuite on va définir les différents types de pertes qui se présentent dans les MAS pendant leurs fonctionnements.

I. Généralités sur les machines asynchrones :**Définition :**

Machines asynchrones ou machines à inductions sont des machines électriques qui fonctionnent avec un courant alternatif, leurs rôle est de transformer l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique représentée par la rotation de rotor [1].

Le mot asynchrone veut dire que la vitesse de rotation de rotor est simultanée à celle de champ statorique de la machine [2].

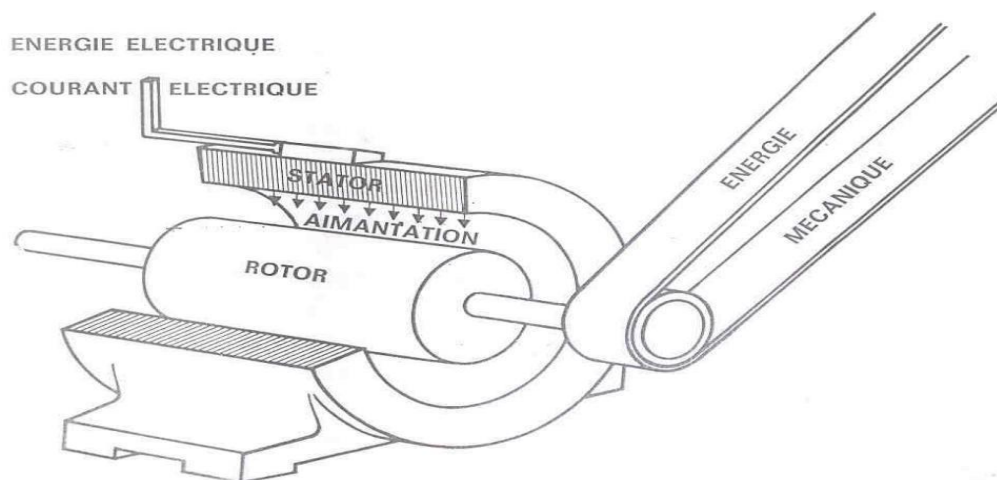


Figure I.1:exemple de fonctionnement d'un moteur asynchrone

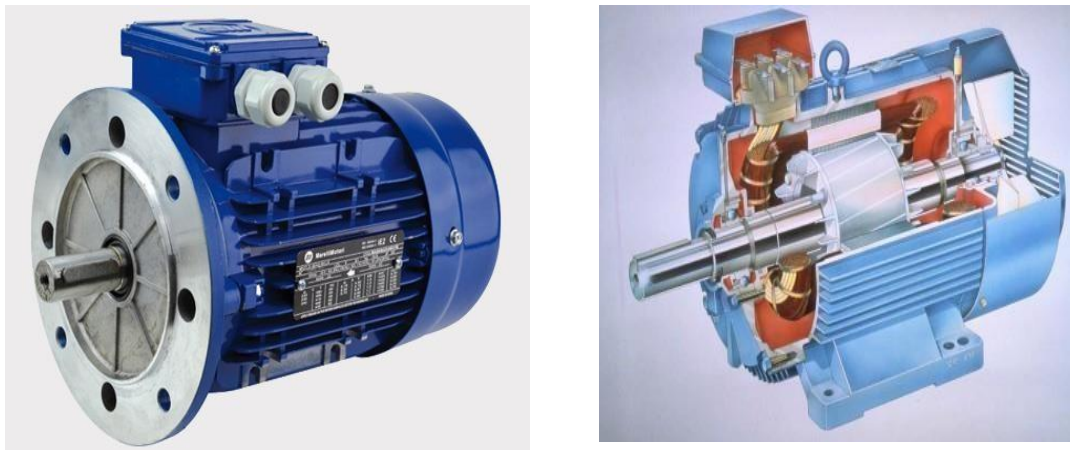


Figure I.2: Moteur asynchrone

I.1 Constitution des machines asynchrones :

Les machines asynchrones sont connues par leurs simples principes de fonctionnement mais aussi par la simplicité de la procédure de leur fabrication, la figure ci-dessous montre les composants de la machine à induction :

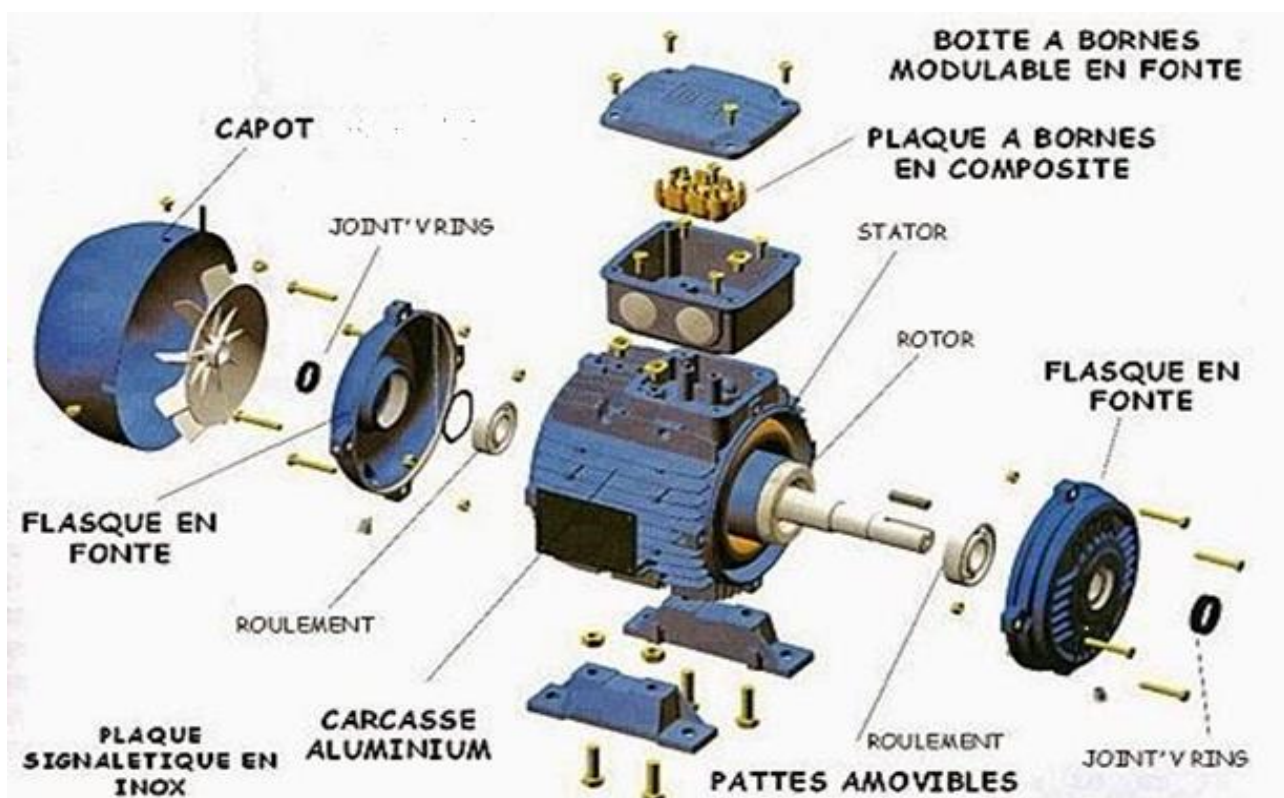


Figure I.3: Les différents composants d'un moteur asynchrone

Le moteur asynchrone a deux principales parties :

- le stator est la partie fixe ;
- le rotor est la partie mobile (fait un mouvement de rotation).



Figure I.4: Les parties essentielles des machines asynchrones

I.1.1 Le stator

Le stator est la partie fixe de la machine à induction, il est constitué généralement par :

- ✓ une carcasse en acier;
- ✓ les paliers;
- ✓ ventilateur de refroidissement;
- ✓ bobine (enroulement) statorique;
- ✓ capot protégeant le ventilateur.

I.1.2 Le rotor

Le rotor est la partie tournante du moteur, il est de la forme cylindrique fabriqué de tôle empilée, et il est séparé du stator par un entrefer de petite épaisseur.

Il existe deux types de rotor :

- ✓ le rotor à cage d'écureuil
- ✓ le rotor bobiné

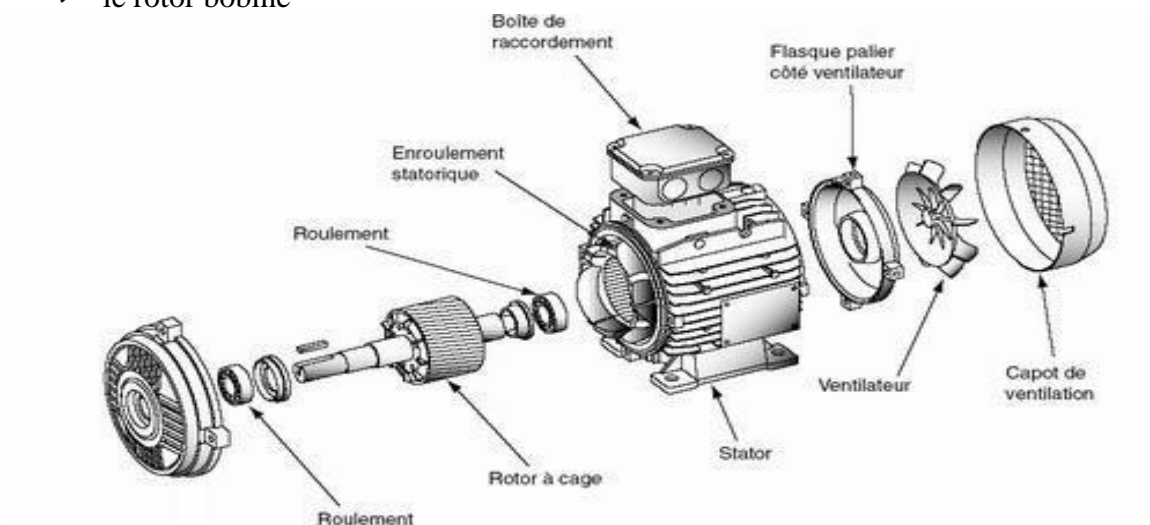


Figure I.5: Décomposition d'un moteur asynchrone (rotor et stator)

I.2 Principe de fonctionnement :

Lorsque la MAS sera alimenté par un courant alternatif, les 3 enroulements (bobines) situés dans le stator créer un champ magnétique définit par la loi d'Ampère, la vitesse de ce champ magnétique tournant créer doit être supérieur à celle de rotor pour faire tourner ce dernier [3].

La vitesse de champ tournant appelée vitesse synchronisme notée N_s , dépend de la fréquence de la source et de nombre de paires de pôle, la relation est donnée comme suit :

$$N_s = \frac{60f}{P} \quad \text{I.1}$$

N_s : Vitesse de synchronisme en [tr/min]

f : Fréquence [Hz]

P : Nombre de paires de pôles.

En cas où la vitesse du champ statorique est similaire aux vitesses de champ rotorique, les courants induits au rotor s'annuleraient [4].

Le mouvement du rotor par rapport au stator appelé un glissement, on le note « g ».

Pour le calcul, on calcule le rapport de différence entre la vitesse synchronisme « N_s » et la vitesse de rotation par rapport à la vitesse synchronisme comme expliqué dans la formule I.2:

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad \text{I.2}$$

Avec :

N : La vitesse de rotation [tr/min]

I.2.1 Le rendement de machine asynchrone :

Le rendement d'une machine est le rapport entre sa puissance utile et la puissance délivrée [5].

$$\eta = \frac{P_u}{P_d} \quad \text{I.3}$$

Avec :

η : Le rendement

P_u : La puissance utile [W]

P_d : La puissance délivrée [W]

I.3 Les différentes pertes dans la machine asynchrone :

L'étude des machines asynchrones est pour objectif d'améliorer leurs rendements et cela peut se réaliser par l'estimation des pertes d'énergies localisées dans plusieurs composants constituant la machine [6].

Il existe différents types de pertes dans les MAS on cite :

-les pertes par effet Joule ;

-les pertes fer ;

-les pertes mécaniques.

I.3.1 Les pertes par effet Joule

Les pertes joule correspondent aux quantités d'énergie perdue par échauffement du conducteur provoquées par la résistance interne lors d'une circulation du courant dans l'enroulement, on peut calculer ces pertes à l'aide de la formule I.4 [7]

$$P_j = RI^2 \quad \text{I.4}$$

Cette résistance dépend de la température du conducteur selon la formule I.5

$$R = R_0(1+a_T.T) \quad \text{I.5}$$

Tel que :

R_0 : est la résistance à T_0

a_T : est le coefficient de température caractéristique du matériau utilisé ($a_T = 0.00393K^{-1}$)

La fréquence élevée cause aussi des pertes supplémentaires appelées effet de peau [8].

I.3.2 Les pertes mécaniques

Les pertes mécaniques sont le résultat des frottements dus à la rotation de la plaque tournante, autrement, ce sont les pertes issues de frottement entre solide-solide, solide-fluide ou solide-air et même contient aussi les pertes par ventilation.

I.3.3 Pertes par frottement :

I.3.3.1 Les pertes par frottement dans les paliers :

La puissance dissipée lors d'un frottement dans les paliers est donnée par la relation suivante :

$$P = 2\pi N C_a \quad \text{I.6}$$

Tels que

C_a : couple de frottement sur les arbres ;

N : la vitesse de rotation

La relation de couple relatif de frottement sur les arbres C'_a est :

$$C'_a = \frac{C_a}{\mu L D N R_p^2 / J} = \frac{1}{S_n} N_f \quad \text{I.7}$$

D : diamètre de palier ;

L : longueur de palier ;

J : jeu radial ;

R_p : Rayon du palier ;

μ : viscosité dynamique de fluide lubrifiant ;

N_f : Nombre de frottement sur l'arbre

S_n : Le nombre de Sommerfeld.

Et le nombre de Sommerfeld se calcule avec la relation suivante :

$$S_n = \frac{\mu L D N}{W} \left(\frac{R_p}{j} \right)^2 \quad \text{I.8}$$

W : charge appliquée

Si le palier alimenté par une pression externe en ajoute Q ($p_{ex} - p_0$) a la relation précédente. Avec :

Q : le débit de l'alimentation ;

p_0 : la pression d'arrivée dans les paliers.

I.3.3.2 Les pertes par frottement dans les roulements :

Les pertes dans les roulements sont d'origine causé par les roulements comme le principefacteur on cite [9] :

-Frottement des corps roulants avec le chemin roulant ;

-Des joints qui intègrent avec les roulements.

Pour calculer la puissance perdue par le frottement des roulements par la relation :

$$P = 2C_f \cdot 2\pi N \quad \text{I.9}$$

C_f : le couple de frottement, il égale à :

$$C_f = K_r F_r R_r \quad \text{I.10}$$

K_r : coefficient variant selon le type de roulement

F_r : charge radiale transmise [N]

R_r : rayon moyen du roulement[m]

-Pour les roulements rigides à billes, et cylindrique $K = 0,001$;

-pour les roulements à billes oblique et rouleaux conique $K = 0,002$;

-pour les roulements à aiguilles $K = 0,003$ à $0,004$.

I.3.3.3 Les pertes aérodynamiques

Ces pertes est due à cause des fluide gazeux qui frotte le rotor, ce type de frottement a une relation directe avec le type de rotor cela produit plusieurs cas de frottements.

a) Cas d'un entrefer constant :

Les pertes aérodynamiques sont calculées par la relation :

$$P_a = \frac{\mu' V^2 S}{\varepsilon} \quad \text{I.11}$$

μ' : viscosité dynamique du gaz

V: vitesse périphérique

ε : l'entrefer simple

S : la surface du rotor

$$S = \pi D_{ex} L_{rot} \quad \text{I.12}$$

D_{ex} : Diamètre extérieur du rotor

L_{rot} : Longueur du rotor

b) Cas d'un entrefer variable

Si le rotor à pole saillant on utilise l'équation précédente avec la condition de multiplier les pertes par K, dans ce cas K égale : [10]

$$K = \frac{8.5h_p}{R} + 2 \quad \text{I.13}$$

c) Influence de la température et de la pression :

On utilise la loi :

$$\mu' = \mu'_0 \sqrt{\frac{T}{273} \cdot \frac{1+(c/273)}{1+(c/T)}} \quad \text{I.14}$$

μ'_0 : viscosité dynamique à T= 0°C,

c: Facteur dépendant de la nature du gaz et de température.

d) Pertes aux contacts balais-collecteur et balais-bague :

Ces pertes sont données par la relation :

$$P_b = 1.11 f_b P_B S_b V_c \quad \text{I.15}$$

P_B : donné par le fabricant [N/cm²] Pour :

-Balais des machines à collecteur P_B valeur de 1,8 à 2,2 N/cm² [10]

Et pour les balais sur bagues P_B 1,5 N/cm²

S_b : surface de toutes les lignes de balais

f_b : coefficient de frottement

I.3.3.4 Pertes par ventilation :

La relation suivante est utilisée pour calculer la somme des pertes par frottement au niveau de palier et les pertes par ventilation :

$$P_{V+P} = 0.3 \text{ à } 0.7 (P_u V_t^2 10^{-5}) \quad \text{I.16}$$

V_t = Vitesse tangentielle du rotor [m/s]

I.3.4 Les pertes fer

Les pertes fer ou les pertes magnétique sont des pertes sous forme d'un flux magnétique, elles sont la conséquence des pertes hystérésis et les pertes par courant de Foucault. [10]

Les pertes fer dépendent de la tension du courant alimenté et la fréquence du courant statorique [9][10].

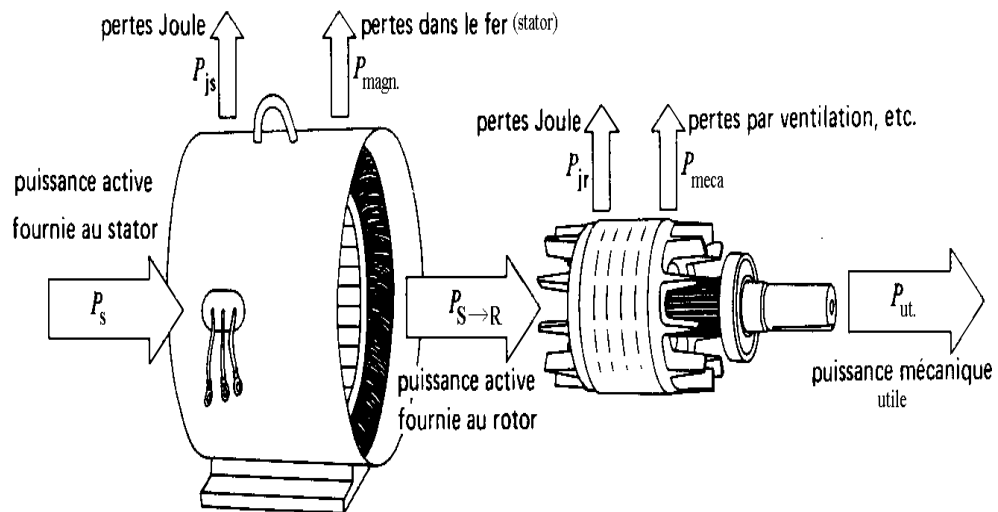


Figure I.6: La répartition des pertes dans la machine asynchrone

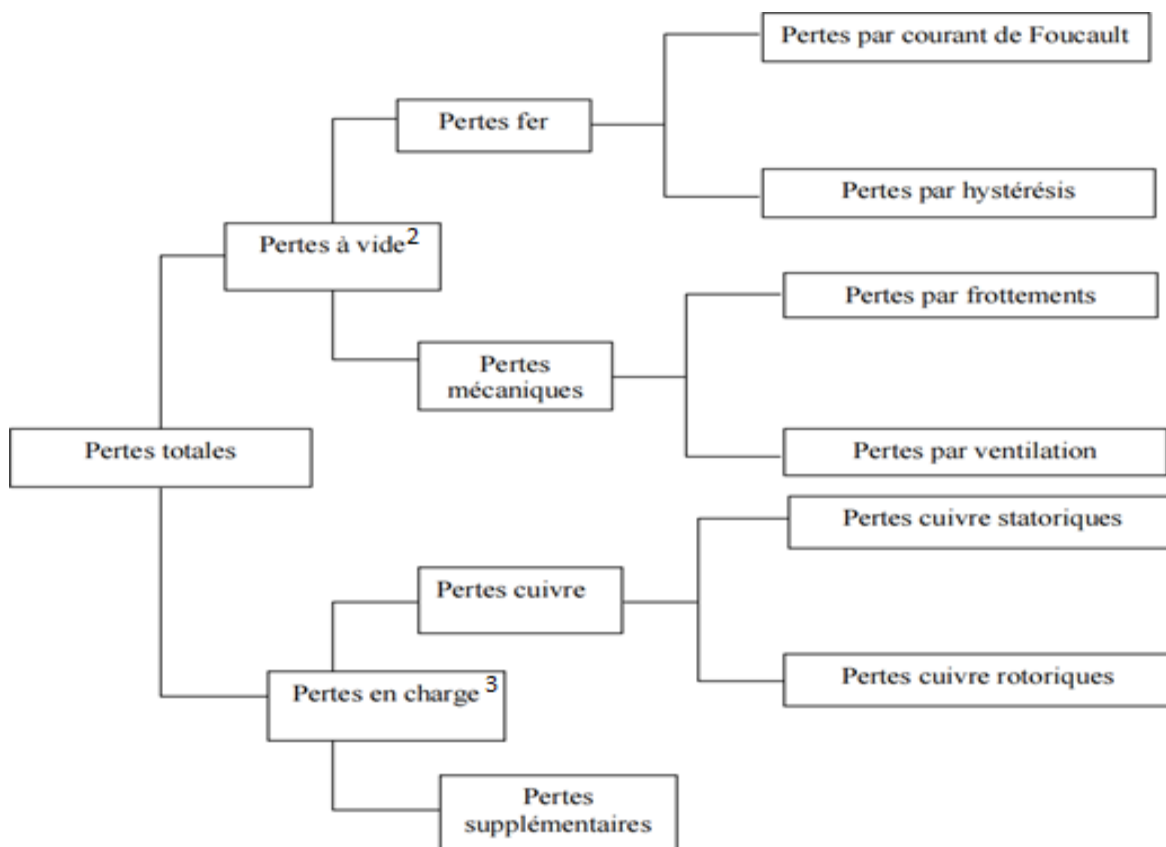


Figure I.7: La séparation des différentes pertes dans la machine asynchrone.

I.4 Défauts des machines asynchrones entraînant l'échauffement

D'après les données précédentes, on distingue qu'il existe six zones de défauts qui entraîne l'échauffement des parties de la machine [11] on cite donc :

- la qualité de l'alimentation
- le circuit de l'alimentation

² Couple moteur est à vide

³ Couple moteur est en charge

- l'isolation
- le stator
- le rotor
- l'excentricité

Et ces six zones sont d'origine de deux types de défauts : défauts à l'origine interne et défauts à l'origine externe. Ces différents défauts sont repartis selon la figure suivante :

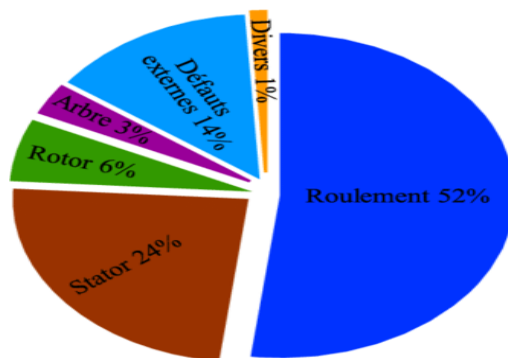


Figure I.8:La réparation des défauts

I.4.1 Les défauts internes :

Sont des défauts dus à des sources internes du moteur, on note [12] :

Des défauts électriques comme les courts-circuits phase-terre et les courts-circuits entre les phases ; échauffements des bobines et les isolements...etc.

I.4.2 Les défauts externes :

Sont dus à des facteurs de milieu externe de la machine, et d'origine de diverses sources comme :

- Coupure du courant électrique ;
- mauvais montage de la machine ;
- Les facteurs météorologiques comme l'humidité et la température ...etc.

Ces deux origines des défauts (interne et externe) sont clarifiées dans les figures ci-dessous :

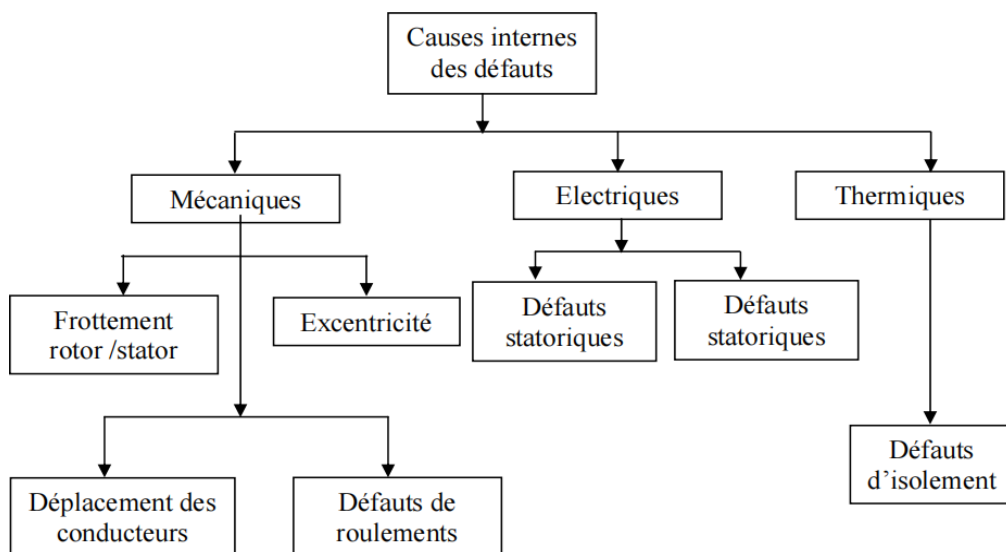


Figure I.9:Les causes internes de défauts de la MAS

Les défauts statorique est répété dans le schéma car y'a des défauts statorique dû par les pertes joules et d'autres du par les pertes fer.

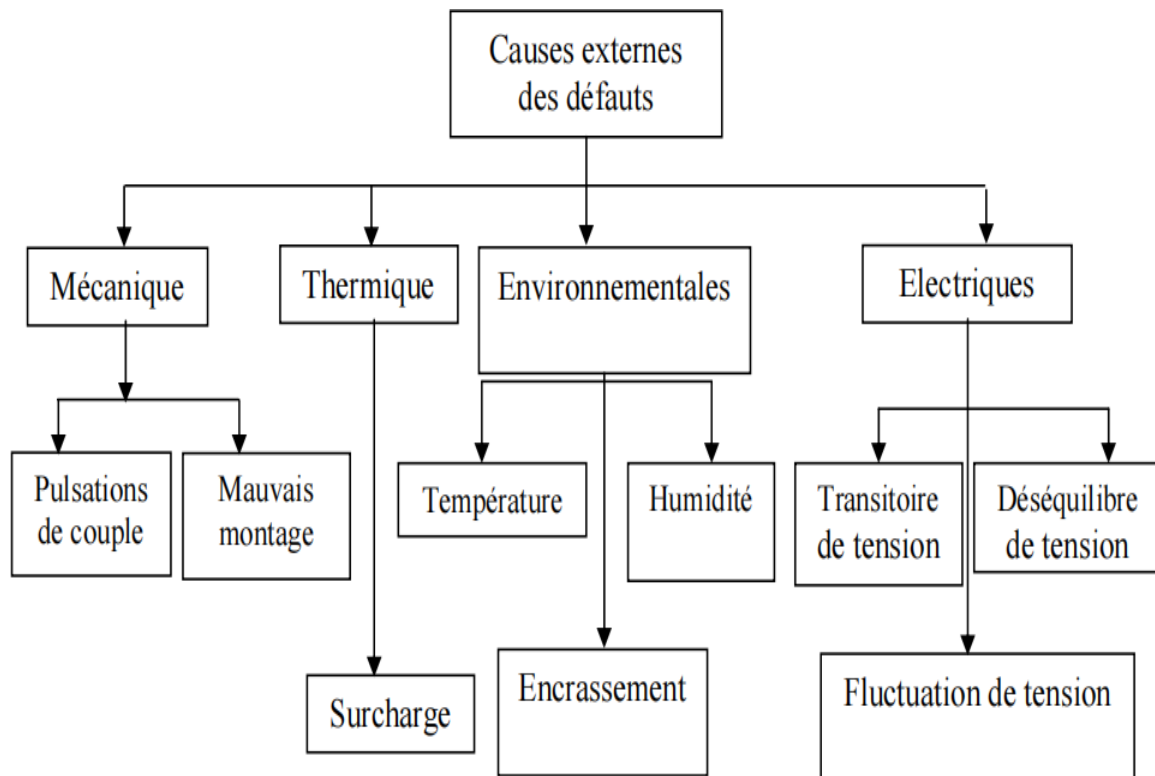


Figure I.10: Les causes externes de défauts de la MAS

I.4.3 Défaut statorique :

Le stator est l'un des parties les plus importante de la machine, la destruction de l'isolant qui protège le conducteur en cuivre de stator par des contrainte mécanique, thermique ou électrique provoque des courts-circuits [13] et l'apparition des quelques défauts au niveau d'enroulement, on distingue :

- Court-circuit dans les spires ;
- Court-circuit entre phases ;
- Coupure d'une phase ;
- Défaut du circuit magnétique ;
- Défaut de l'isolation masse.

I.4.4. Défaut rotorique :

Les défauts de cette partie peuvent causer des autres défauts dans le reste des parties de la machine, les défauts rotoriques se situent dans l'entrefer ou la cage.

Pour l'entrefer les défauts fréquents sont excentricité, et les défauts fréquents au niveau de la cage sont les ruptures de barres et des ruptures d'anneaux.

Les défauts et leurs origines et conséquence sont résumés dans le tableau ci-dessous [13] :

Défauts	Origines	Effets	Conséquences sur le moteur
Court-circuit	-mise en contact de plusieurs phases et du neutre ou de plusieurs spires	-pointe de courant -efforts électrodynamiques sur les conducteurs	-Destruction des enroulements
surtension	-foudre -Décharge électrostatique -Manœuvre	-claquage diélectrique au niveau des enroulements -Destruction des enroulements par perte d'isolation	-Destruction des enroulements par perte d'isolation
Déséquilibre de tension	-ouverture d'une phase -charge monophasée en amont du moteur	-Diminution du couple utile	-Sur-échauffement
Baisse et creux de tension	-instabilité de la tension du réseau -Branchement de fortes charges	-Diminution du couple utile -augmentation des pertes	-Sur-échauffement
Harmoniques	-pollution du réseau par variateur de vitesse, onduleur, etc.	-Diminution du couple utile -augmentation des pertes	-Sur-échauffement
Démarrage trop long	-couple résistant trop important -baisse de tension	-augmentation du temps de démarrage	-Sur-échauffement
Blocage	-problème mécanique	-surintensité	-Sur-échauffement
surcharge	-augmentation du couple résistant -Baisse de tension	-Augmentation du courant consommé	-Sur-échauffement

Table I.1:défauts par leurs origine et conséquences sur la machine

I.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre on a donné quelques généralités sur la machine asynchrone ensuite on a décrit les parties constituantes de la machine asynchrone.

Après, on a montré les différentes pertes dans la machine et les différents défauts qui sont sources à ces pertes lors de fonctionnement de machine.

CHAPITRE II

Modélisations thermiques Des moteurs à induction

Introduction

La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique faite par les MAS entraîne des pertes, ce qui augmente la température dans différentes parties de la machine. Cette augmentation de température conduit à la diminution de rendement de la MAS, et aussi la dégradation de plusieurs composants constituant la machine asynchrone. Généralement, les parties les plus sensibles à l'échauffement sont les isolants (isolant d'encoche, vernis, les résines...etc.) et les roulements [14]. Donc il est nécessaire de faire une étude approfondie sur le comportement thermique des MAS, afin d'améliorer le rendement des machines asynchrones sous les sévères contraintes [15]. Pour faire l'étude thermique de la machine asynchrone, on utilise la modélisation qui a pour objectif de déterminer le comportement thermique de la machine qui est conforme à la répartition des pertes dans les parties de la machine.

Dans ce chapitre on va présenter la méthode nodale qui est utilisée pour calculer les différentes pertes.

II.1 Transfert thermique dans les moteurs électriques

Lorsque la MAS est en fonction elle émet des flux de chaleur répartie d'une façon irrégulière dans la machine, cette chaleur causée par les pertes internes se transfère par trois modes, sont :

- transfert de chaleur par conduction ;
- transfert de chaleur par convection ;
- transfert de chaleur par rayonnement.

II.1.1 Transfert de chaleur par conduction

La conduction est la propagation de la température d'un milieu chaud à un milieu froid, ce phénomène ne se réalise que dans les parties solides de machine, pour calculer la densité du flux de chaleur on utilise la loi de Fourier par la formule II.1 [14] [15]:

$$\vec{\varphi} = -\lambda \cdot \overrightarrow{grad}T \quad \text{II.1}$$

Où :

λ : est la conductivité thermique du matériau son unité est $[W.m^{-1}.K^{-1}]$.

II.1.2 Transfert de chaleur par convection

Est un mode de transfert de chaleur ou l'énergie thermique est transportée par la circulation d'un gaz ou un liquide, pour estimer la valeur du flux thermique de convection on utilise la loi de Newton formule II.2 [14] [15] :

$$\varphi_P = h \cdot (T_{paroi} - T_{réf}) \quad \text{II.2}$$

Où :

$-T_{ref}$: est la température de référence (température moyenne du fluide).

$-h$: est le coefficient de convection (coefficient d'échange) ; Il existe deux types de convection :

II.1.2.a. Une convection naturelle :

Dans ce type de convection, le transport de l'énergie thermique se fait sous l'effet de la variation de la masse volumique entre le fluide froid qui a une masse volumique supérieure à celle de fluide chaud, cette variation fait monter le fluide froid sous l'effet de la poussée d'Archimède [15]

II.1.2.b. Une convection forcée :

Dans ce type, l'écoulement du fluide est imposé par un ventilateur, une pompe en général c'est tous les dispositifs mécaniques qui peuvent influencer sur l'écoulement du fluide [16].

II.1.2.c. Calcul de coefficient d'échange « h » :

Dans le cas d'un transfert de chaleur par convection, il est nécessaire d'avoir comme donnée ou de déterminer le coefficient d'échange « h », il traduit les échanges de la température de milieu interne vers le milieu externe.

Pour déterminer « h » il faut savoir la nature de l'écoulement s'il est en régime turbulent ou laminaire, pour savoir la nature d'écoulement on calcule le nombre de Reynolds on le note [17] :

$$Re = \frac{V.L_c}{\nu} \quad \text{II.3}$$

Tels que :

V : vitesse de l'écoulement (m/s) ;

L_c : dimension caractéristique de l'écoulement (m) ; dans notre cas il représente la longueur axiale des ailettes.

ν : viscosité cinématique de fluide (m^2/s).

Il existe aussi des corrélations pour exprimer différents ou calculer « h » :

-pour la convection naturelle : $Nu = (Gr \cdot Pr)^n$

-pour la convection forcée: $Nu = b_g (Re^m Pr^n)$

Avec :

$-a_g$ et b_g sont des constantes dépendantes de la configuration géométrique et mécanique étudiée. [18]

$-Gr$: le nombre de Grashof,

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L_c^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \quad \text{II.4}$$

Avec :

g : Accélération due à la gravité ;

β : coefficient due à la dilatation ;

ΔT : Différence de températures ;

L_c : Longueur caractéristique

ρ : La masse volumique du fluide

μ : viscosité dynamique son unité ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

$-P_r$: est le nombre de Prandtl c'est nombre adimensionnel égale à :

$$P_r = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad \text{II.5}$$

Avec :

λ : La conductivité thermique ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) ;

C_p : la capacité thermique massique ($\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$).

Et que le nombre Nuslet ce calcul comme aussi suit :

$$N_u = \frac{hL_c}{\lambda} \quad \text{II.6}$$

II.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement thermique est un transfert de chaleur entre deux corps qui ne sont pas en contact, ce flux de chaleur passe de corps A au corps B par l'émission des ondes électromagnétique [19].

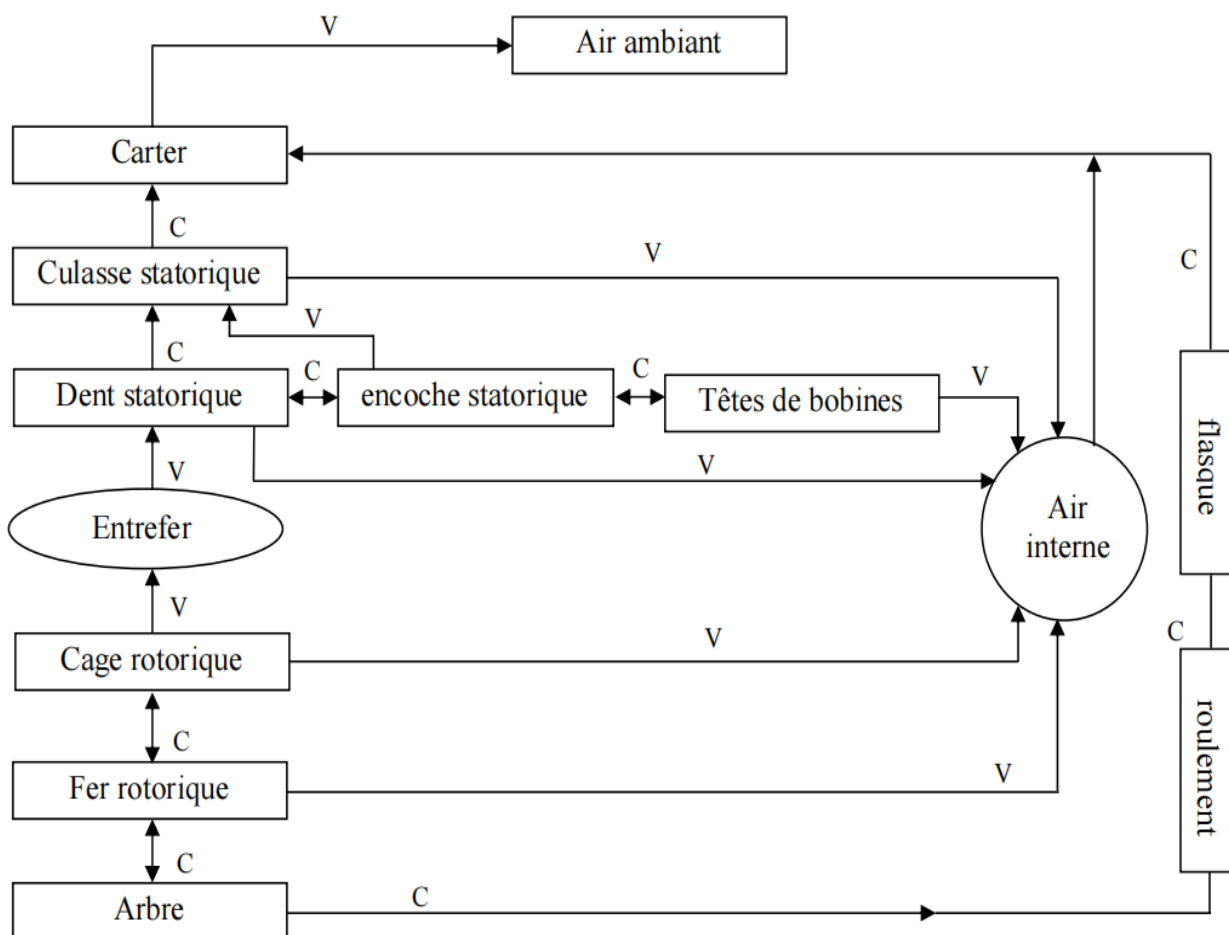


Figure II.1 : Le mode de transfert thermique présenter selon la partie de la machine(C : conduction, V : convection).

Parmi les exemples les plus connu de ce type d'échange thermique on cite la propagation des rayons émis par le soleil vers la terre due à la différence des températures (corps chaud vers les corps froids) et pour le cas d'un moteur la chaleur sera rayonné vers le milieu extérieur se forme des

radiations vers toutes les directions (de milieu interne chaud vers un milieu externe à une température ambiante).

II.2 Modélisation thermique des machines asynchrones

Pour la modélisation thermique des machines électriques, on utilise deux méthodes numériques : la méthode des éléments finis et la méthode nodale.

Dans notre travail on s'intéresse à la méthode nodale qui est la méthode la plus utilisée dans la modélisation thermique des moteurs asynchrones car elle est facile à utiliser et ne nécessite pas beaucoup de temps comparativement à la méthode des éléments finis.

II.2.1 Méthode nodale

La méthode nodale est une méthode traditionnelle qui consiste à schématiser la distribution de température dans la machine électrique en schéma analogique électrique-thermique, autrement c'est obtenir le comportement thermique de la machine (la distribution de la température) pendant un régime permanent ou transitoire sous forme d'un réseau thermique [19].

Dans le schéma obtenu les tensions sont équivalentes aux températures des nœuds, le flux thermique représente le courant électrique et les pertes remplacent la source électrique (du courant électrique) et la capacité thermique correspond aux capacités électriques.

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

Table II.1: Analogie thermoélectrique

II.2.2 Principe de la méthode nodale

Le principe de la méthode nodale consiste à découper le schéma obtenu en des éléments volumiques de volume V_i (volume élémentaire ou nœud), ces nœuds sont formés par une capacité thermique C_i et une source de chaleur P_i , les éléments sont isothermes voir figure ci-après [19]. On peut définir les conductances thermiques à partir de l'analogie établie entre deux grandeurs différentes, grandeur électrique et de grandeurs thermiques, le nœud connecté peut produire un échange de chaleur (φ) qu'on peut représenter par une loi qui relie la différence de température entre les deux nœuds et la conductance thermique G_{ij}

$$\varphi_{ij} = (T_j - T_i) \quad \text{II.7}$$

-i et j sont deux nœuds connectés entre eux.

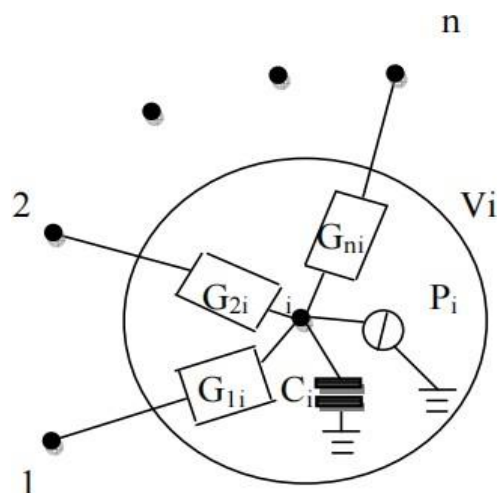


Figure II.2: volume élémentaire V_i de modèle nodale

II.2.3 Description de modèle nodale

La méthode nodale est basée sur le découpage de la machine a des éléments et chaque élément identifie par un nœud, dans la figure II.3 on présente un exemple de la décomposition en 5 bloc :

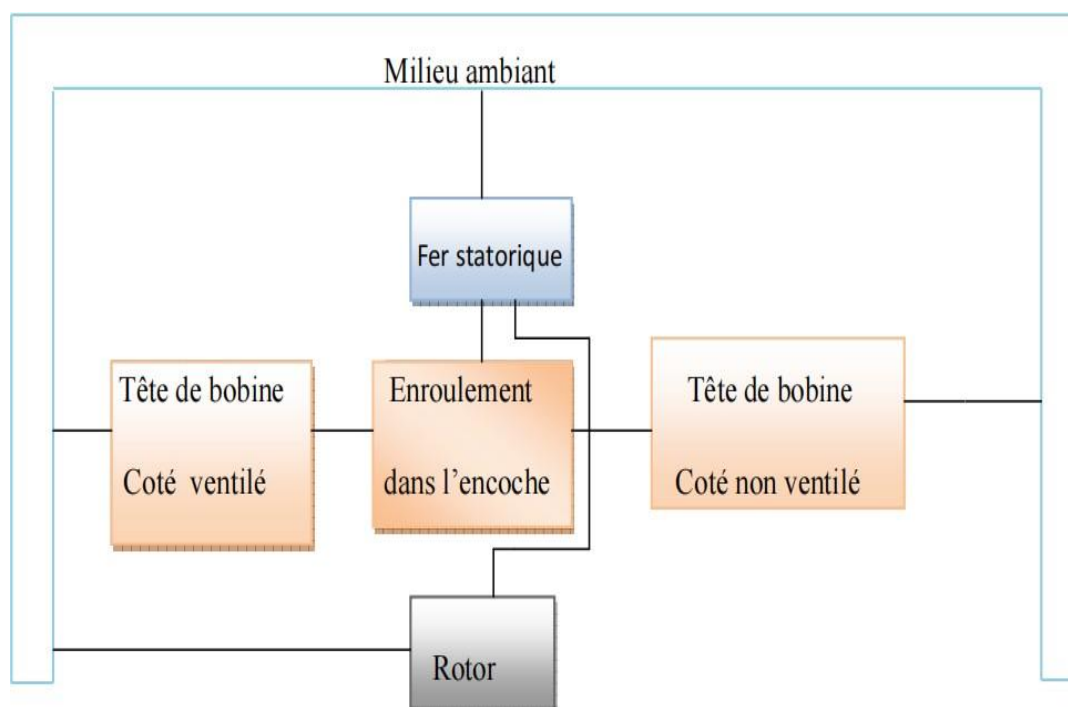


Figure II.3: Un exemple de découpage en 5 blocs

La géométrie de la machine peut se simplifier par un réseau thermique plus détaillé par la méthode nodale, chaque élément représenté par un nœud connu par sa capacité thermique et sa source de chaleur.

Dans la figure suivante on représente un réseau thermique d'une machine asynchrone :

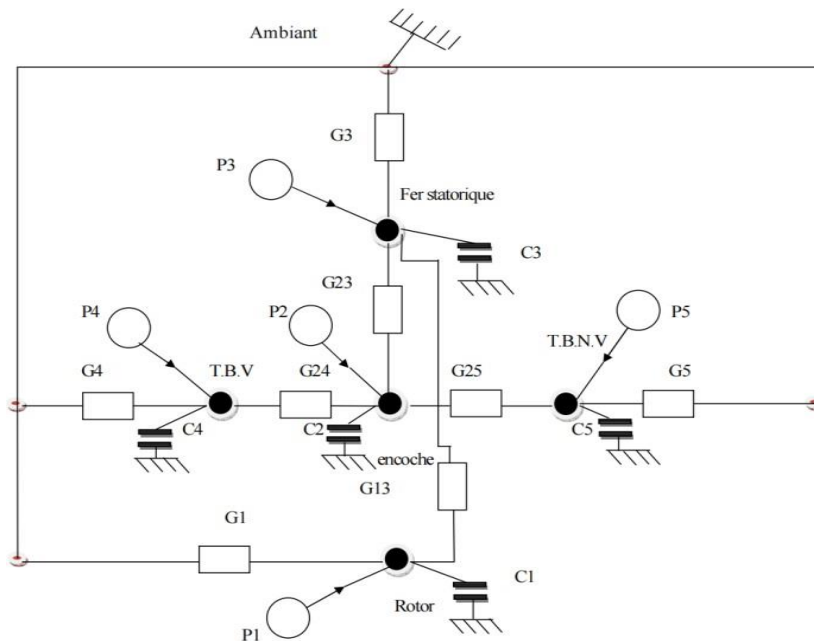


Figure II.4:Schéma simplifié de modèle nodale d'une machine asynchrone

Les pertes et les capacités thermique sont valorisées dans chaque nœud ce qui nous permettra d'écrire des équations différentielles correspondante à chaque nœud, et obtenir ensuite un système d'équations global qui étudie le comportement thermique de la machine asynchrone

✓ **Mise en équation du modèle nodale :**

Après avoir découpé l'ensemble de la machine en éléments, on écrit des équations de convention thermique correspondante à chaque nœud, les équations s'écrite comme suit :

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n G_{ij}(T_j - T_i) + p_i \tag{II.8}$$

Tels que :

- G_{ji} : la conductance thermique entre bloc i et j [$W \cdot C^{-1}$] ;
- T_j et T_i : les températures des blocs j et i respectivement ;
- C_i : La capacité thermique de bloc i [$J \cdot C^{-1}$] ;
- P_i : La chaleur générée de bloc i [W].

Avec :

$$C_i = P_i \cdot V_i \cdot c_i \tag{II.9}$$

- P_i :la masse volumique [Kg/m^3] ;
- V_i : Volume élémentaire de nœud i [m^3] ;
- c_i : La capacité massique [$J/Kg.C$].

On met l'équation II.8 sous forme matricielle on obtient :

$$[C] \left[\frac{dT}{dt} \right] = [G][T] + [P] \tag{II.10}$$

Dans un régime permanent on 'a : $\frac{dT}{dt} = 0$

CHAPITRE II Modélisation thermique des moteurs à induction

Ce que rend l'équation II.8 comme suit

$$\sum_j^n = G_{ij}(T_j - T_i) + P_i \quad \text{II.11}$$

Et la forme matricielle s'écrit comme suit dans le régime permanent :

$$[G][T] + [P] = 0 \quad \text{II.12}$$

Donc

$$[G][T] = -[P] \quad \text{II.13}$$

On calcule le vecteur des températures inconnues [T] à partir de II.13

$$[T] = -[G]^{-1}[P] \quad \text{II.14}$$

II.2.4 La résolution du système d'équation :

Pour résoudre les équations de système, il nous faut premièrement déterminer les conductances et les pertes thermiques, on utilise les propriétés de matériau constituant la machine et on utilise aussi des corrélations.

II.2.4.a. La détermination des conductances thermiques :

La conductance thermique se calcule à partir de la température obtenue dans le régime permanent et les pertes calculées en charge et à vide.

II.2.4.b. La détermination des pertes :

Les différentes pertes sont réparties et localisées dans différentes parties de la machine. Les pertes joules comme exemple sont présentes au niveau des enroulements statoriques et les cages rotoriques, les pertes fer se présentent au niveau des circuits magnétique rotorique et statorique pour les calculer il faut utiliser des méthodes théoriques et expérimentales [20].

II.2.4.c. La détermination des températures :

Pour calculer la température il faut tout d'abord calculer les conductances thermiques que, après il nous faut résoudre le système suivant pour avoir les valeurs de températures :

$$\begin{cases} P_1 = (G_{11} + G_{13}) T_1 - G_{13} T_3 \\ P_2 = (G_{23} + G_{24} + G_{25}) T_2 - G_{23} T_3 - G_{24} T_4 - G_{25} T_5 \\ P_3 = -G_{13} T_1 - G_{23} T_2 + (G_{13} + G_{23} + G_3) T_3 \\ P_4 = -G_{24} T_2 + (G_4 + G_{24}) T_4 \\ P_5 = -G_{25} T_2 + (G_5 + G_{25}) T_5 \end{cases} \quad \text{II.15}$$

On écrit l'équation II.15 sous forme matricielle on obtient :

$$\begin{bmatrix} (G_1 + G_{13}) & 0 & -G_{13} & 0 & 0 \\ 0 & (G_{23} + G_{24} + G_{25}) & -G_{23} & -G_{24} & -G_{25} \\ -G_{13} & -G_{23} & (G_{13} + G_{23} + G_3) & 0 & 0 \\ 0 & -G_{24} & 0 & G_{24} & G_4 \\ 0 & -G_{25} & 0 & 0 & G_{25} + G_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} \quad \text{II.16}$$

À partir de l'équation II.16 on obtient :

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (G_1 + G_{13}) & 0 & -G_{13} & 0 & 0 \\ 0 & (G_{23} + G_{24} + G_{25}) & -G_{23} & -G_{24} & -G_{25} \\ -G_{13} & -G_{23} & (G_{13} + G_{23} + G_3) & 0 & 0 \\ 0 & -G_{24} & 0 & G_{24} & G_4 \\ 0 & -G_{25} & 0 & 0 & G_{25} + G_5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} \quad \text{II.17}$$

II.2.5 Les équations du modèle nodale en régime transitoire :

Pour avoir l'équation du modèle nodale en régime transitoire on développe l'équation II.12 en utilisant l'équation II.11 [20].

$$\begin{cases} P_1 = C_1 \frac{dT_1}{dt} + G_1 T_1 + G_{13}(T_1 - T_3) \\ P_2 = C_2 \frac{dT_2}{dt} + G_{23}(T_2 - T_3) + G_{24}(T_2 - T_4) + G_{25}(T_2 - T_5) \\ P_3 = C_3 \frac{dT_3}{dt} + G_{13}(T_3 - T_1) + G_{23}(T_3 - T_2) + G_3 T_3 \\ P_4 = C_4 \frac{dT_4}{dt} + G_{24}(T_4 - T_2) + G_4 T_4 \\ P_5 = C_5 \frac{dT_5}{dt} + G_{25}(T_5 - T_2) + G_5 T_5 \end{cases} \quad \text{II.18}$$

Après réarrangement on obtient II.19

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{C_1} (P_1 - G_1 T_1 - G_{13}(T_1 - T_3)) \\ \frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{C_2} (P_2 - G_{23}(T_2 - T_3) - G_{24}(T_2 - T_4) - G_{25}(T_2 - T_5)) \\ \frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{C_3} (P_3 - G_{13}(T_3 - T_1) - G_{23}(T_3 - T_2) - G_3 T_3) \\ \frac{dT_4}{dt} = \frac{1}{C_4} (P_4 - G_{24}(T_4 - T_2) - G_4 T_4) \\ \frac{dT_5}{dt} = \frac{1}{C_5} (P_5 - G_{25}(T_5 - T_2) - G_5 T_5) \end{cases} \quad \text{II.19}$$

Cette équation II.19 s'écrit en forme matricielle comme suit [10] tel que $\frac{dT_i}{dt} = \dot{T}_i$

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{T}_4 \\ \dot{T}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix}$$

$$[C]^{-1} \begin{bmatrix} (G_1 + G_{13}) & 0 & -G_{13} & 0 & 0 \\ 0 & (G_{23} + G_{24} + G_{25}) & -G_{23} & -G_{24} & -G_{25} \\ -G_{13} & -G_{23} & (G_{13} + G_{23} + G_3) & 0 & 0 \\ 0 & -G_{24} & 0 & G_{24} & G_4 \\ 0 & -G_{25} & 0 & 0 & G_{25} + G_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} \quad \text{II.20}$$

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre on a expliqué les trois modes de transfert de chaleur dans les machines asynchrones, ensuite on a présenté la méthode nodale, on constate qu'elle est une méthode simple a utilisé mais pour plusieurs calculs en même temps vont mieux les faire avec les logiciels spécialisés dans ces types de calcul.

CHAPITRE III

Simulation & discussion

Introduction

L'étude de comportement thermique d'un moteur est une étude très importante qui n'est pas moins importante que l'étude mécanique et électromagnétique, il est souvent difficile de prédire et calculer les résultats de performances thermiques. Mais maintenant grâce au logiciel Conception Assistée par Ordinateur (CAO) de construction mécanique il est facile de faire une analyse thermique on obtient des résultats de calcul plus précises et dans des délais records. Ces logiciels sont un grand avantage dans ce qui concerne l'amélioration des performances et le rendement de moteur. Par l'usage de logiciel (CAO) nous avons la possibilité de prévoir la performance soit thermique ou électrique et électromagnétique d'un moteur avant même le fabriqué on fait des essaye théorique sur le modèle voulu à concevoir. Dans notre étude on utilise le logiciel Motor-CAD qui est un logiciel de conception, donc dansce chapitre on va donner quelques techniques pour modéliser un moteur et voir aussi les interfaces qu'on utilise pendant notre étude d'analyse thermique de moteur induction.

III.1 Logiciel Motor-CAD

Motor-CAD est un logiciel avancé dédié à la conception des moteurs et l'analyse thermique et électromagnétique des moteurs électriques et des générateurs.

Motor-CAD donne au concepteur la possibilité de choisir entre plusieurs types de moteur comme : les motrices inductions (MI), moteur (BMP) (à aimant permanent sans balais, moteur a rotor externe), les machine à courant continu et les machines synchrones...

Motor-CAD permet de comparer le modèle de moteur conçu à des prototypes intégrés dans le logiciel par des experts.

Motor-CAD permet d'évaluer les performances de moteur, l'efficacité énergétique et aide à réduire le coût de la machine.

Motor-CAD fournit la capacité d'évaluer les pertes de la machine d'une façon rapide et avec une grande exactitude.

Motor-CAD intègre une large liste de méthode de refroidissement Forcée, naturel et d'autre.

Motor-CAD calcule automatiquement les capacités et les résistances thermiques d'un modèle à partir des propriétés matérielles et géométriques du moteur.

Motor-CAD contient quatre modules pour faciliter les calculs : Emag, Therm, Mech et Lab.

-**Emag**(électromagnétique) : est un module des éléments finies qui est pour prévoir et évaluer les performances électriques et électromécaniques des moteurs.

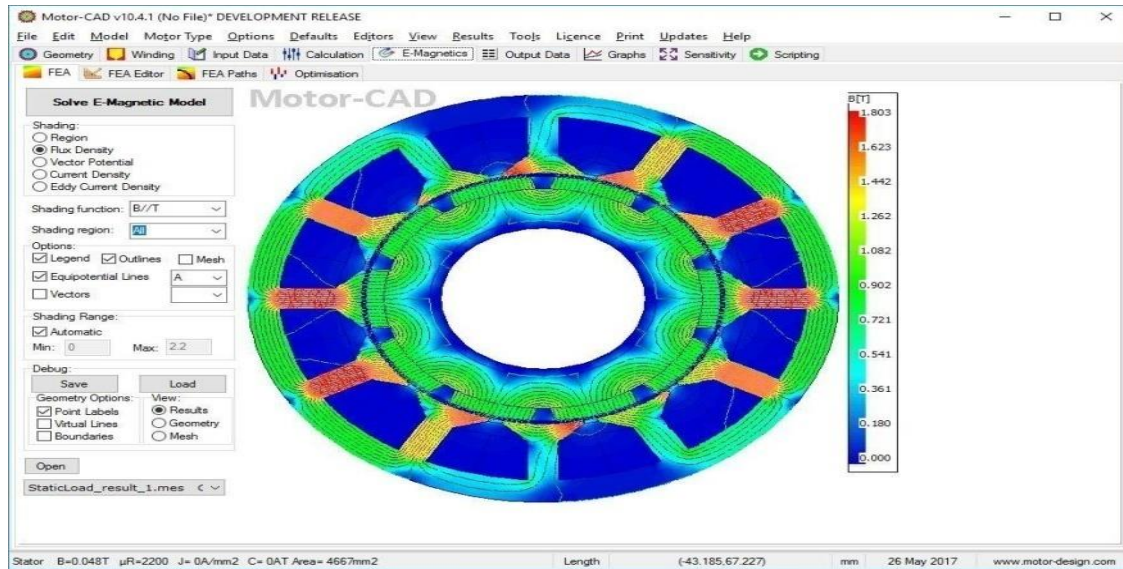


Figure III.1 : Résultat électromagnétique obtenu par Motor-CAD [21].

-Therm(thermique) : est un module qui permet de calculer la température de moteur au niveau de différents composants dans les conditions donnée par le concepteur.



Figure III.2 : Résultats thermiques obtenus par Motor-CAD (régime transitoire) [21].

-Lab : est un module qui fonctionne en parallèle avec les deux module précédent (Emag et Therm), il permet l'évaluation virtuelle de la machine pendant son usage, il fournit aussi une carte d'efficacité qui combine entre le couple et la vitesse

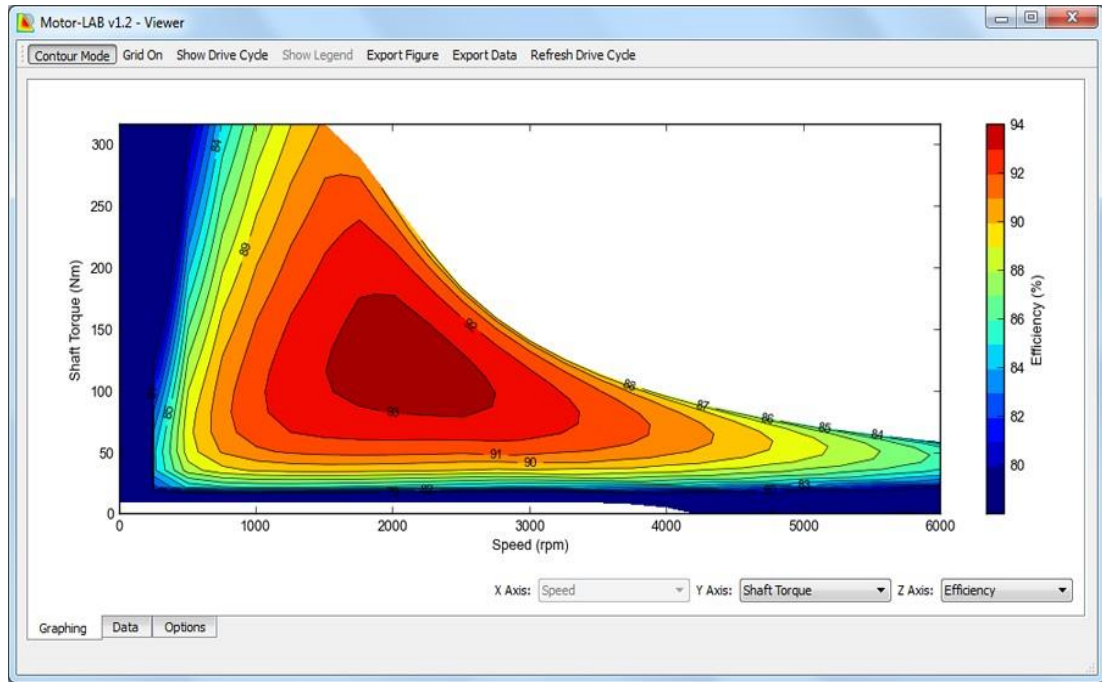


Figure III.3 : Carte d'efficacité (Lab) Motor-CAD [21].

-Mech (Méchanical) : est un module mécanique qui sert à analyser les contraintes d'un rotor selon un modèle mécanique [12].

III.1.1 Usage de Motor-CAD

Le Motor-CAD contient beaucoup d'outils utilisés dans la conception et le calcul, tout d'abord on va donner une description de la section radiale afin de connaître comment s'affiche les composants dans l'interface (figure III.4). Première étape dans la conception consiste à définir le type du moteur qu'on veut réaliser, on appuie sur l'onglet motor type pour choisir le type de moteur soit (moteur induction MI, BMP, SYNCH... etc.).

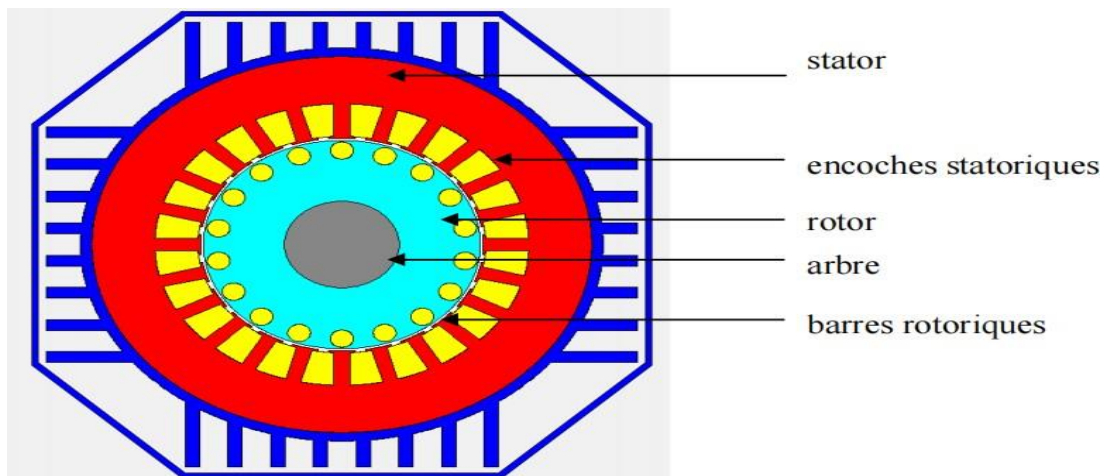


Figure III.4 : Description de section radiale de motor-cad

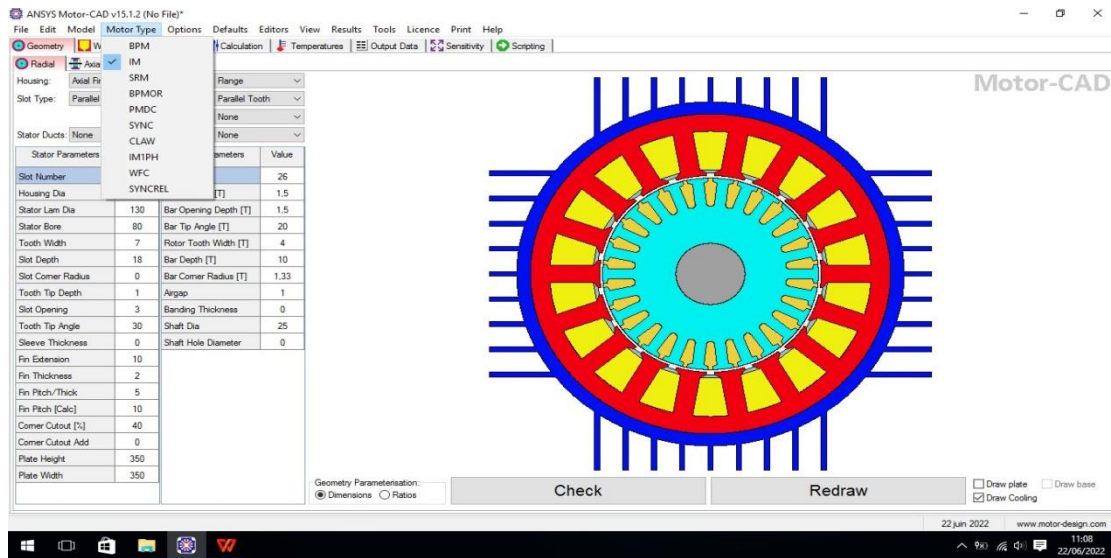


Figure III.5 : interface Motor-CAD (type de Moteur)

On commence notre conception par la géométrie de moteur, premièrement on définira les paramètres radiaux de moteur. Donc nous allons à l’onglet geometry (radial).

Dans cette interface nous voyons à droite de l’écran les principaux composants de moteur : type de rotor et type de fente, à gauche de l’écran s’affiche notre modèle de moteur conçu, en bas on trouve les paramètres de dimensionnement de rotor et de stator, et les paramètres de ventilation.

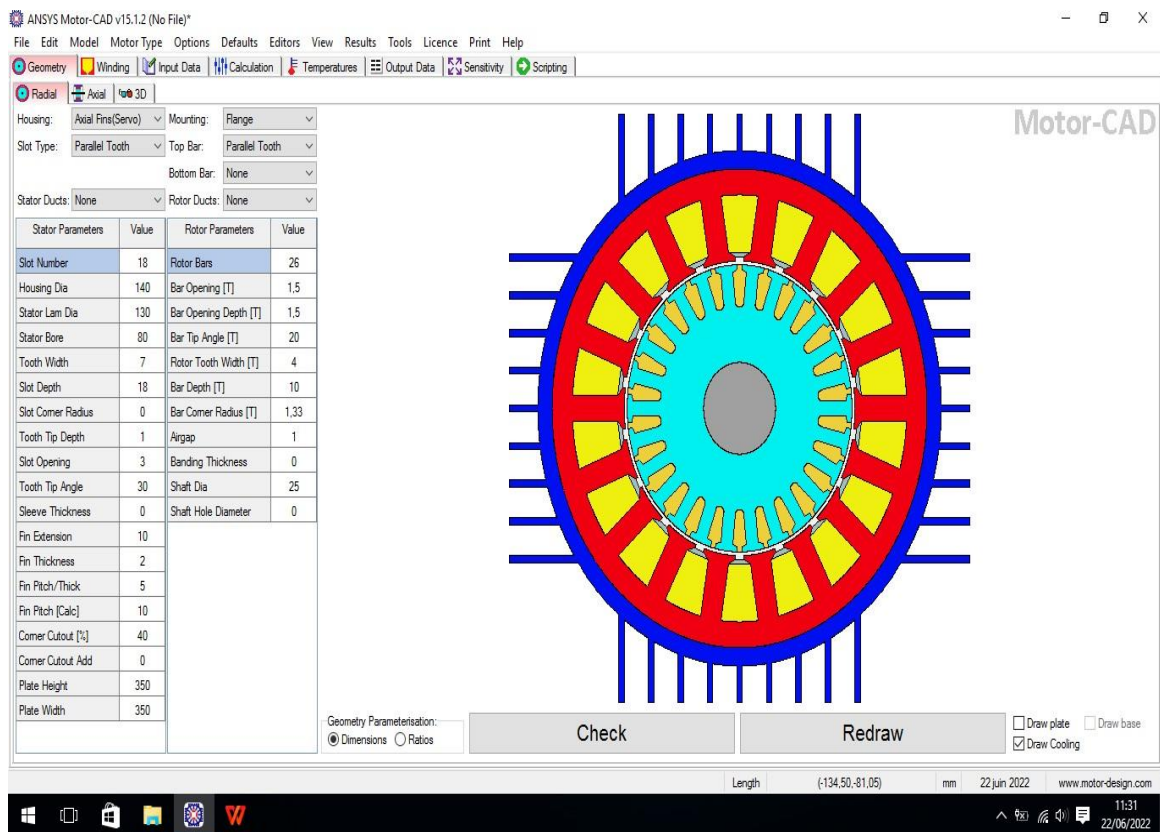


Figure III.6 : Géométrie radiale d’un moteur

Après qu'on a défini les paramètres axiaux de moteur nous dirigeons vers l'onglet geometry axial pour choisir les conduits radiaux, le montage d'un ventilateur, le type d'arbre.

Nous pouvons aussi déterminer les dimensions des enroulements extrémité et la segmentation des aimants.

La géométrie axiale est utilisée pour l'analyse thermique des moteurs, et la géométrie radiale utilisée pour l'analyse mécanique et électromagnétique et structurelle.

L'onglet geometry contient aussi une vue 3D qui sert à visualiser et vérifier le modèle de moteur conçu, et aussi elle permet d'enregistrer des vidéos d'animation.

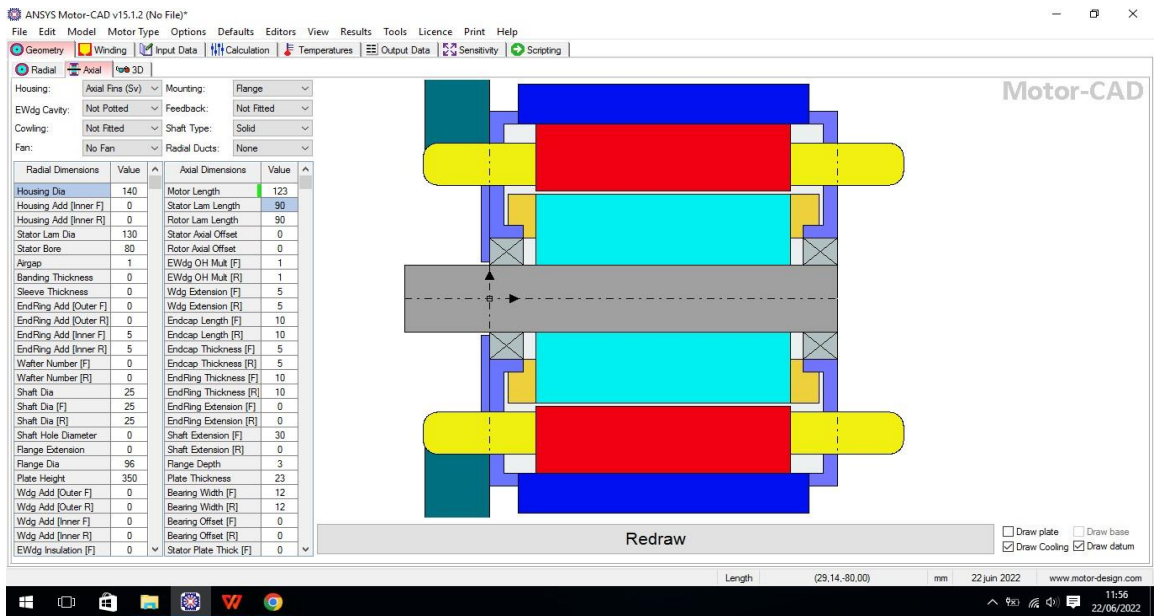


Figure III.7 : géométrie axiale d'un moteur

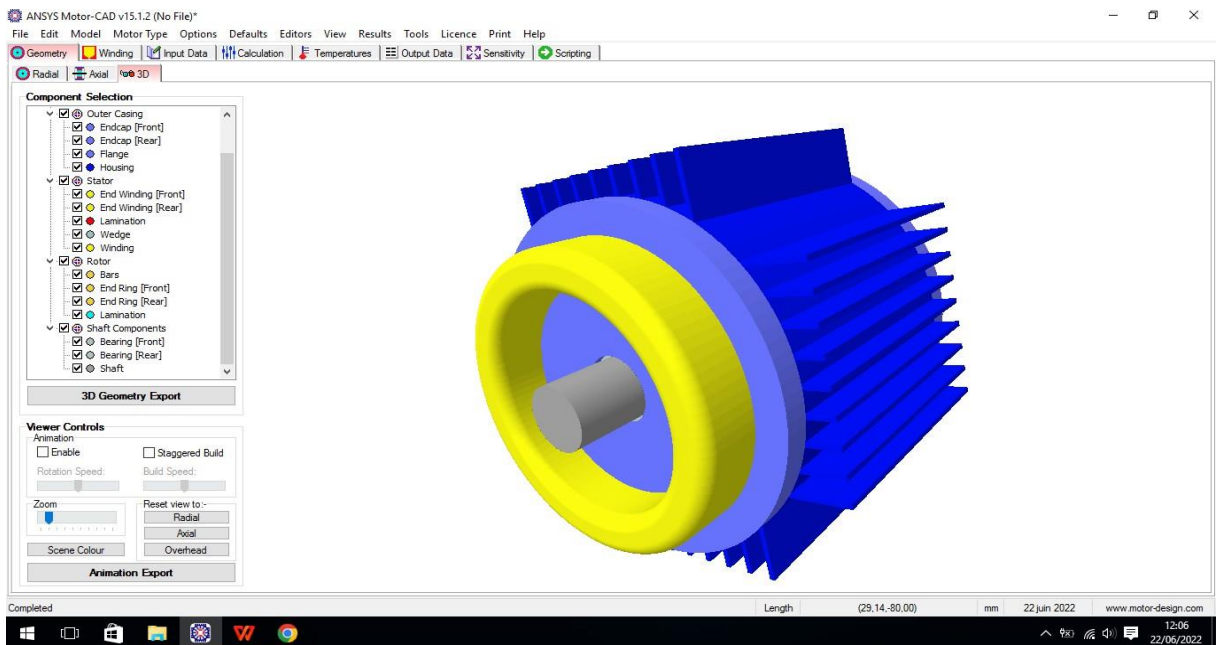


Figure III.8 : Vue 3D d'un moteur

Lorsqu'on termine la conception de notre modèle de moteur nous sélectionnons l'onglet winding (pattem) pour vérifier le bruit de notre moteur pour cela il faut que nous déterminions le nombre de phase, le nombre parallèle, le chemin et le nombre de tours à modéliser.

Ensuite on peut consulter chaque phase d'une façon indépendante en appuyant sur la phase qu'on nous voulons voir et on peut aussi saisir nos données (dimensions) des bobines.

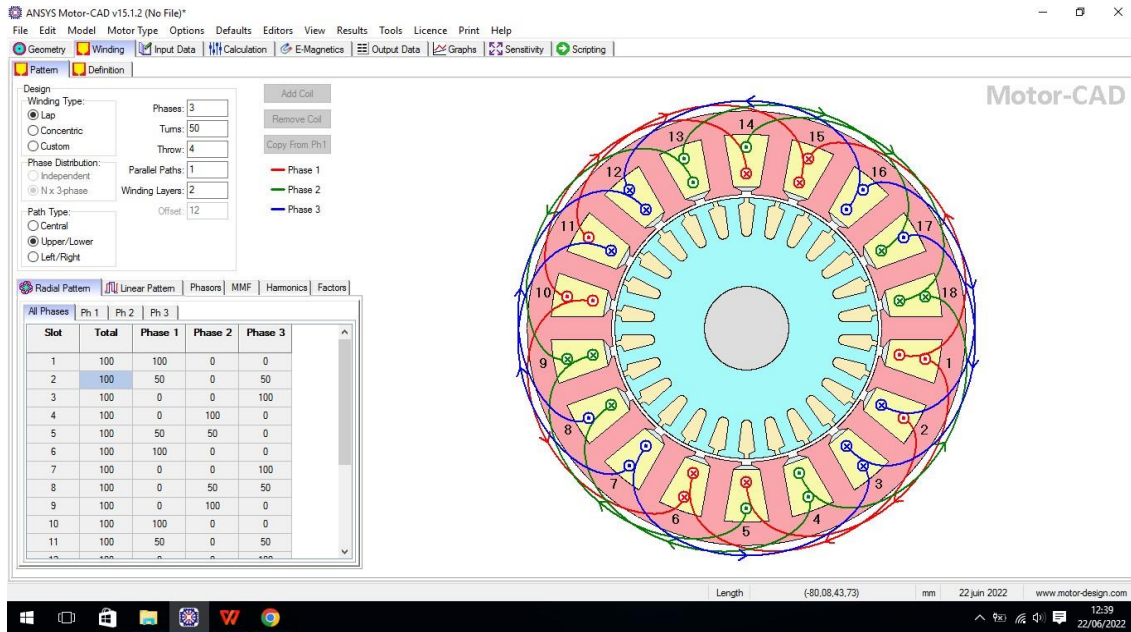


Figure III.9 : Modèle d'enroulement.

Le résultat obtenu de modèle radiale modélisé est accompagné d'autre informations comme : Les modèles linaires, les phases d'enroulements, les harmoniques et les MMF, ce qui nous aide à déterminer l'inductance des fuites de moteur et les facteurs d'enroulements.

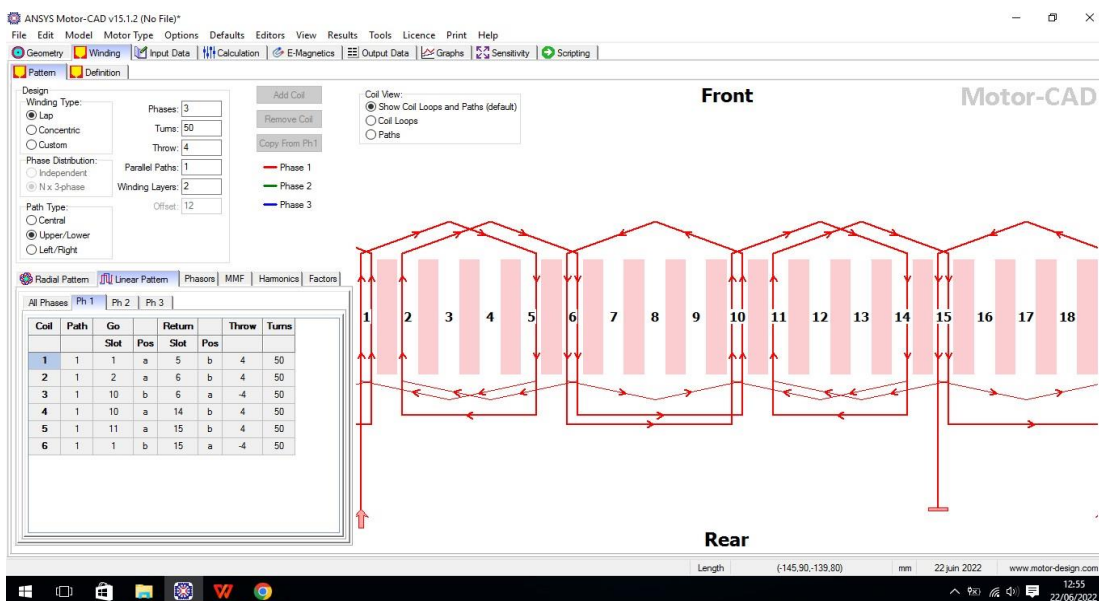


Figure III.10: Le modèle linare

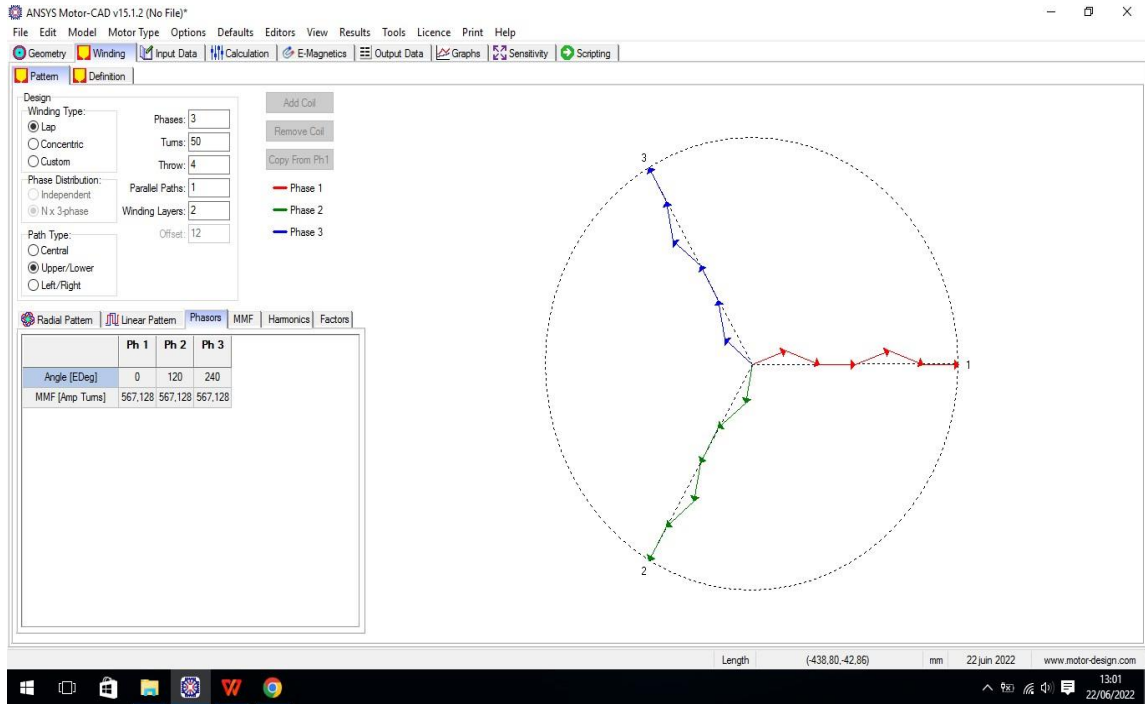


Figure III.11: Les phases d'enroulement

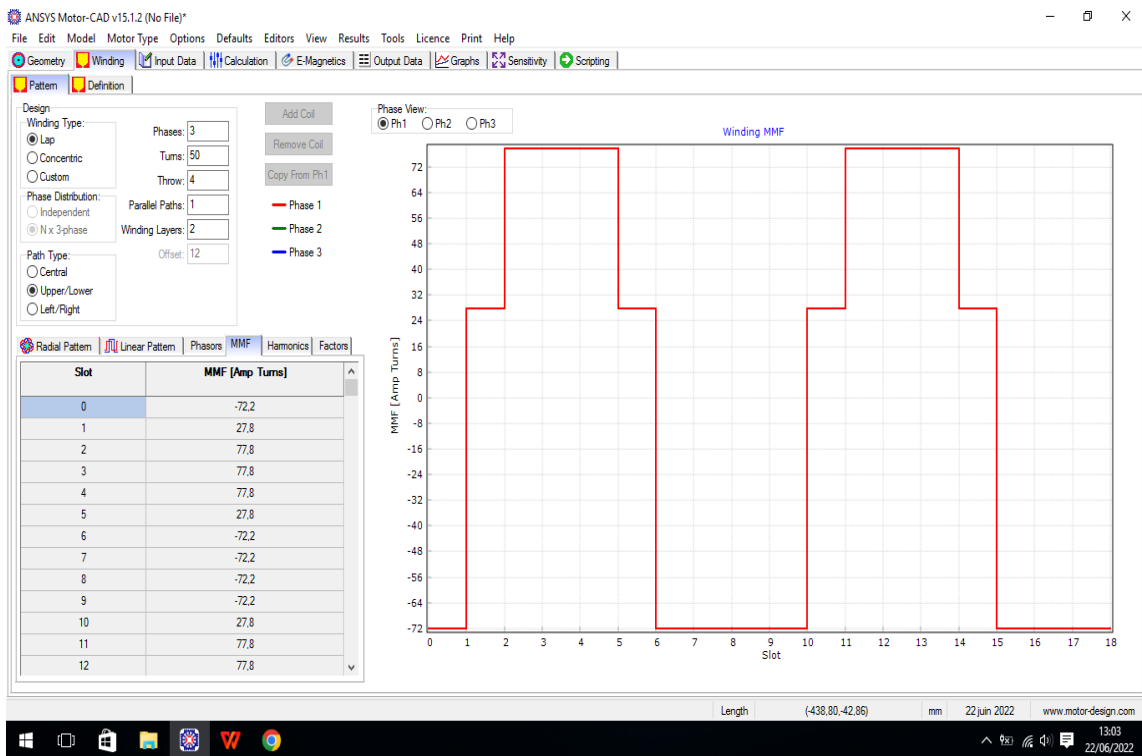


Figure III.12: enroulement MMF

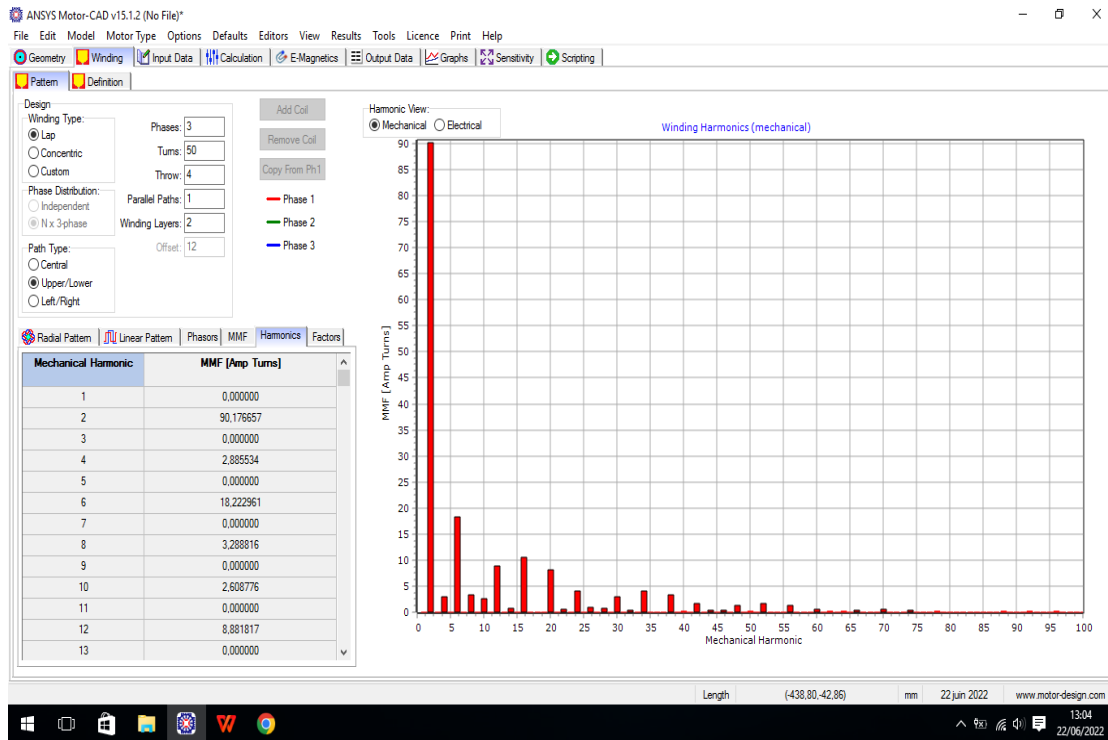


Figure III.13: Les harmoniques

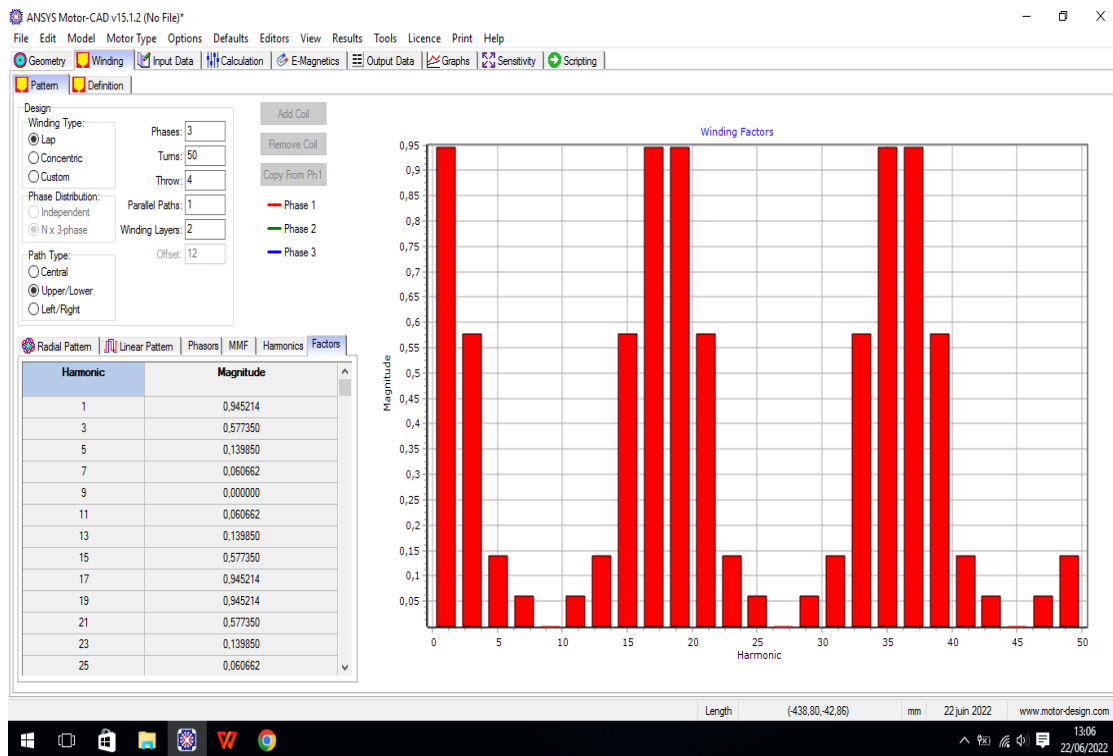


Figure III.14 : Les facteurs d'enroulement

Ensuite en allant vers définition d'enroulement (winding-définition) pour régler les paramètres de remplissage des fentes du fil et la zone de fonte.

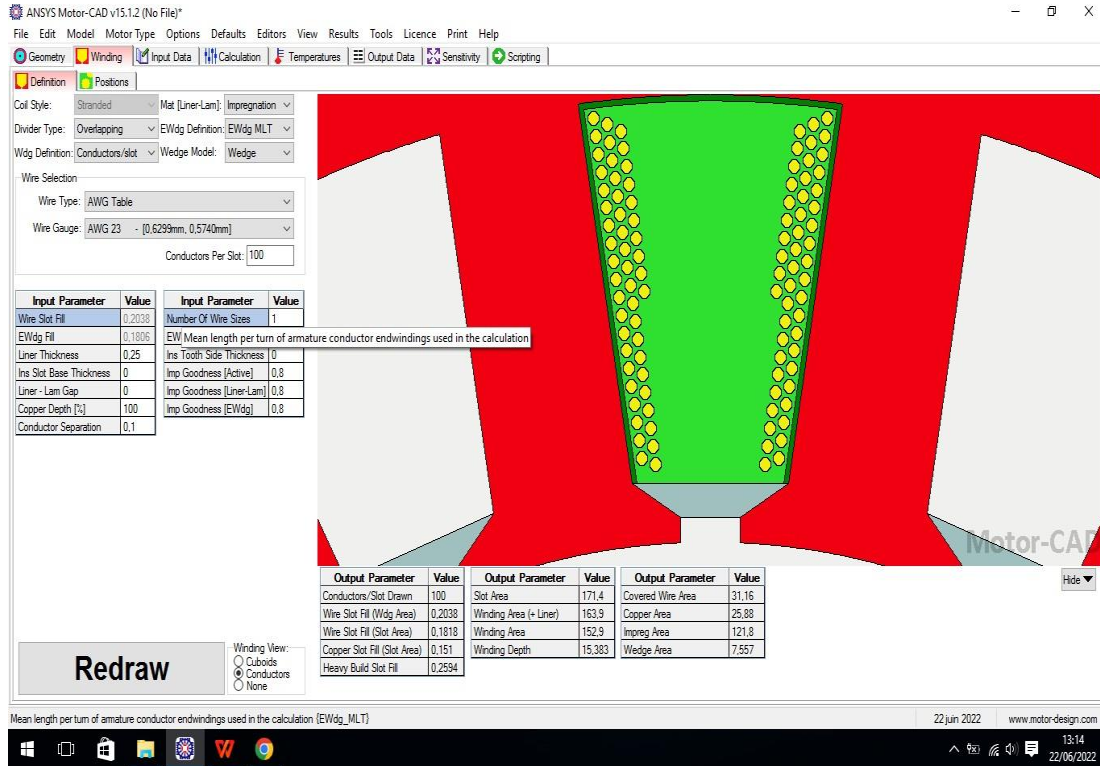


Figure III.15 : Définition d'enroulement

Après avoir confirmé la géométrie et définir les différents paramètres géométriques nous déplaçons ensuite vers l'onglet les données d'entrée (input data).

Premièrement, dans l'onglet refroidissement (cooling) on peut sélectionner le type de refroidissement et le type de refroidissement on dessous (motor orientation) on peut définir l'orientation de l'arbre soit vers le haut, bas ou horizontale.

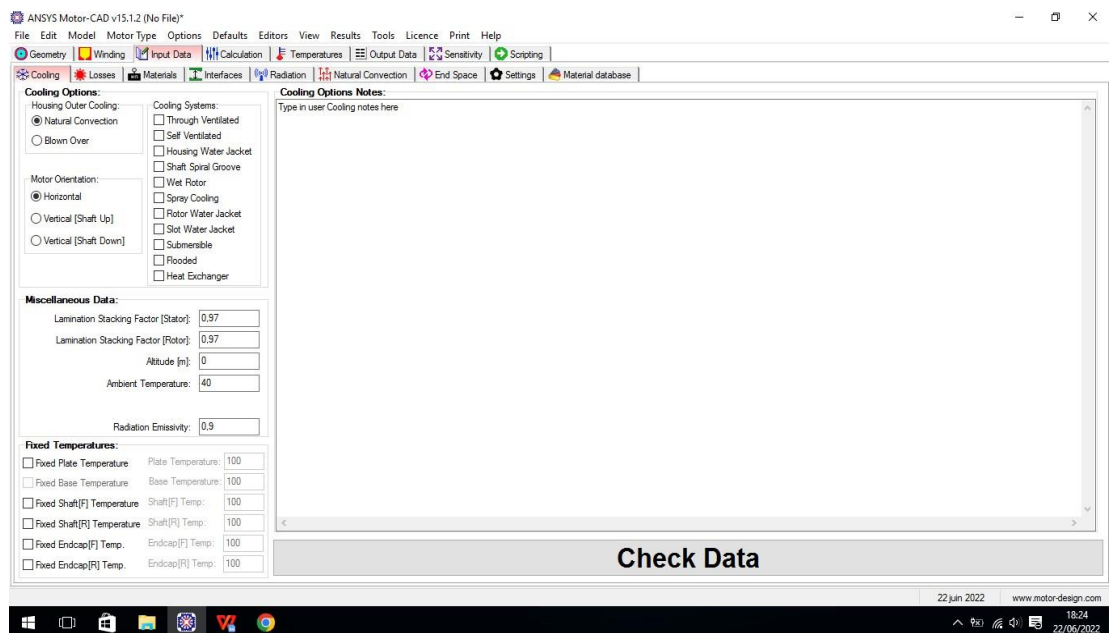


Figure III.16 : Système de refroidissement

Ensuite, nous allons définir les coefficients et les puissances des pertes d'entrée comme les Pertes des paliers, les pertes dans les dents de rotor et les pertes dans les dents de stator...etc. À gauche de l'onglet perte nous voyons la distribution des pertes dans les zones de fente, on sélectionne la zone et on définit le nombre des répartitions des enroulements.

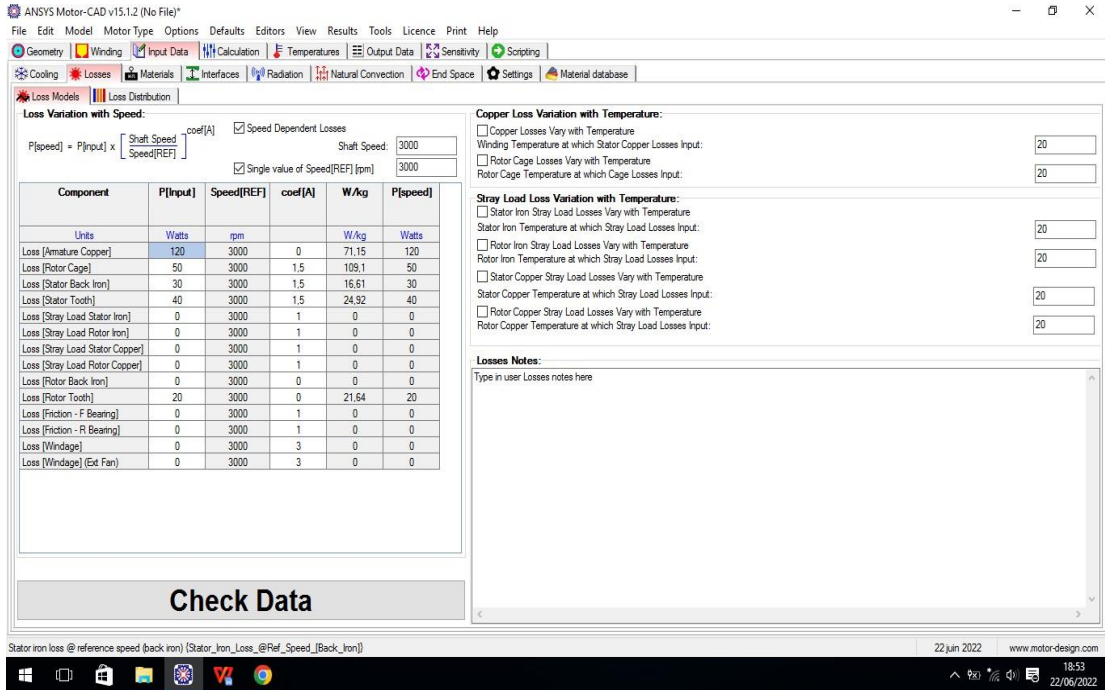


Figure III.17: Le modèle des pertes

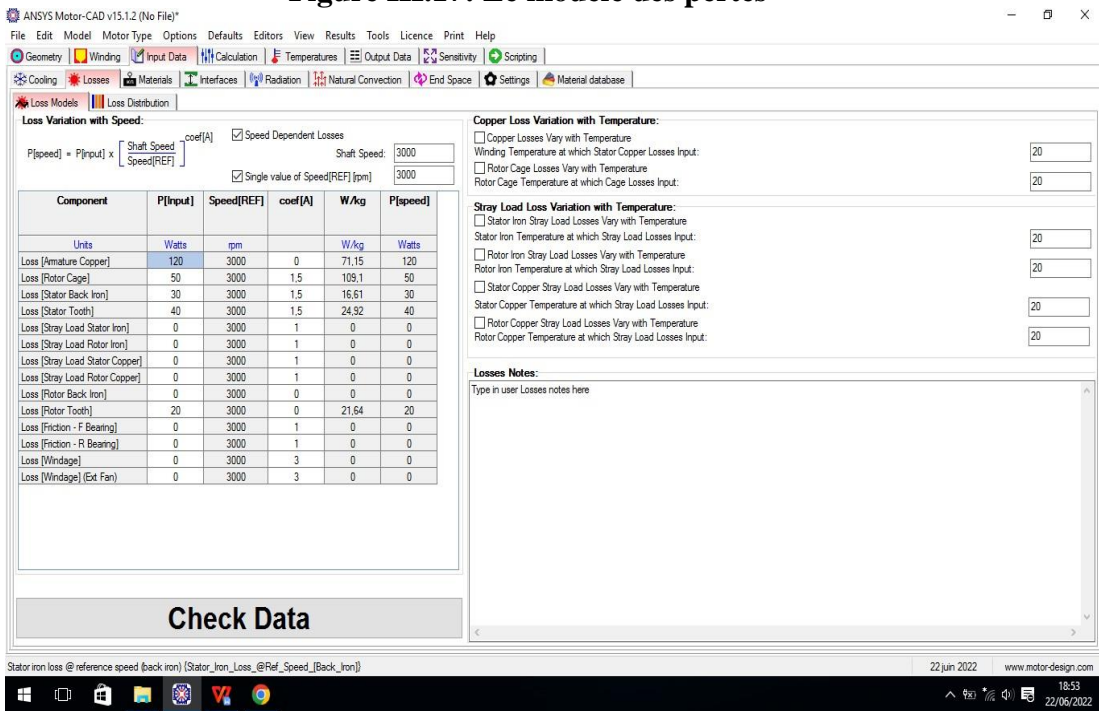


Figure III.18 : La répartition des pertes

Après avoir vérifié ou saisi les pertes d'entrée nous allons définir le type de matériau utilisé pour chaque composant de moteur (palier, enroulement, rotor et stator...etc.).

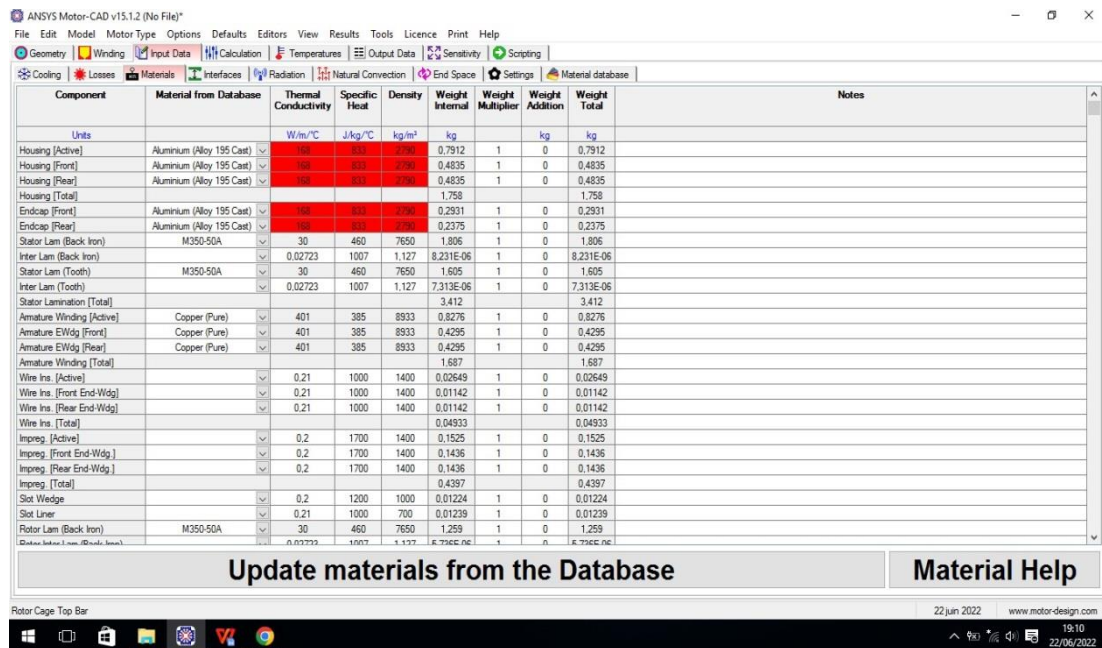


Figure III.19 : Choix de matériau

Si nous voulons utiliser un matériau qui ne figure pas dans l’onglet matériau nous allons vers l’onglet matériau database-solide nous remplissons l’ensemble des informations et des données tels que le coefficient de conductivité thermique, la chaleur spécifique et la densité.

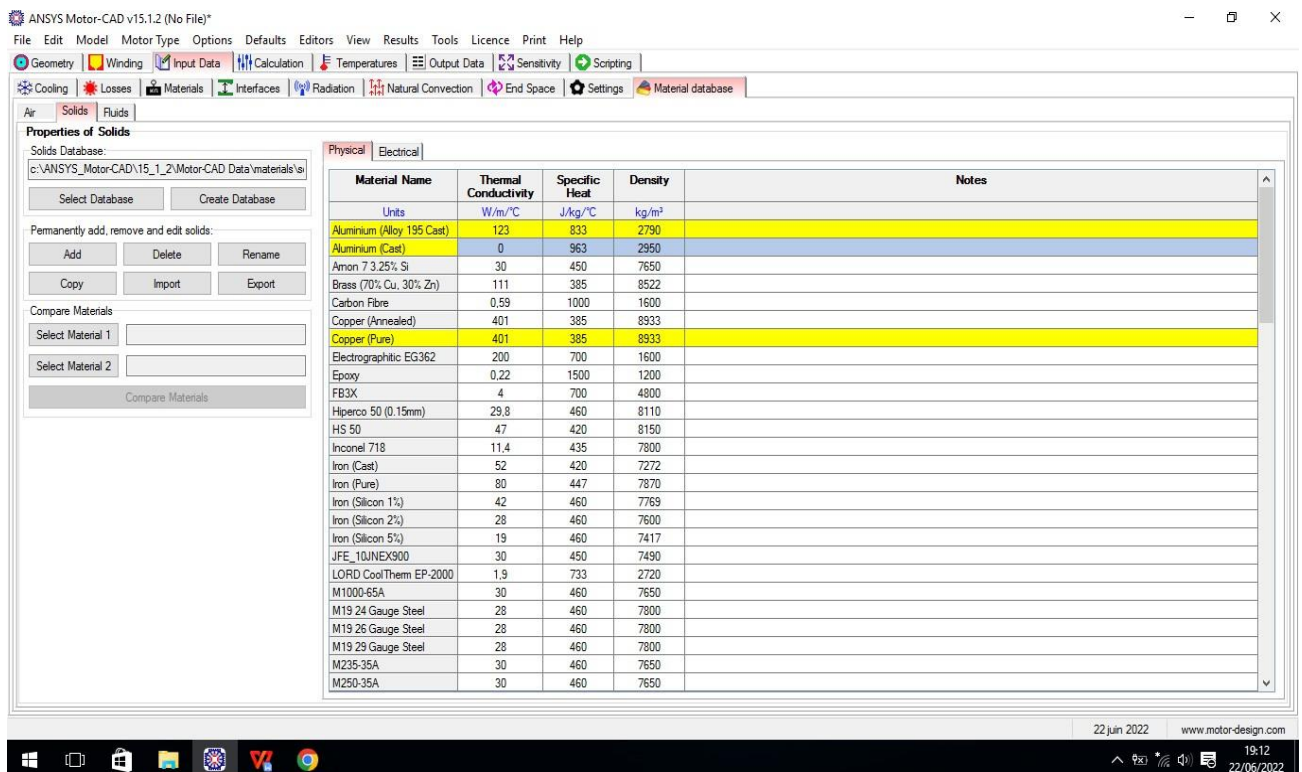


Figure III.20 : L’addition d’un matériau spécifique

Une fois qu’on a terminé la vérification et la modulation de la géométrie nous pouvons aller à l’onglet calculation pour faire nos calculs, dans cette étape nous allons définir la vitesse de l’arbre et le type de régime de calcul.

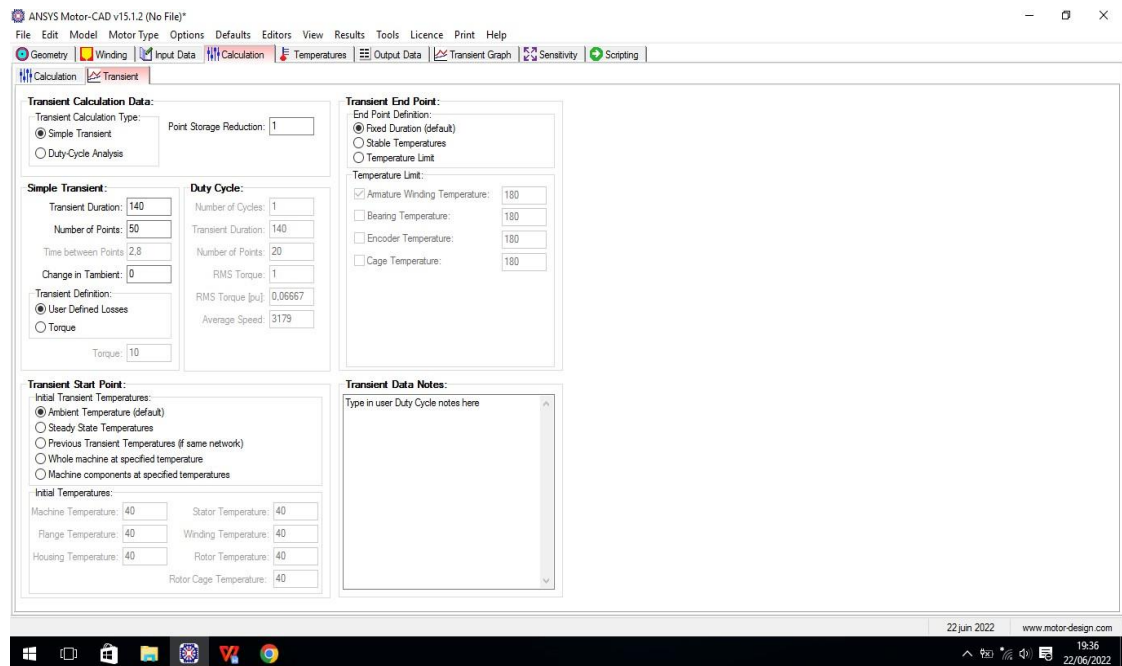


Figure III.21 : Définir les paramètres de régime transitoire

Mais avant de lancer les calculs nous allons sélectionner le type, la durée de transition et le nombre de point de diagramme et en bas on va définir la transition soit on coche la définition des pertes ou le couple.

Pour faire le calcul en appuyant sur résoudre le modèle thermique (solve thermal model).

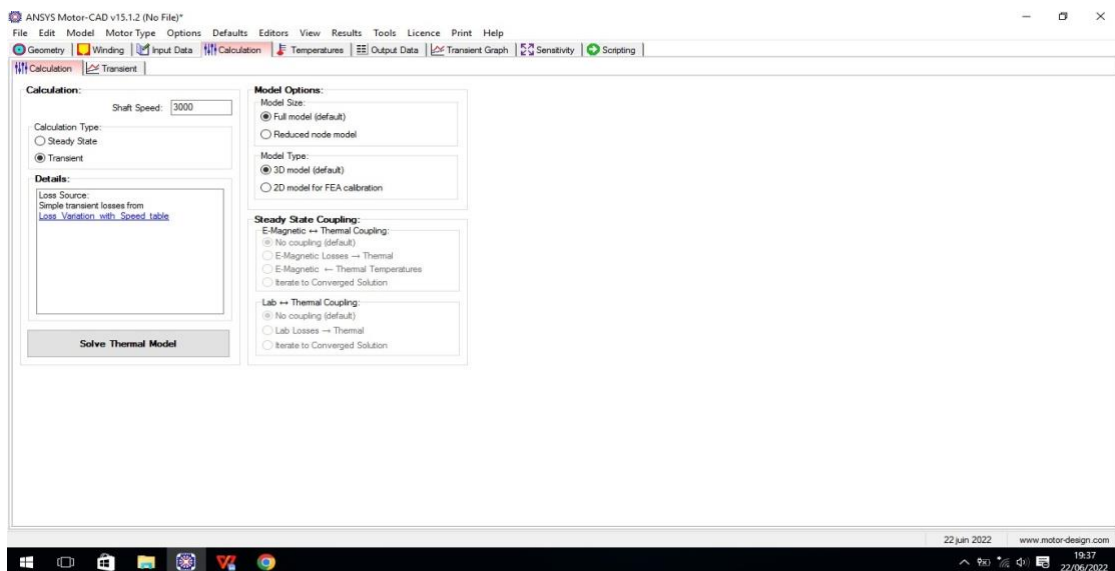


Figure III.22 : Paramètres de calcul

Il est recommandé de sélectionner le mode transitoire pour avoir des résultats durant toute la période d'essai de moteur non pas dans le régime permanent seulement.

Lorsqu'on lance le calcul on obtient dans quelques secondes les résultats sous forme de graphes température en fonction de temps, à gauche s'affiche les symboles de chaque diagramme avec une couleur, chaque symbole colorie correspond à une température d'un composant.



Figure III.23 : Graphe de température de chaque composant constituant le moteur.

On peut voir aussi le diagramme des puissances en fonction de temps, nous appuyons donc sur l'onglet power :



Figure III.24: Diagramme des puissances

Dans l'onglet températures on trouve notre schéma réseau thermique, chaque composant a une couleur et une forme spécifique, à côté de chaque composant on lit sa température. [Annexe B]

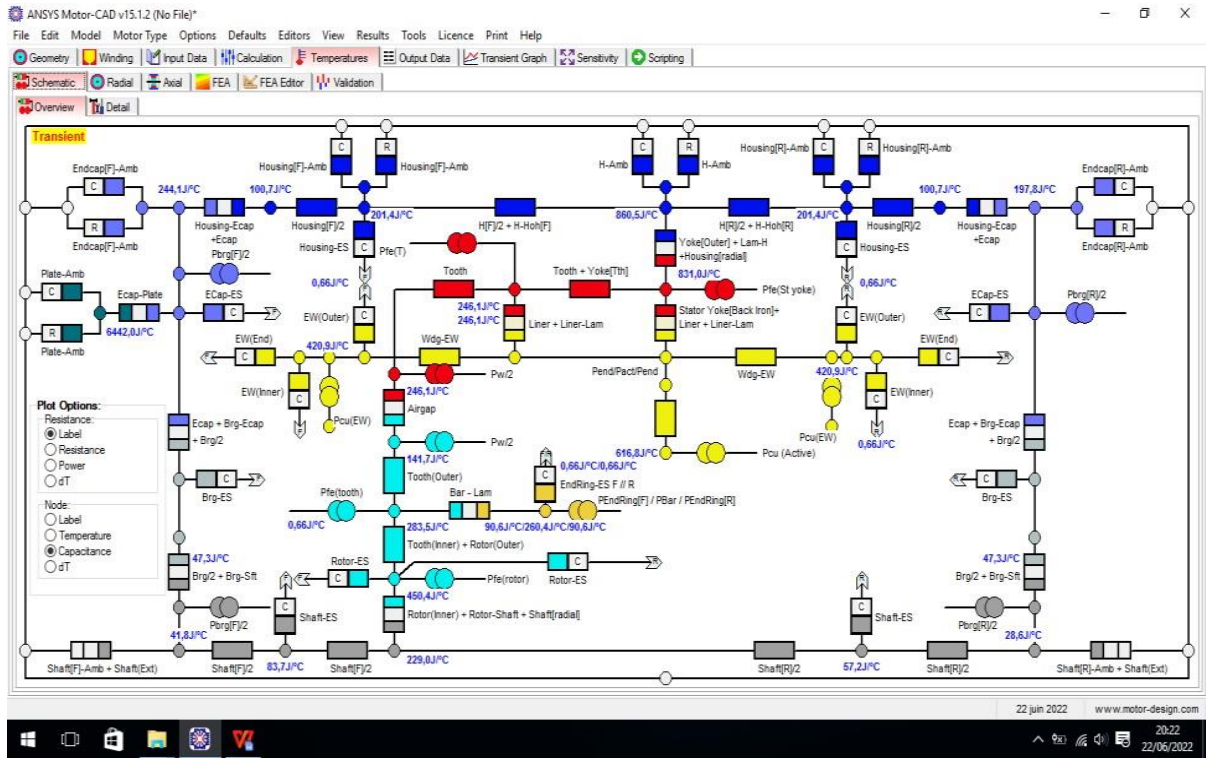


Figure III.25 : Schéma de réseau thermique de moteur

À gauche se trouve un schéma plus détaillé on peut choisir les grandeurs qui s'affichent on les sélectionne, et pour les grandeurs à droite de l'écran soit elles représentent des valeurs de grandeurs des composants de moteur comme : résistance, puissance...etc.

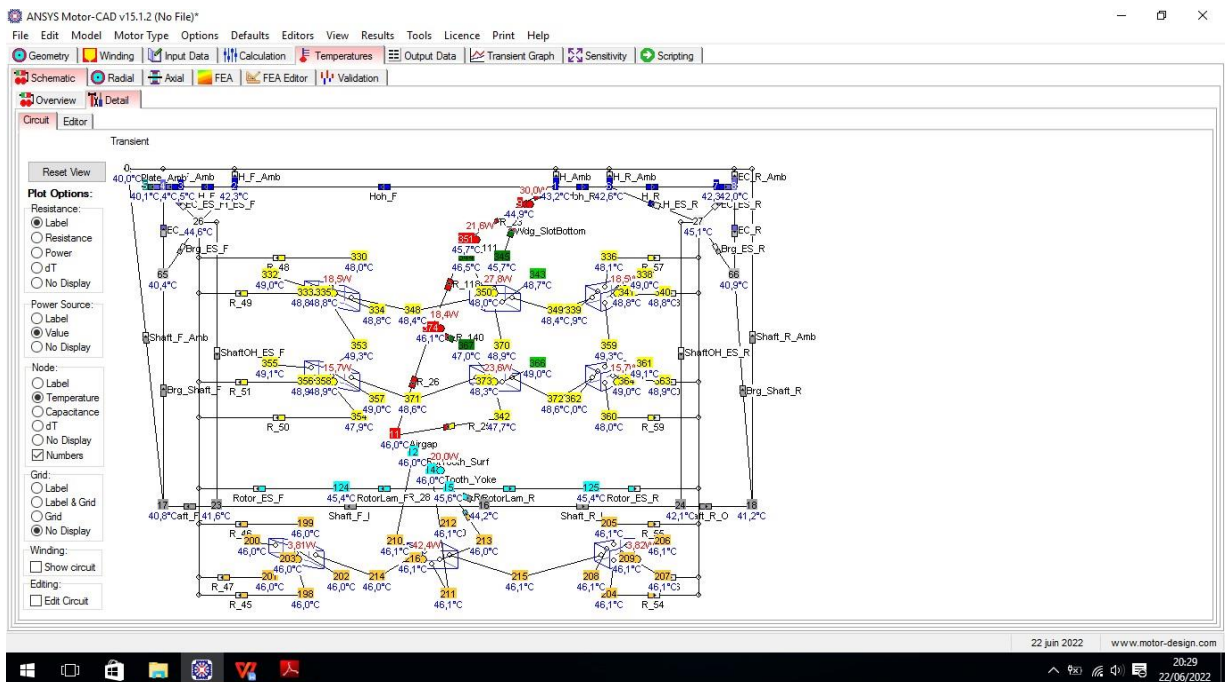


Figure III.26: Schéma détaillé de réseau thermique

Ce qui est essentiel dans ce travail c'est de présenter les pertes qui sont la source des températures libérées par chaque composant, pour cela nous allons à l'onglet output Data qui signifie les données de la sortie, ensuite nous trouverons l'onglet losses (pertes)

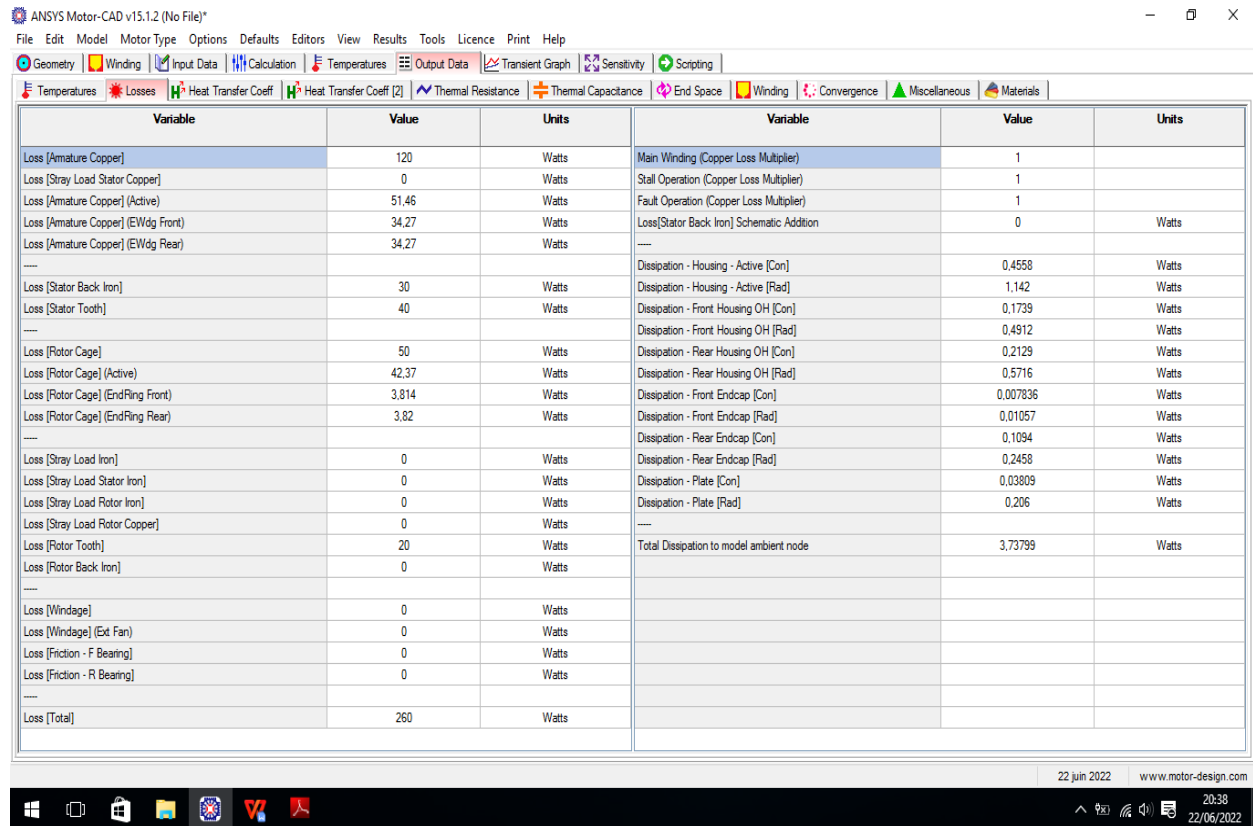


Figure III.27: Les pertes thermiques de moteur

Dans cette figure au-dessus on peut lire toutes les valeurs des pertes de moteur, chaque perte correspond à sa source comme les pertes de rotor cage, les pertes d'enroulements ...etc.

Enfin si nous voulons faire un autre module d'analyse il nous suffit juste de sélectionner le module dans l'onglet model, tous ces résultats nous donnent le pouvoir de modifier les composants soit type ou dimensionnement ou paramètres afin de réaliser un moteur avec la performance et nous exigeances (coût, rendement ...etc.).

III.2 Résultats et simulation :

On a expliqué précédemment comment introduire les données du moteur dans le logiciel Motor-CAD, dans ce qui suit, on va déterminer les différents calculs obtenus par la simulation d'un moteur à induction caractérisé par les données suivantes :

II.2.1 Données du moteur [Annexe A]

La puissance utile au bout de l'arbre : $P_2 = 7.5 \text{ KW}$

La tension d'alimentation : 220V/380V

Le courant : 15.2A

Le nombre de pole : $2p=4$

Le nombre de phase statorique = 3 Fréquence : 50Hz

Vitesse $N=1500\text{tr/min}$

Dans le premier cas de notre étude on fait des simulations sur ce moteur à la présence de ventilation on détermine les résultats obtenus et ensuite on refait la simulation à l'absence de ventilation.

A chaque simulation on explique les résultats calculés, les résistances thermiques et les températures sont calculées automatiquement.

III.2.1.a. Avec ventilateur

Pour abaisser la température du moteur il nous faut un système de refroidissement, dans le moteur à induction le système de refroidissement consiste à utiliser des ventilateurs, dans cette deuxième étape d'étude, on étudie l'influence de la ventilation sur la répartition des températures dans les moteurs électriques.

La figure suivante représente la variation des températures dans les parties du moteur à la présence de ventilateur.

Les figures ci-dessous représentent les valeurs de la distribution des températures dans les composants de la machine, on représente aussi un réseau thermique de la machine qui contient les températures, les puissances et les nœuds constituant la machine.

Ce graphe représente l'État thermique des différentes parties du moteur dans un régime transitoire, on remarque qu'il y a une augmentation des températures jusqu'au régime permanent qui est dans les environs de 5000 secondes.

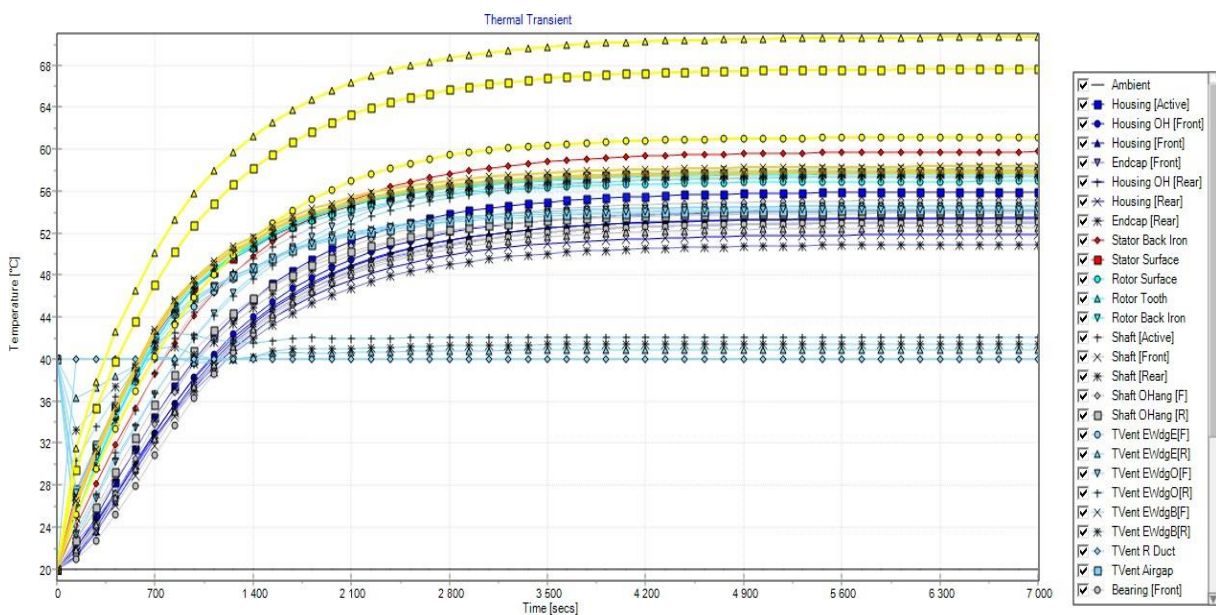


Figure III.28 : Les variations des températures dans les différentes parties du moteur ventilé

La figure suivante représente la variation des puissances dans le moteur

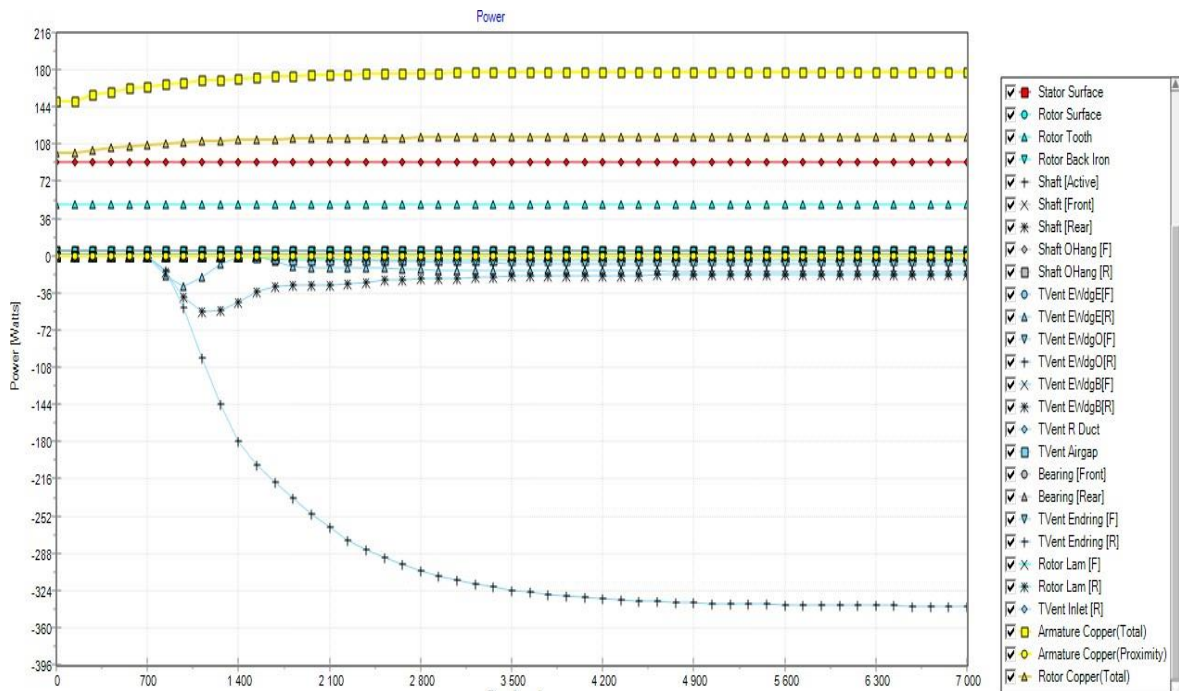


Figure III.29: la variation des puissances dans un moteur ventilé

Dans la figure suivante on détermine les valeurs des températures calculées en régime transitoire en coupe radiale du moteur :

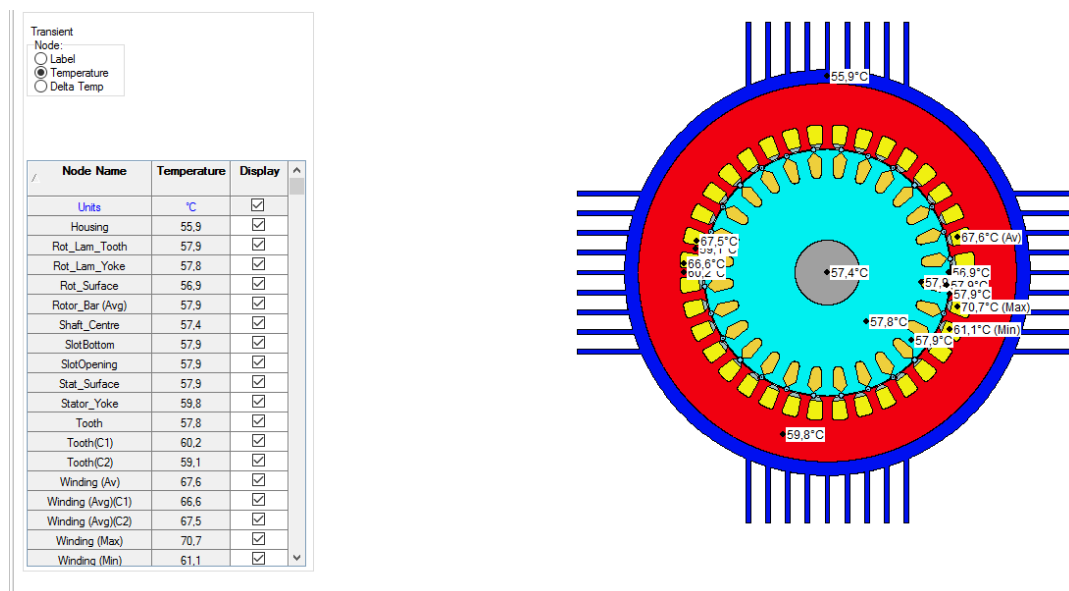


Figure III.30 : Les températures radiales du moteur ventilé

Comme la coupe radiale en définit aussi les températures selon la coupe axiale du moteur (figure III.31) et à droite s'affiche le nom de composant qui correspond à chaque température obtenue :

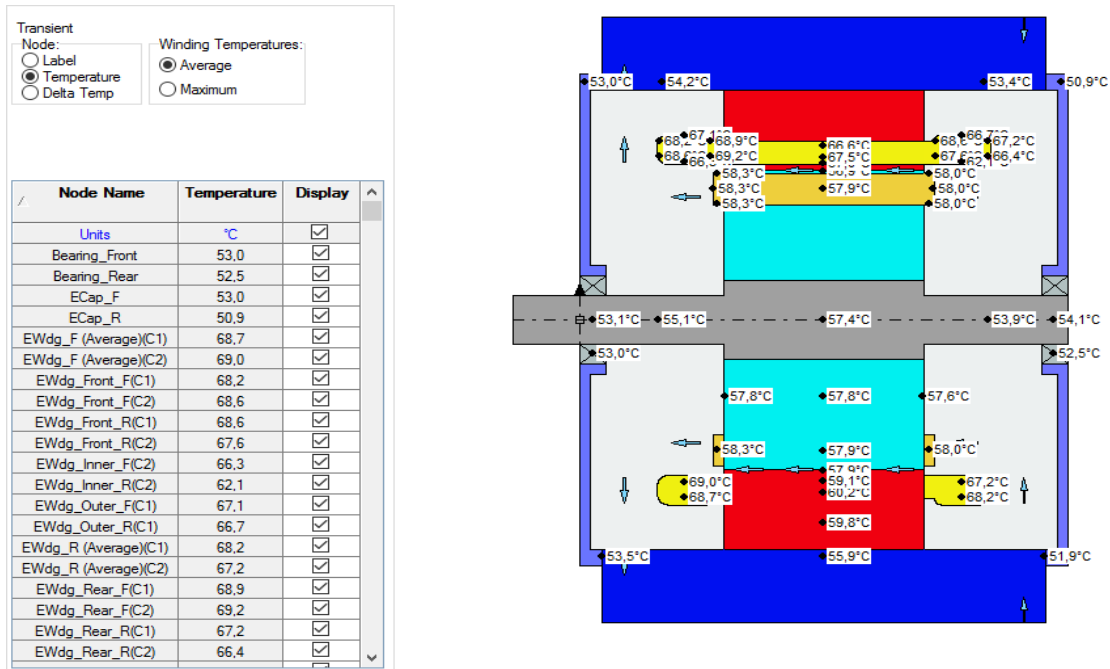


Figure III.31 : Les températures axiales du moteur ventilé

La figure III.32 représente un schéma de réseau thermique du moteur qui représente le composant apparu dans le schéma avec la valeur de température de sortie et d'entrée de ventilateur

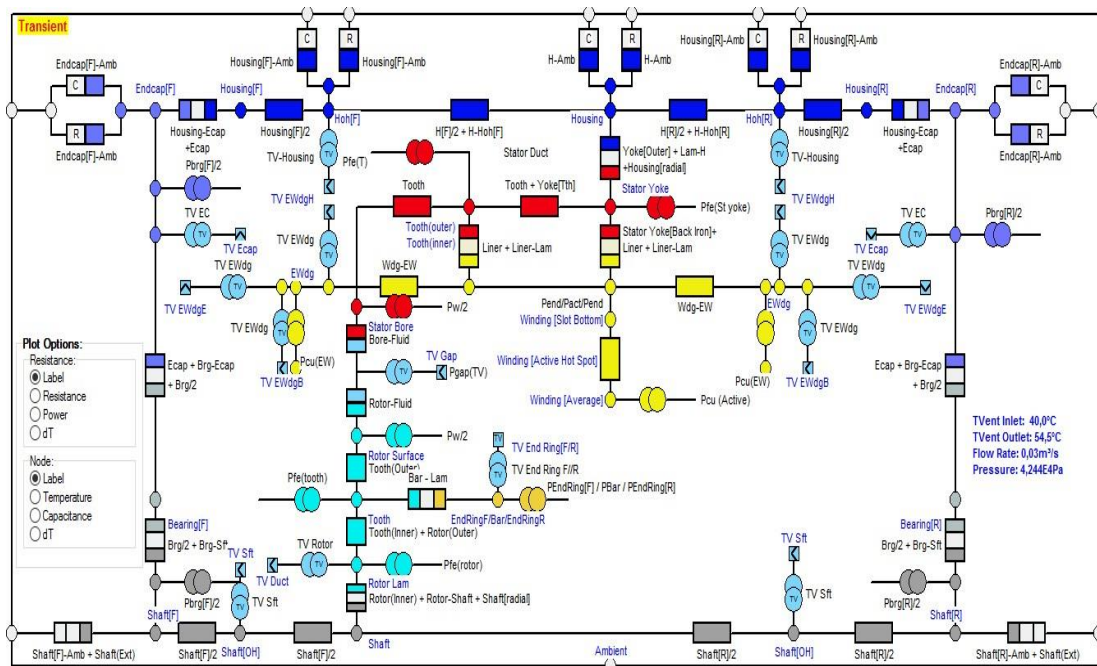


Figure III.32 : schéma de réseau thermique du moteur avec nomination des composants

Ce schéma donne les valeurs de puissance de tous les composants :

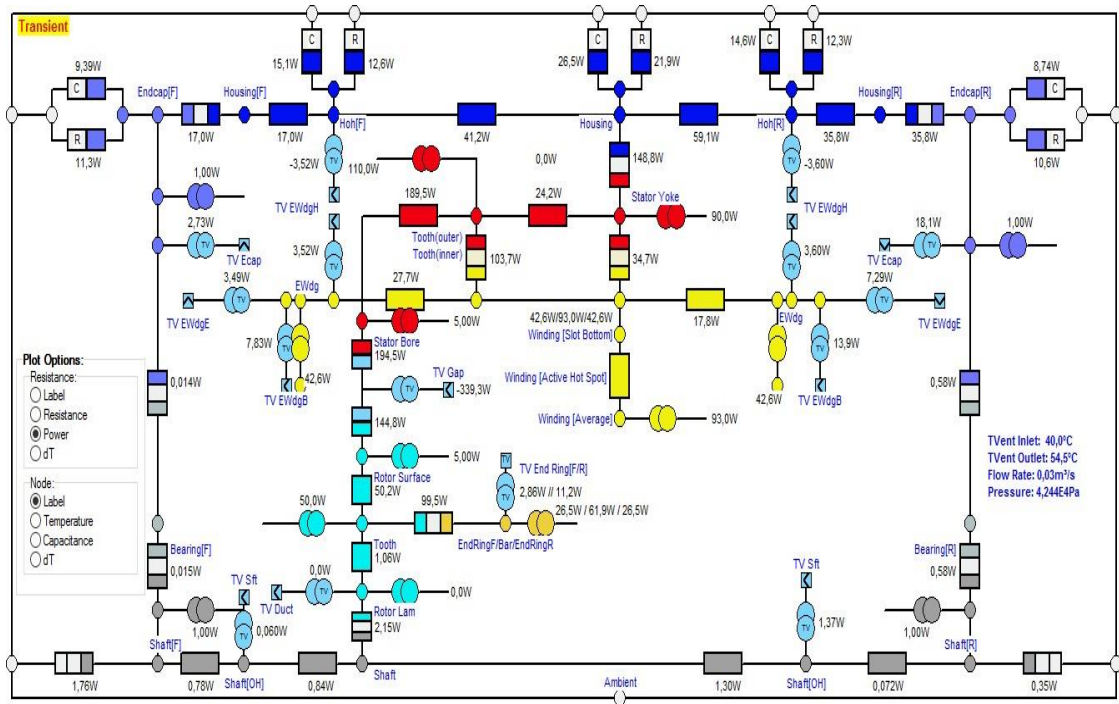


Figure III.33: réseau thermique des puissances du moteur

Le schéma de réseau thermique suivant est plus détaillé il détermine les valeurs des résistances thermiques du chaque composant de réseau.

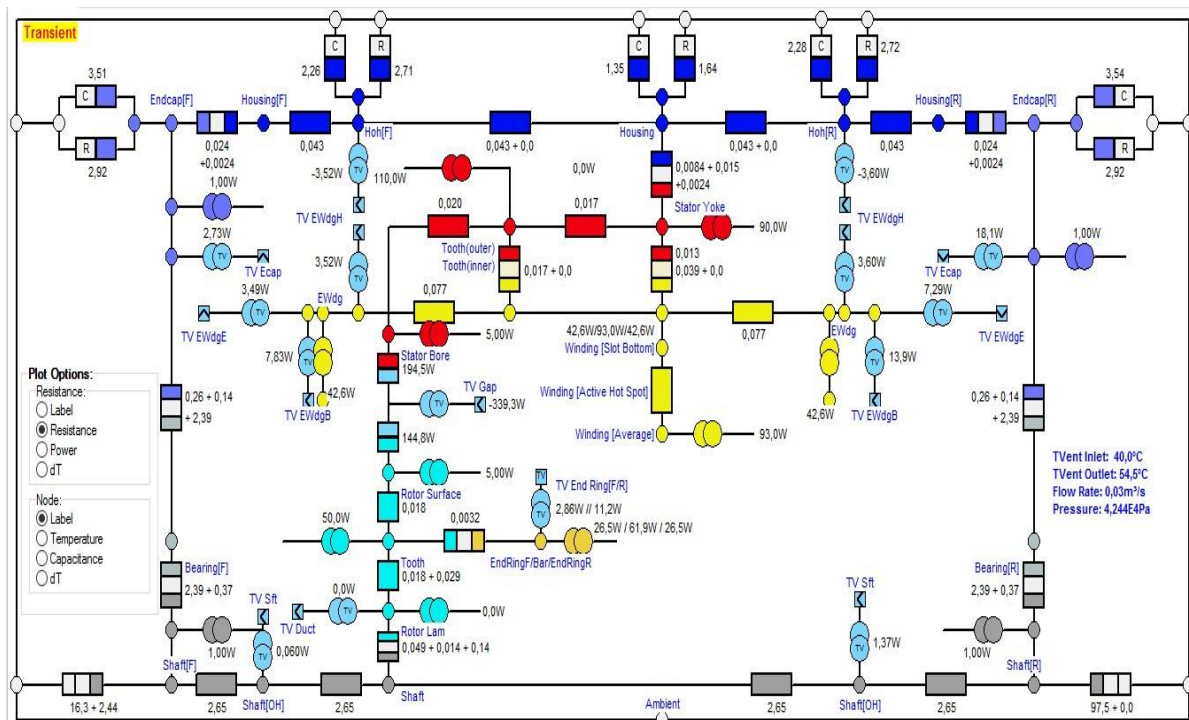


Figure III.34 : schéma de réseau thermique du moteur à induction

Parmi les objectifs de la simulation c'est la détermination des pertes thermique dans la figure suivante on représente les différentes valeurs des pertes dans les parties du moteur électrique, et la valeur totale des pertes calculées dans toutes les parties.

Variable	Value	Units	Variable	Value	Units
Loss [Armature Copper]	178,1	Watts	Main Winding (Copper Loss Multiplier)	1	
Loss [Stray Load Stator Copper]	0	Watts	Stall Operation (Copper Loss Multiplier)	1	
Loss [Armature Copper] (Active)	92,95	Watts	Fault Operation (Copper Loss Multiplier)	1	
Loss [Armature Copper] (EWdg Front)	42,56	Watts	Loss[Stator Back Iron] Schematic Addition	0	Watts
Loss [Armature Copper] (EWdg Rear)	42,56	Watts	---		
---			Dissipation - Housing - Active [Con]	26,52	Watts
Loss [Stator Back Iron]	90	Watts	Dissipation - Housing - Active [Rad]	21,85	Watts
Loss [Stator Tooth]	110	Watts	Dissipation - Front Housing OH [Con]	15,12	Watts
---			Dissipation - Front Housing OH [Rad]	12,59	Watts
Loss [Rotor Cage]	114,9	Watts	Dissipation - Rear Housing OH [Con]	14,65	Watts
Loss [Rotor Cage] (Active)	61,87	Watts	Dissipation - Rear Housing OH [Rad]	12,26	Watts
Loss [Rotor Cage] (EndRing Front)	26,53	Watts	Dissipation - Front Endcap [Con]	9,39	Watts
Loss [Rotor Cage] (EndRing Rear)	26,5	Watts	Dissipation - Front Endcap [Rad]	11,32	Watts
---			Dissipation - Rear Endcap [Con]	8,74	Watts
Loss [Stray Load Iron]	0	Watts	Dissipation - Rear Endcap [Rad]	10,58	Watts
Loss [Stray Load Stator Iron]	0	Watts	---		
Loss [Stray Load Rotor Iron]	0	Watts	Total Dissipation to model ambient node	145,124	Watts
Loss [Stray Load Rotor Copper]	0	Watts			
Loss [Rotor Tooth]	50	Watts			
Loss [Rotor Back Iron]	0	Watts			

Loss [Windage]	10	Watts			
Loss [Windage] (Ext Fan)	0	Watts			
Loss [Friction - F Bearing]	2	Watts			
Loss [Friction - R Bearing]	2	Watts			

Loss [Total]	556,971	Watts			

Figure III.35: Les pertes thermiques du moteur à induction

Après avoir déterminé les différents paramètres de comportement thermique du moteur le logiciel à donner les températures obtenu en 2d et qui sont calculées par la méthode des éléments finies au niveau de la bobine situé au niveau de stator.

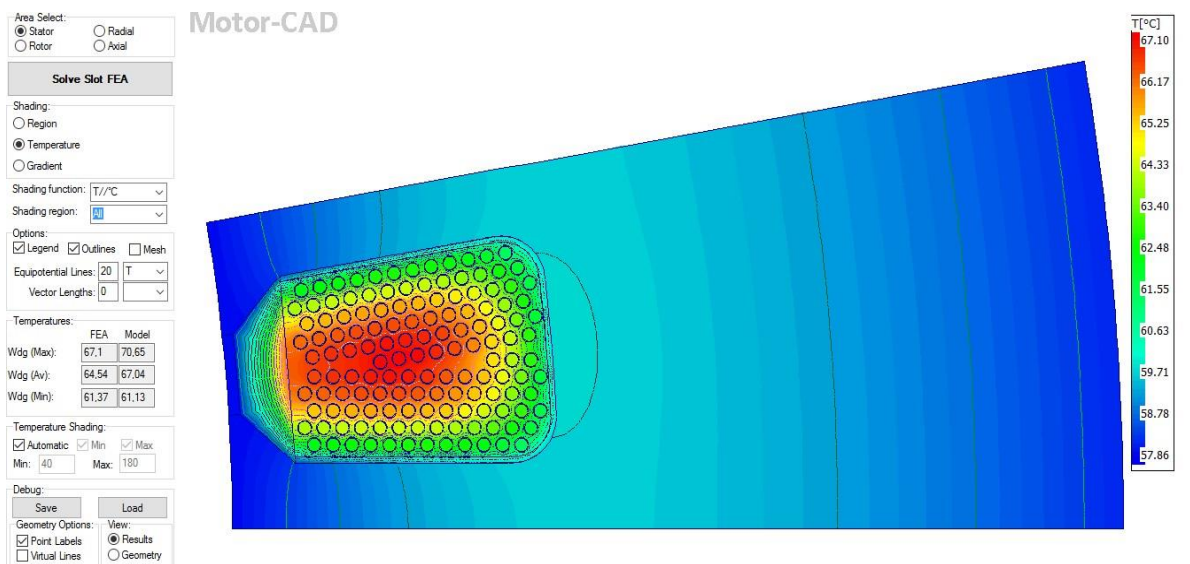


Figure III.36: l'enroulement sous effet thermique en 2D

D'après la figure précédente, en remarque que la couleur rouge est concentrée au milieu de la bobine statorique ce qui prouve qu'il y'a une grande perte d'énergie lors de l'alimentation par le courant électrique et qui prouve aussi que cette partie subit une grande quantité de chaleur ce qui peut la endommager et d'après les schémas obtenu on voit que la source de ces températures vient

par des composants qui s'échauffent et à son tour chauffe les bobines soit directement (rayonnement) ou par émission de chaleur à des composants proches formant une série d'échange de température (conduction ou convection).

On remarque que les températures de quelques composants se refroidissent rapidement et aussi que les températures n'atteignent pas le régime permanent rapidement ce qui montre le rôle de ventilateur dans le maintien du bon fonctionnement de moteur en gardant le bon état de ces composants.

Après avoir fait une simulation sur un moteur avec ventilateur, on refait notre simulation en supprimant le ventilateur pour voir l'effet de la ventilation sur le moteur à induction.

III.2.1.b. Sans Ventilateur

La figure suivante représente la variation des températures dans les parties du moteur non ventilé :

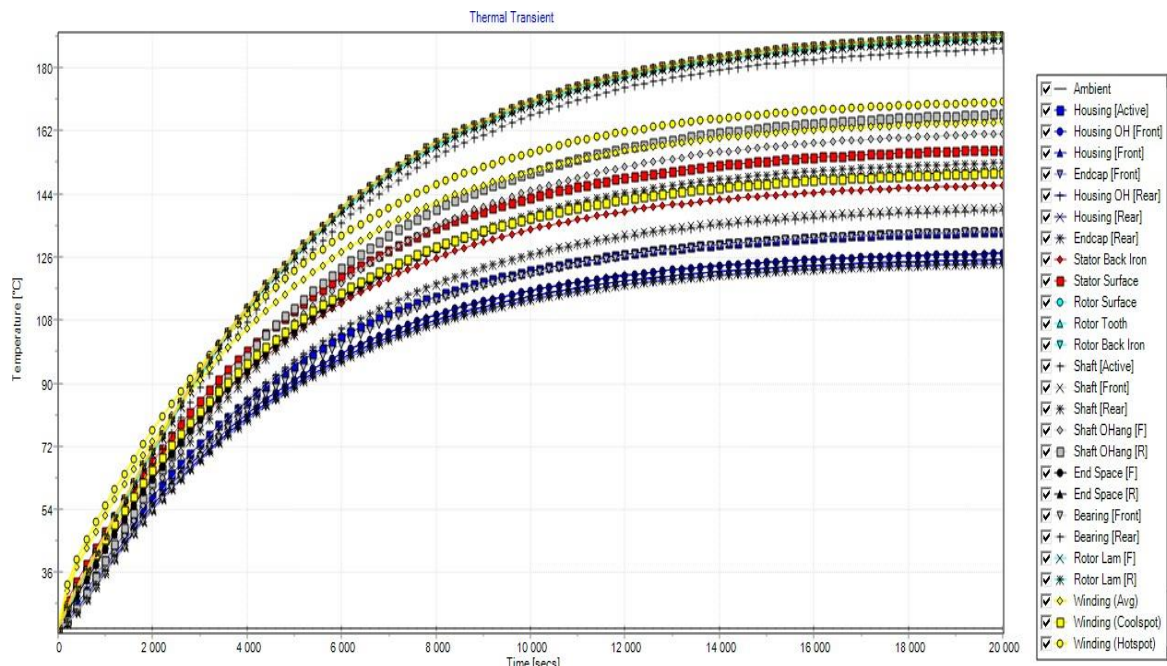


Figure III.37 : Variation des températures dans les parties d'un moteur non ventilé

On remarque que les températures ont augmenté d'une façon énorme et qu'elles n'ont pas atteint le régime permanent jusqu'à la seconde 18000 et cette période est vraiment supérieure à celle obtenue à la présence de ventilateur ce qui explique le rôle important de la ventilation dans les moteurs à induction.

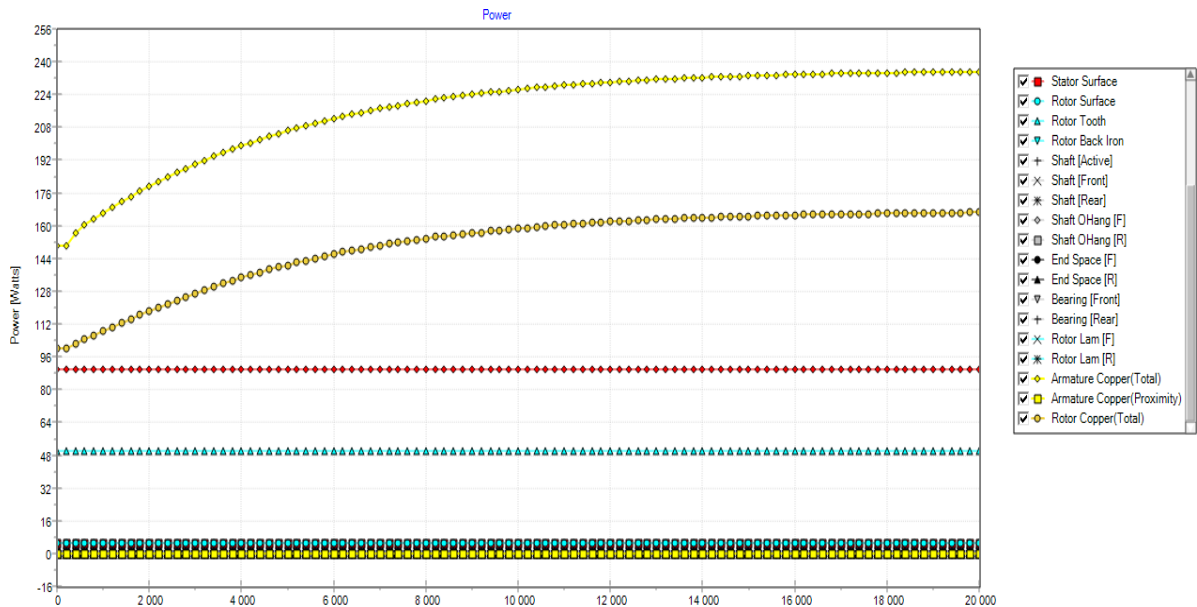


Figure III.38: variation des puissances dans les parties d'un moteur non ventilé

On remarque qu'il y'a des grandes puissances dissipées ce qui cause l'échauffement des parties du moteur.

La figure ci-dessous représente les valeurs de températures par vue radiale :

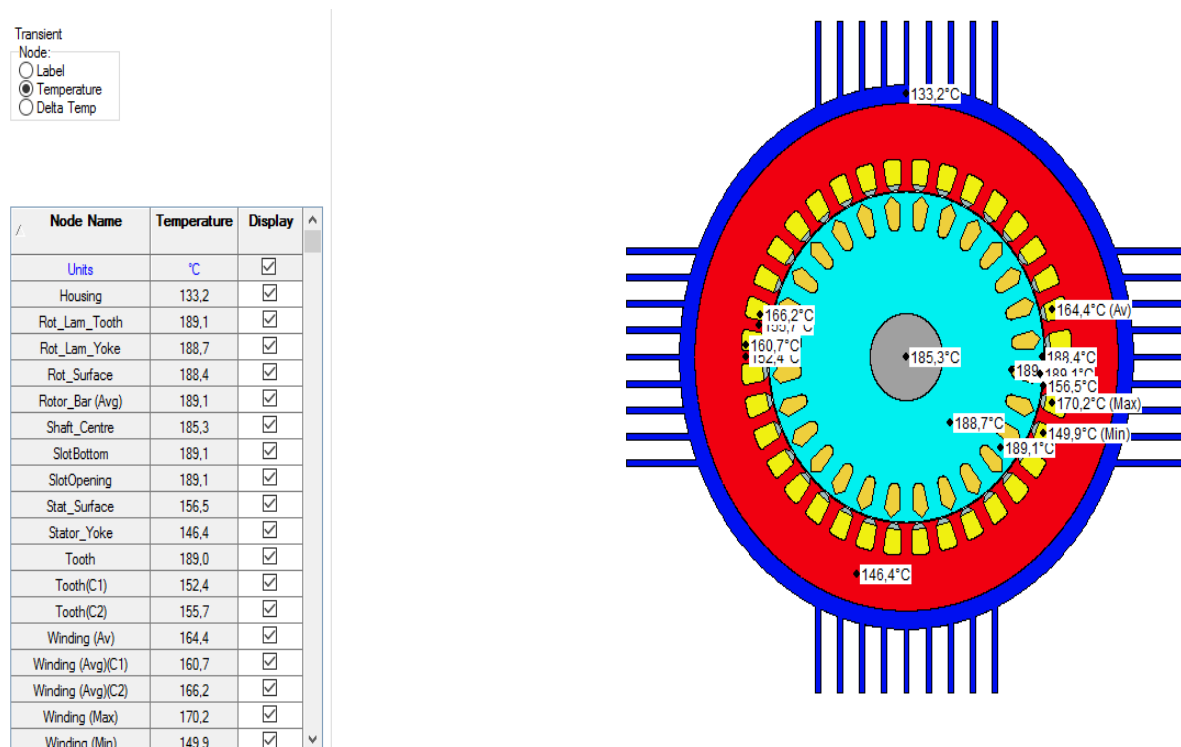


Figure III.39: Les températures radiales du moteur non ventilé

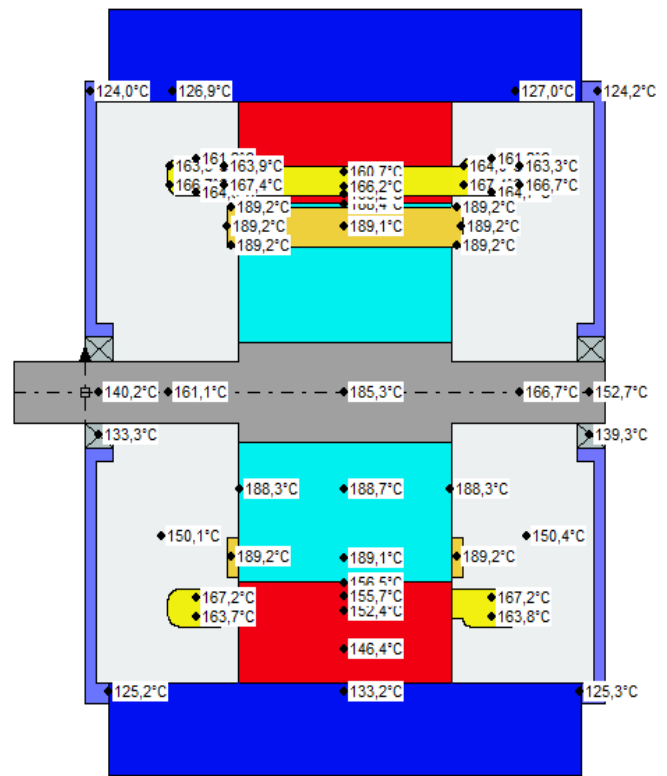
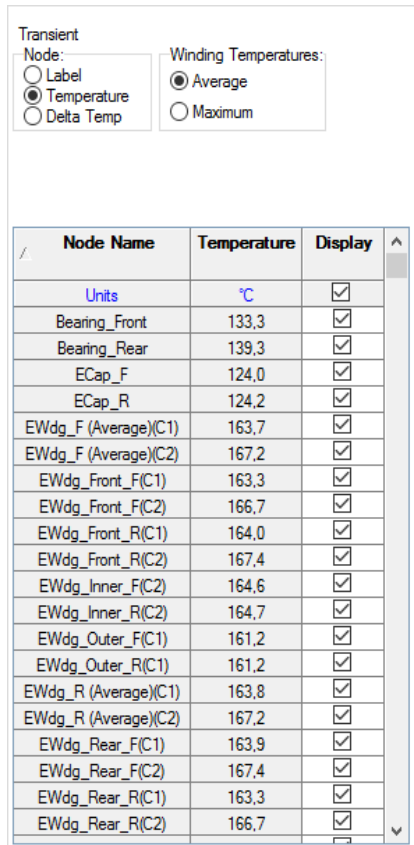


Figure III.40: Les températures axiales du moteur

Ensuite on donne la figure III.41 qui est un schéma de réseau thermique représentant la nomination des parties du moteur :

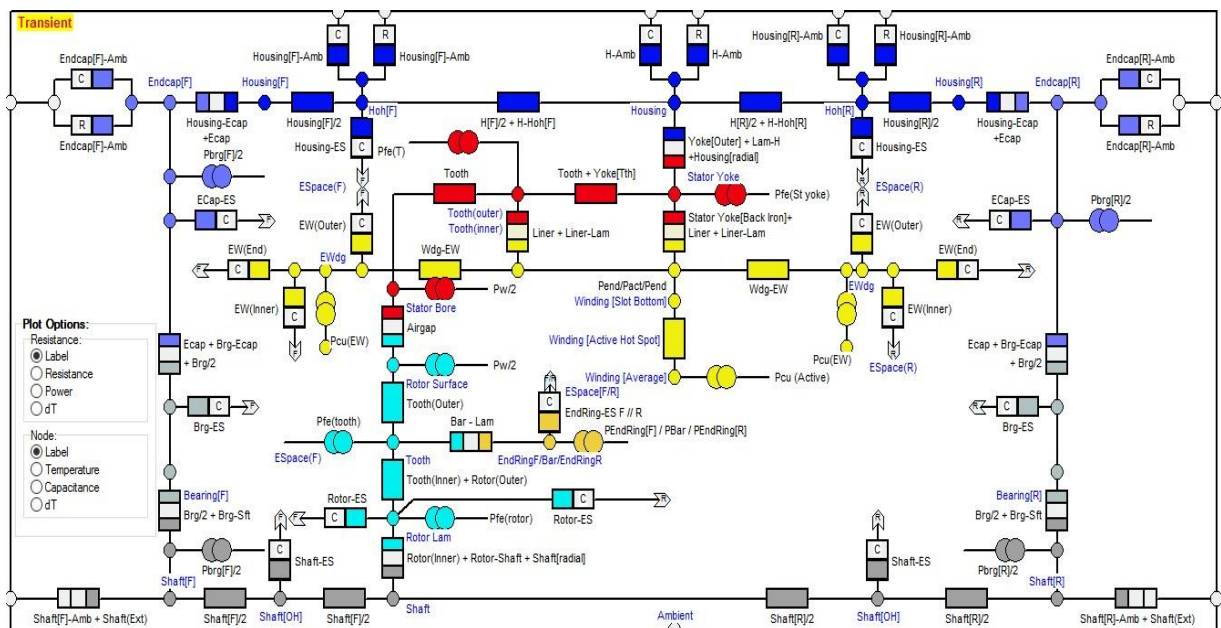


Figure III.41: schéma de réseau thermique du moteur non ventilé avec nomination des composants.

La figure suivante nous permettra de déterminer les valeurs des puissances du moteur non ventilé :

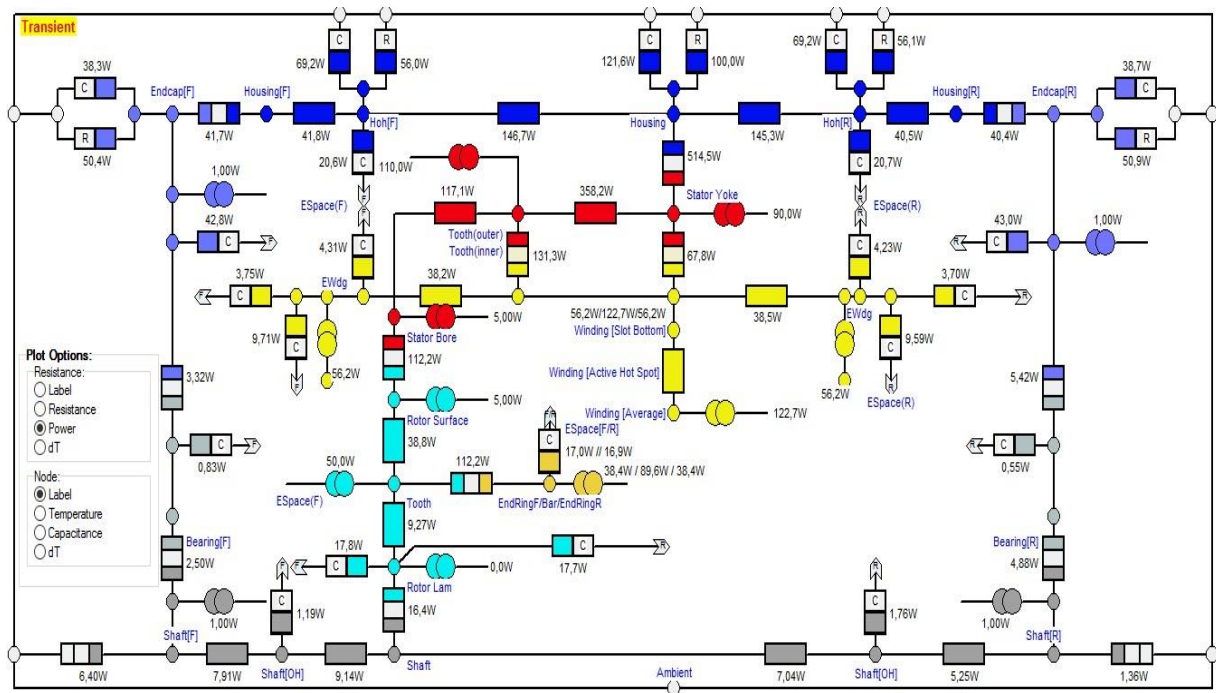


Figure III.42: schéma de réseau thermique du moteur non ventilé représentant les puissances des composants

On obtient aussi un réseau thermique qui est représenté par la figure suivante :

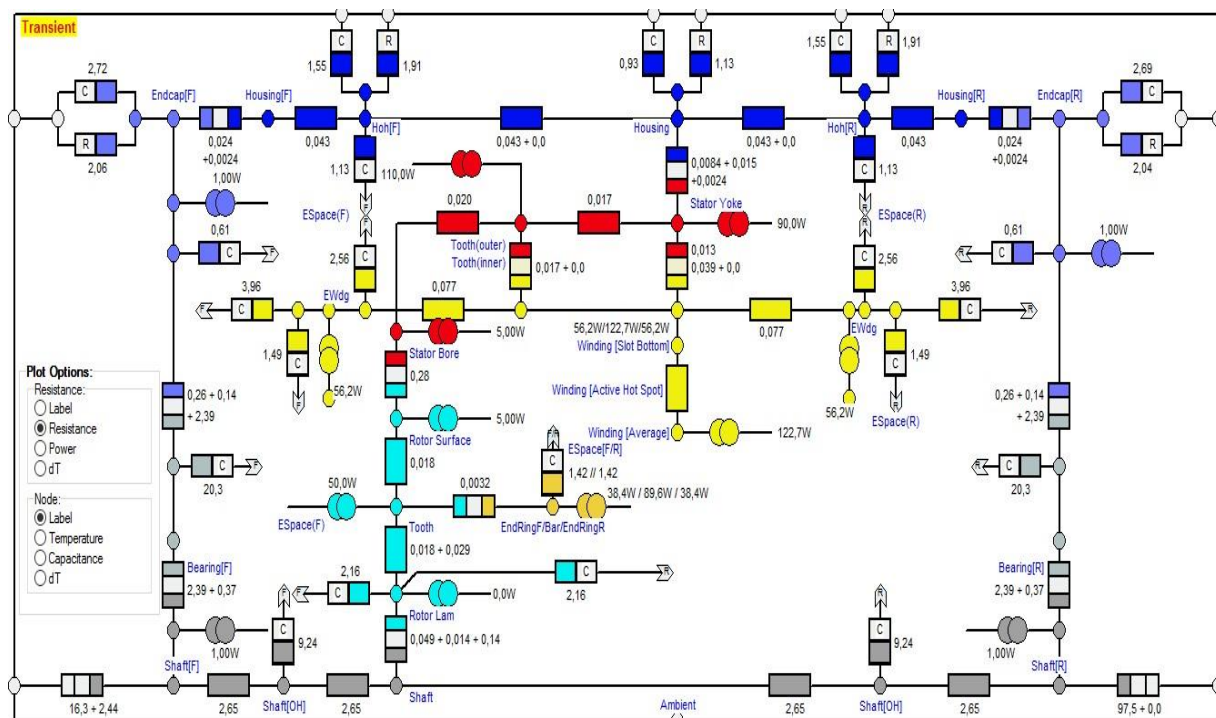


Figure III.43: schéma de réseau thermique du moteur non ventilé

Après avoir la répartition et le réseau thermique du moteur non ventilé on passe à la détermination

Des pertes par la **figure III.44** et ensuite la répartition de la température au niveau d'enroulement dans la figure suivante :

Variable	Value	Units	Variable	Value	Units
Loss [Armature Copper]	235,1	Watts	Main Winding (Copper Loss Multiplier)	1	
Loss [Stray Load Stator Copper]	0	Watts	Stall Operation (Copper Loss Multiplier)	1	
Loss [Armature Copper] (Active)	122,7	Watts	Fault Operation (Copper Loss Multiplier)	1	
Loss [Armature Copper] (EWdg Front)	56,19	Watts	Loss[Stator Back Iron] Schematic Addition	0	Watts
Loss [Armature Copper] (EWdg Rear)	56,19	Watts	---		
---			Dispation - Housing - Active [Con]	121,6	Watts
Loss [Stator Back Iron]	90	Watts	Dispation - Housing - Active [Rad]	99,97	Watts
Loss [Stator Tooth]	110	Watts	Dispation - Front Housing OH [Con]	69,15	Watts
---			Dispation - Front Housing OH [Rad]	56,04	Watts
Loss [Rotor Cage]	165,4	Watts	Dispation - Rear Housing OH [Con]	69,2	Watts
Loss [Rotor Cage] (Active)	89,64	Watts	Dispation - Rear Housing OH [Rad]	56,09	Watts
Loss [Rotor Cage] (EndRing Front)	38,39	Watts	Dispation - Front Endcap [Con]	38,28	Watts
Loss [Rotor Cage] (EndRing Rear)	38,39	Watts	Dispation - Front Endcap [Rad]	50,4	Watts
---			Dispation - Rear Endcap [Con]	38,69	Watts
Loss [Stray Load Iron]	0	Watts	Dispation - Rear Endcap [Rad]	50,95	Watts
Loss [Stray Load Stator Iron]	0	Watts	---		
Loss [Stray Load Rotor Iron]	0	Watts	Total Dissipation to model ambient node	658,094	Watts
Loss [Stray Load Rotor Copper]	0	Watts			
Loss [Rotor Tooth]	50	Watts			
Loss [Rotor Back Iron]	0	Watts			

Loss [Windage]	10	Watts			
Loss [Windage] (Ext Fan)	0	Watts			
Loss [Friction - F Bearing]	2	Watts			
Loss [Friction - R Bearing]	2	Watts			

Loss [Total]	665,525	Watts			

Figure III.44: Les pertes thermiques du moteur non ventilé

Motor-CAD

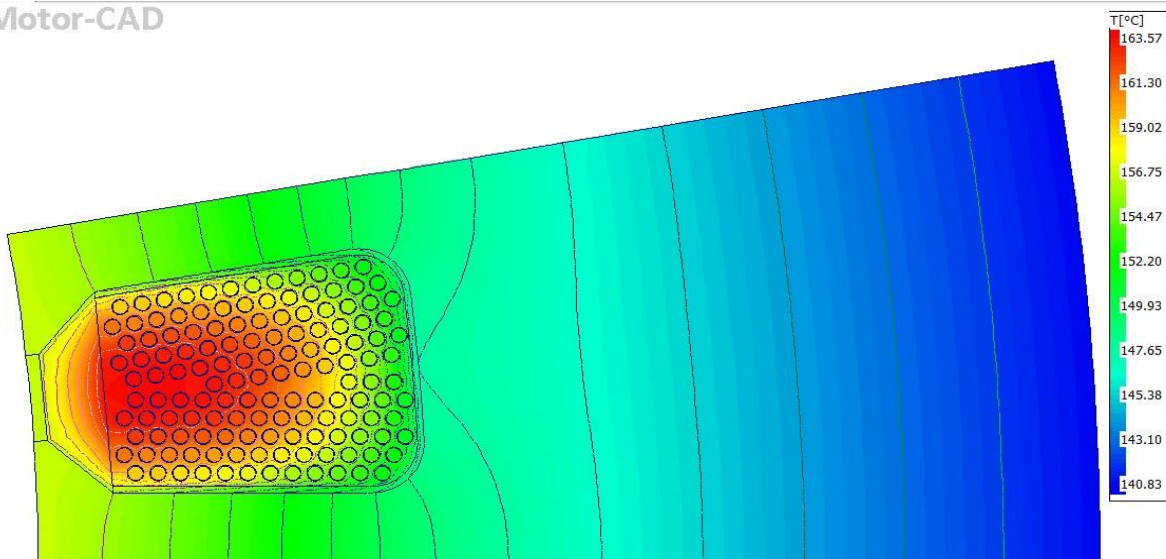


Figure III.45: La répartition de la température au niveau d'enroulement

On remarque que la surface d'enroulement du moteur non ventilé affectée par l'échauffement est très grande par rapport à celle d'enroulement du moteur ventilé cela revient à l'absence de l'écoulement d'air qui fait refroidir les différentes parties de moteur.

D'autre part cette augmentation de température au niveau des enroulements vient de l'énergie perdue lors de passage du courant électrique dans les bobines ce qui fait aussi transmettre la chaleur la chaleur vers les parties statoriques.

Conclusion

Par comparaison entre les résultats obtenus dans la simulation on constate que l'absence d'un système de refroidissement provoque une augmentation excessive de la température dans tous les composants du moteur et surtout au niveau des enroulements.

En tant que les enroulements sont des composants très importants et essentiels dans les moteurs à induction il est vraiment indispensable d'installer un ventilateur pour assurer le bon fonctionnement et garder les composants en bonnes états, et l'absence de système de refroidissement cause l'échauffement des composant et cela influence directement sur le rendement de moteur.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Pour avoir un moteur à induction avec une grande efficacité il faut focaliser les études sur le facteur de température, car il peut jouer le rôle d'un facteur perturbateur en causant d'énorme dégât sur la machine dans toutes ses parties et surtout au niveau des enroulements en détruisant les isolants.

Donc pour maintenir ou améliorer le rendement de la machine il est nécessaire de connaître la distribution de la température dans la machine au niveau de tous les composants et précisément dans les parties sensibles de moteur.

Pour déterminer les températures dans les composants on utilise des différentes méthodes comme la méthode nodale et les méthodes des éléments finies mais jadis avec le calcul manuel sa semble un peu difficile d'obtenir des résultats exact et rapide.

Mais aujourd'hui il est facile d'estimer la distribution de la température et les valeurs des pertes thermiques en utilisant le logiciel Motor-CAD.

Dans la première étape de notre travail on a donné la constitution des MAS et ensuite on a identifié le problème à résoudre et qui est l'échauffement des composants des moteurs causé par les différents types des pertes dans nous avons parlé déjà et on a donné les composants les plus touché par l'échauffement.

Deuxièmement, tout d'abord on a cité les modes de transfert thermique qui se présentent lors de la transmission de chaleur entre les composants, et on a montré la méthodologie d'utilisé le logiciel. Ensuite on a introduit un modèle donné d'un moteur à induction dans le logiciel Motor-CAD dans le but de déterminer la distribution de la température dans tous les composants de ce moteur.

Dans la troisième étape on a étudié l'influence de la ventilation sur la distribution de la température dans les différentes parties de moteur électrique.

L'analyse thermique des moteurs électriques nous aide à trouver des nouvelles techniques d'amélioration et de maintenance, autrement la simulation nous facilite l'étude thermique des machines et augmente la qualité de produit et développe les techniques d'intervention.

Finalement, nous espérons que notre travail apportera un plus dans la modélisation des machines électriques en sens large et les moteurs a inductions en particulier.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] http://www.electrosup.com/machine_asynchrone.php , consulté le 20/06/2022
- [2] Ait Ouessaoud.M, Amer. O, ‘ Calcul et mesures des pertes fer dans le stator d’une machine asynchrone,’ mémoire master, Tizi Ouzou 2018.
- [3] MEDANE.K, ‘ Mesure de la température dans le rotor d’une machine asynchrone à cage, ‘ mémoire master professionnel, Tizi Ouzou 2014.
- [4] Cours électricité 2, ‘Le moteur asynchrone triphasé,’ département électrotechnique, polycopie, Université Montpellier 2, 2009.
- [6] KHATIR. A, ‘ Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts ,’ Mémoire magister, université de Sétif 2009.
- [7] R. KHLISSA,’ Contribution à la définition des méthodes d’optimisation rapides et économiques pour le dimensionnement d’actionneurs électriques,’ thèse de Doctorat de l’Université de Technologie de Compiègne, 2015.
- [8] Maamoun.S, Zouari Ferhat.B, ‘ Etude de l’échauffement des machines électriques tournantes en vue d’améliorer ses rendements’, mémoire Master , université d’El Oued 2021.
- [9] OLIVIER.G, ‘ Transferts thermiques, transparents de cours, MP » Lycée Montesquieu (Le Mans).
- [10] AMARA.B, ‘ Etude de l’échauffement des machines électriques Application aux moteurs asynchrones à rotor massif,’ mémoire de magister, Sétif 2010
- [11] Gille R., ‘ Modélisation et caractérisation thermique de machines électrique synchrones à aimant permanents,’ Thèse doctorat, INSA de Lyon, 2004.
- [12] Gabriel, R., ‘ Modélisation thermique des moteurs asynchrones à cage par la méthode des éléments finies,’ Thèse doctorat, université de Québec à trois rivières, 2001.
- [13] Sébastien, M. ‘ Identifier les défauts des machines tournantes électriques par l’analyse des 6 zones de défaut ,’ <https://dbvib-consulting.com/diagnostic-par-analyse-electrique/> , consulté le : 18/06/2022.
- [14] CHIKIROU.S, HAMAS.N, ‘ Modélisation numérique d’une machine Asynchrone en régime dégradé,’ mémoire Master, Tizi Ouzou 2018.
- [15] HARIR Miloud,’ Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d’Ecureuil par l’emploi de la Fonction d’enroulement Modifiée, Mémoire de Magister, : Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf 2009
- [16] ARABMOH.A, REBHI.W, ‘ Modélisation thermique d’un moteur asynchrone, ’Mémoire master, Tizi Ouzou 2013.
- [17] BOUHERAOUA.M, ‘Contribution à la modélisation thermique d’un Moteur asynchrone à Cage,’ thèse doctorat, Tizi Ouzou 2008.

Bibliographie

[18] MEZANIS, Modélisation électromagnétique et thermique des moteurs à induction, en tenant compte des harmoniques d'espace, ' thèse doctorat, AEM Lorraine 2004

[19] [https://www.ansys.com/resourcecenter#t=ResourceCenterTab&sort=relevancy&numberOfResults=25&f:@resourcetype=\[Case%20Study\]](https://www.ansys.com/resourcecenter#t=ResourceCenterTab&sort=relevancy&numberOfResults=25&f:@resourcetype=[Case%20Study]) consulté le 18/06/2022

[20] HAMRIOIL, OUALI, A, ' Modélisation électromagnétique thermique d'un moteur asynchrone à rotor massif ,' mémoire master, Tizi Ouzou 2016.

[21] <https://www.cadfem.net/fr/nos-solutions/autres-logiciels/motor-cad.html#wallpaper-card-115261>, consulté le 22/06/2022

[22] <https://www.motor-design.com/wp-content/uploads/About-Ansys-Motor-CAD-Brochure.pdf>, consulté le 22/06/2022

Annexes

Annexes

Annexes A

Les valeurs des dimensions géométriques du moteur simulé dans Motor-CAD sont calculées manuellement par des relations que vous pouvez trouver dans [10](mémoire de Amara.B) de page 38 à 80 et les différents paramètres de la modélisation sont des paramètres d'un moteur étudié par Mme AMARA Badria.

On donne :

Dimension préliminaire du stator			
$\Delta H_1 = 233mm$	$\Delta_1 = 152,61mm$	$l_{1PR} = 100,4mm$	
Dimension préliminaire du l'entrefer			
$\delta = 0,45mm$			
Dimension préliminaire du noyau rotorique			
$\Delta H_2 = 172,71mm$	$\Delta_2 = 53,59mm$		
Dimension des encoches et des enroulements statorique			
$W = 156spires$	$t_1 = 13,31mm$	$h_a = 18,14mm$	$h_{ma} = 112mm$
Dimension des encoches statoriques			
$b_{zl} = 5,684$	$b_1 = 11,43$	$b_2 = 8,124$	
Dimension du conducteur statoriques			
$d' = 1,073$			
Dimension des encoches rotoriques			
$h_w = 0,7$	$h_2 = 0,3$	$t_2 = 17,02$	$r_1 = 4,25$
Résistances de phase statoriques			
$r_1 = 0,67\Omega$			
Réactance de phase statorique			
$X_1 = 2\Omega$			
Résistance de l'enroulement rotorique			
$r'_2 = 0,62\Omega$			



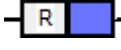

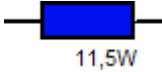
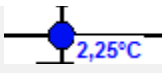
Annexes

Réactance d'enroulement rotorique
$X_2 = 1,425\Omega$
Courant magnétisant
$I_M = 3,911 A$
Somme des pertes dans le moteur
$\Sigma P = 1053,25 W$
La masse de moteur
$G_{mot} = 84 Kg$

Annexe B

Pour savoir le nom de composant ou la température ou la désignation d'un symbole il suffit juste de maintenir le curseur de la souris sur le composant qu'on veut savoir et sa désignation ou ces paramètres (température, résistances et puissances) va s'afficher au-dessus, et sachant que pour chaque figure ou résultats donnés leurs désignations s'affichent à gauche de l'écran.

Symbole de réseau thermique

DESIGNATION	Symbole
SOURCES DE PERTES	
RESISTANCE (CONVECTION)	
RESISTANCE (RADIATION)	
NŒUD	
ECOULEMENT DE PUISSANCE	
NŒUD DE TEMPERATURE	
TEMPERATURE DELTA	