

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**

**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Commande Des Systèmes Electriques**

**THÈME**

**Analyse des défauts de barre d'un  
turboalternateur par la méthode des  
éléments finis**

*Préparé par :*

**Melle Moussouni Malika**

**Melle Benyamina Nadia**

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>Mr. Saibi Ali</b>	<b>MAA</b>	<b>Président</b>
<b>Mr. Toumi Djilali</b>	<b>MCB</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. Becheikh Mostapha</b>	<b>MCB</b>	<b>Encadreur</b>

PROMOTION 2015 /2016

# Remerciements

Avant tout, nous remercions **Dieu** le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage pour finaliser ce travail.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur **Mr M. Becheikh** qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, tout particulièrement :

**Mr A .Saibi** pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude à **Mr D.Toumi** pour avoir lu notre mémoire, allé l'examiner et l'évaluer. Nous vous remercions pour l'intérêt que vous avez porté à ce travail et pour vos précieux conseils et remarques.

A tous nos enseignants depuis nos tous premiers jour d'école jusqu'à aujourd'hui, a nos amies et a nos familles respectives nous vous remercions infiniment.

**Merci** à toute personne ayant participé de près ou de loin a l'accomplissement de ce travail.

# Dédicace

**N**ous dédions ce modeste travail

**A** Nos très chers pères,

**A** Nos très chères mères,

**A** Nos frères & sœurs,

**A** Toutes nos familles,

**A** Tous ceux que nous aimons.

**Sommaire**

**CHAPITRE I : Généralité Sur Les Machines Synchrones**

Introduction générale.....	1
1.1 Introduction .....	2
1.2 Généralités sur la machine synchrone .....	2
1.3 Utilisation d'une machine synchrone en alternateur .....	6
1.4 Les types de machines synchrones .....	7
1.4.1 Machines à rotor lisse.....	7
1.4.2 Machines à pôles saillants .....	8
1.5 Alternateur.....	9
a) Stator .....	10
b) Rotor.....	10
6.1 Les défauts de barre de l'alternateur .....	14
1.6.1 Les défauts d'origine interne.....	14
1.6.2 Défauts d'origine externe.....	15
1.7 Défauts de rupture de barres.....	19
Conclusion.....	19

**CHAPITRE II: Méthode Des Eléments Finis**

II.1 Introduction .....	20
II.2 Méthode des éléments finis .....	20
II.3 Le principe du calcul par éléments finis.....	21
II.4 Les différentes méthodes de résolutions.....	22
II.4.1 Les modèles analytiques.....	22
II.4.2 Les modèles semi-numériques .....	22
II.4.3 Les modèles numériques de calcul éléments finis.....	23
II.5 Les équations de Maxwell.....	23
II.6 Le logiciel FLUX 2D .....	26
II.7 La discrétisation du domaine.....	28
II.8. Approximation nodale.....	28
II.8.1 Définition de l'approximation nodale .....	29
II.8.2 Construction d'une approximation nodale linéaire .....	29
II.8.3 Construction des fonctions d'interpolation d'un élément triangulaire .....	31
II.9 Eléments à deux dimensions triangulaires .....	33

a.	Approximation linéaire.....	33
b.	Approximation quadratique.....	33
c.	Assemblage et conditions aux limites .....	34
II.10	Etapes d'analyse par la MEF .....	35
	Conclusion.....	37

**CHAPITRE III : Application Sur La Méthode Des Eléments Finis**

III.1	Introduction .....	38
III.2	Pré-processeur .....	38
1.	Caractéristiques générales de la machine synchrone triphasée : .....	38
2.	Construction de Géométrie.....	39
3.	Physique .....	40
4.	Matériau .....	40
5.	Bobinage triphasé.....	41
6.	Ensembles mécaniques.....	42
7.	Circuit électrique .....	43
8.	Maillage.....	43
III.3	Processeur (Résolution).....	44
III.4	Post-processeur.....	44
❖	Les résultats de machine saine .....	45
❖	Les résultats de machine avec défauts.....	49
❖	Comparaison des résultats de la machine saine et avec défaut.....	53
	Conclusion.....	55
	Conclusion générale .....	55
	Bibliographie :.....	56

Liste des Figures

Fig.I 1 : Machine synchrone à reluctance variable (M.R.V).....	3
Fig.I 2 : Machine synchrone à aimant permanent .....	4
Fig.I 3 : Machine synchrone à rotor bobiné .....	5
Fig.I 5 : machine à rotor lisse ( $p= 1$ ) .....	7
Fig.I 6 : machine à pôles saillants ( $p= 2$ ) .....	8
Fig.I 7 : Photographie de l’alternateur .....	10
Fig. I 8 : les composantes de rotor d’alternateur .....	12
Fig.I 9 : Principaux défauts de la machine synchrone.....	18
Fig.II 1 : L’interface de logiciel FLUX 2D .....	27
Fig.II 2 : Les éléments finis sont générés par des points qui ne sont que des nœuds de la structure.....	28
Fig.II 3 : Approximation nodale à une dimension .....	30
Fig.II 4 : Fonctions d'interpolations linéaires du triangle .....	33
Fig.II 5 : Fonctions d'interpolations quadratiques du triangle.....	34
Fig.II 6: Principales étapes pour une analyse par la Méthode des Eléments Finis .....	36
Fig.III 1: Le schéma synoptique des étapes de modélisation de la machine.....	38
Fig.III 2 : Géométrie de la machine .....	39
Fig.III 3 : propriété physique.....	40
Fig.III 4 : Courbe B/H du FLU-STEEL-1010-XC10 .....	41
Fig.III 5 : Système vectorielle des phases A, B, C.....	41
Fig.III 6 : Alimentation de la Machine Synchrone à concentration du flux.....	42
Fig.III 7 : Schéma de bobinage du rotor.....	42
Fig.III 8 : circuit électrique de la machine .....	43
Fig.III 9 : maillage d’une demi-coupe de la machine .....	43
Fig.III 11 : la courbe de la vitesse .....	45
Fig.III 12 : les courants dans les conducteurs bobinés .....	45
Fig.III 13 : les tensions dans les phases .....	46
Fig.III 14 : le couple électromagnétique .....	46
Fig.III 15 : les composantes normales du champ magnétique .....	47
Fig.III 16 : l’induction magnétique .....	47
Fig.III 17 : le flux magnétique .....	48
Fig.III 18 : le flux magnétique dans l’entrefer .....	48
Fig.III 19 : la variation de la vitesse en présence du défaut .....	49

Fig.III 20 : les courants dans les conducteurs en présence du défaut.....	49
Fig.III 21 : les tensions du conducteur en présence du défaut .....	50
Fig.III 22 : le couple électromagnétique en présence du défaut.....	50
Fig.III 23 : le champ magnétique dans la partie tournante en présence du défaut.....	51
Fig.III 24 : l'induction magnétique en présence du défaut .....	51
Fig.III 25 : les flux magnétique en présence du défaut .....	52
Fig.III 26 : le flux magnétique en présence du défaut.....	52
Fig.III 27 : Comparaison des courants [A] de la phase A de la machine (saine, avec défaut).....	53
Fig.III 28 : Comparaison des Flux magnétiques [Wb] de la phase A de la machine (saine, avec défaut) .....	53
Fig.III 29 : Comparaison des couples électromagnétiques [N.m] de la machine (saine, avec défaut) .....	54
Fig.III 30 : Comparaison des tensions [V] de la machine (saine, avec défaut).....	54

### Abréviation

**CAO** : conception assistée par ordinateur

**MEF** : La méthode des éléments finis

**M.R.V** : Les machines à réluctance variable

**MSAP** : Machines synchrones à aimants permanents

$N_{enc}$  : Nombre d'encoches

### Liste des symboles

**A** : potentiel vecteur magnétique ( $T \times m$ )

**B** : l'induction magnétique (Tesla)

**B<sub>r</sub>** : l'induction résiduelle (ou rémanente)

**D** : l'induction électrique la densité du champ électrique ( $C/m^2$ )

**E** : le champ électrique ( $V /m$ )

**H** : le champ magnétique ( $A/m$ )

**J** : densité locale du courant électrique ( $A/m^2$ )

**M** : magnétisation

**P** : Nombre paires de pôles

$\mu$  : la perméabilité magnétique ( $H /m$ )

$\mu_0$  : la perméabilité magnétique a vide ( $H /m$ )

$\sigma$  : la conductivité électrique ( $\Omega^{-1}m^{-1}$ )

$\rho$  : la densité volumique de charge ( $C/m^3$ )

$\emptyset$  : le potentiel magnétique

# **Introduction Générale**

### Introduction générale

Dans ce contexte, les présents travaux concernent l'étude de la rupture de barre de turboalternateurs. Ces ruptures sont une source potentielle de dégradation des performances des machines.

Des tests de diagnostic existent pour la détection de ces défauts, mais restent néanmoins sujets à interprétation pour l'évaluation de la présence ou non d'un défaut, qui se trouve à l'intérieur du circuit magnétique.

Le mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une généralité sur les machines synchrones et l'utilisation d'un turboalternateur comme une machine synchrone puis, nous citons les différents défauts (électriques, mécaniques,...) pouvant se produire dans les machines électriques (turboalternateur), leur classification et leurs origines.

Dans le deuxième chapitre nous présentons la méthode de diagnostique des défauts. Nous indiquons qu'il a différentes méthodes de détection (analytique, méthode numérique basée sur la méthode des éléments finis).

Dans notre travail, nous allons nous intéresser à la méthode des éléments finis (finite element method), qui fut développée et appliquée en premier lieu en génie civil et en mécanique. Cette méthode est utilisée pour la résolution des équations différentielles aux dérivés partielles décrivant le comportement électromagnétique des machines électriques.

Au cours du troisième chapitre nous avons la simulation d'une machine synchrone en fonctionnement sain et en présence du défaut en utilisant le logiciel FLUX2D.

# **CHAPITRE I :**

## **Généralités sur les machines synchrones**

## I.1 Introduction

L'électricité est devenue une pierre angulaire de l'économie mondiale en outre sa production a des niveaux de puissances importantes, elle est faite a partir de la Transformation de l'énergie chimique continue dans un combustible (charbon, Fioul, ou gaz) ou de l'énergie nucléaire, en chaleur, puis en énergie mécanique ensuite en énergie électrique, la conversion thermique-mécanique est l'œuvre des Turbines a combustions, la conversion mécanique – électrique est du ressort des Alternateurs.

Dans le présent chapitre, nous commençons par des généralités sur les machines synchrones, puis, nous présentons respectivement les alternateurs et leur fonctionnement. et après nous traitons les différents types des défauts de fonctionnement .

## I.2 Généralités sur la machine synchrone

La machine synchrone est l'élément d'un réseau électrique très important car c'est elle qui, en majorité incontestable, constitue une source équilibrée de tensions triphasée à fréquence fixe. Cependant, comme tout appareil électromécanique, elle est sujette à des pannes. La machine synchrone est une machine coûteuse qu'il convient de protéger efficacement contre les défauts internes.[1]

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales [2]

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique :

### I.5.1 Les machines à réluctance variable

Elles ont l'avantage d'une structure mécanique très simple. Il existe deux structures différentes de machine à réluctance variable pour les applications automobiles. La structure de Miller est à réluctance commutée [3]. Le rotor pour une machine à réluctance synchrone, est constitué d'un empilement de tôles magnétiques et de matériaux non ferromagnétiques [4].

Excepté le bobinage du stator, la machine à réluctance commutée n'est construite qu'avec un empilement de tôles magnétiques découpées en formes plus ou moins anguleuses, entraînant un coût moindre et une bonne robustesse mécanique. Malheureusement, cette machine génère également un bruit acoustique et des vibrations, ce qui pose des problèmes d'intégration et complique l'optimisation de la structure magnétique de la machine. Résoudre ce problème nécessite une analyse précise des vibrations dans la machine, par des calculs numériques par exemple [5], ainsi que d'étudier les phénomènes qui peuvent les générer, tel que la commande et l'alimentation.



**Fig.I 1** : Machine synchrone à reluctance variable (M.R.V)

### I.2.2 Les machines synchrones à aimant permanent

La technologie des machines synchrones à aimants permanents est celle que l'on trouve dans les véhicules hybrides commercialisées actuellement. Elle prend l'avantage sur les autres machines électriques sur les critères « performances » et « volume ». La présence des aimants

comme source de flux permet de réduire le calibre en courant de l'onduleur. Le sur coût des aimants en terres rares est ainsi compensé par un coût de l'électronique de puissance plus faible, ce qui ramène le coût global à un niveau comparable aux autres technologies de machines.

Les machines synchrones à aimants présentent par ailleurs le défaut d'avoir un défluxage difficile, dû à l'excitation fixe des aimants permanents. Or, dans les régimes de fonctionnement à puissance constante et vitesse variable, il faut contrôler le flux vu par le bobinage du stator pour maintenir le niveau de tension du moteur. Pour cela, nous injectons un courant dans l'axe direct de la machine pour s'opposer au flux des aimants. Cela se traduit au final par un courant efficace plus élevé et donc des pertes" plus élevées. Il est alors indispensable d'étudier les différentes structures de machines et leurs régimes de défluxage pour trouver la meilleure solution spécifique à une application [6].

Cette technologie présente globalement d'excellentes performances qui rivalisent ou surpassent les autres technologies. Les combinaisons de structures sont nombreuses : aimants en surface, Aimants encastrés, aimants enterrés en double couche [7].



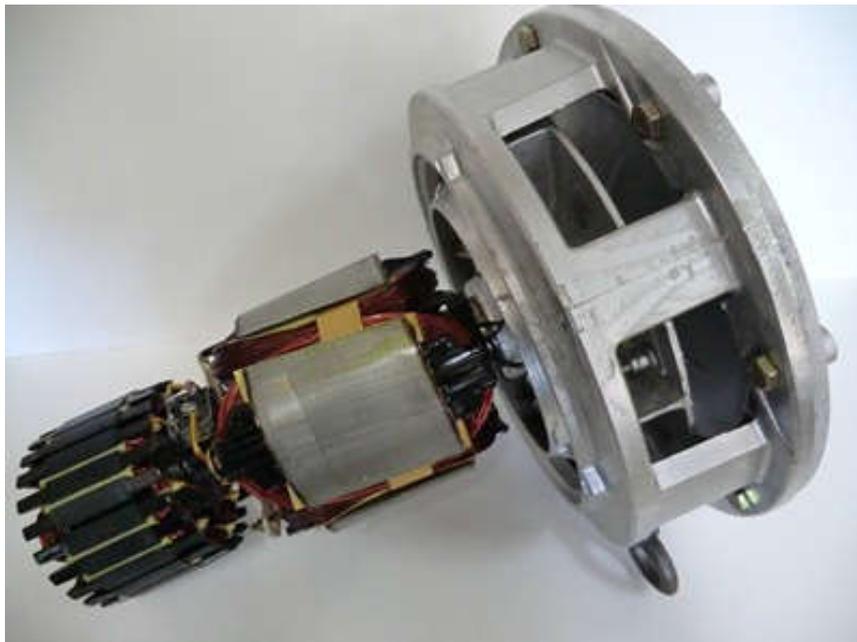
**Fig.I 2** : Machine synchrone à aimant permanent

### **I.2.3 Les machines synchrones à rotor bobiné**

A première vue, moins compétitives dans la perspective d'une production de masse que les machines asynchrones à cage en aluminium [8]. L'alimentation de l'excitation du rotor nécessite

un hacheur et des contacts glissants, ce qui complexifie la structure du rotor et impose un volume supplémentaire à intégrer autour de la machine. Il y a plusieurs travaux des chercheurs qui ont comparé les performances de la machine synchrone à rotor bobiné avec une machine asynchrone de mêmes dimensions sur le cahier des charges d'une véhicule hybride [9]. Dans les résultats présentés, la machine synchrone conserve un avantage dans les régimes de fonctionnement de fortes puissances mais les rendements sont très similaires pour les deux machines.

Les machines à griffes appartiennent également à cette famille des machines synchrones à rotor bobiné. De part leur simplicité et leur domination dans le marché automobile comme alternateur, ces machines sont un fort potentiel dans les hybridations automobiles de « faibles puissances » [10]. Leur intégration dans la véhicule ne nécessite en effet que peu de modifications. Leurs performances sont également améliorées par l'optimisation des structures d'alternateurs [11], des machines à 5 ou 6 phases pour réduire le bruit [12] ou encore des topologies de machines à griffes et à aimants. Cependant, le rendement en puissance que l'on peut espérer est limité (70% pour les meilleurs rendements) par rapport aux autres structures de machines, ce qui les rendent moins compétitives dans les régimes hybrides de freinage récupérateur et d'accélération. Leur utilisation en tant qu'alternateur n'est cependant pas remise en question à ce jour.



**Fig.I 3** : Machine synchrone à rotor bobiné

### Utilisation d'une machine synchrone en alternateur

La quasi-totalité de l'électricité produite en Algérie est issue d'alternateur de type synchrone (figure 4). Ces alternateurs de très forte puissance (jusqu'à 1500 MVA) diffèrent des machines synchrones classiques essentiellement par :

- La géométrie : l'augmentation de la puissance des alternateurs entraîne l'agrandissement de sa taille. Dépendamment de l'utilisation, l'augmentation de la taille peut concerner soit la longueur ou la périphérie de la machine.
- Les systèmes de refroidissement ainsi que les systèmes d'excitation sont eux aussi impressionnant pour les gros alternateurs.



**Fig.I 4** : Machine synchrone 100 MW

#### Avantage

- Bon rendement (0.985 pour gros alternateurs).
- Facteur de puissance réglable en fonction du courant d'excitation.

#### Inconvénients

- Pour les moyens/gros moteurs (électroaimant), demande un entretien des bagues.
- Si on demande trop de couple à un moteur synchrone, il décroche. Le couple chute alors à zéro.

-Ne permet pas un démarrage en direct sur le réseau sauf pour les moteurs auto-synchrones hybrides, ils possèdent une cage d'écureuil qui permet d'atteindre la vitesse synchrone à vide.

### Secteur d'utilisation

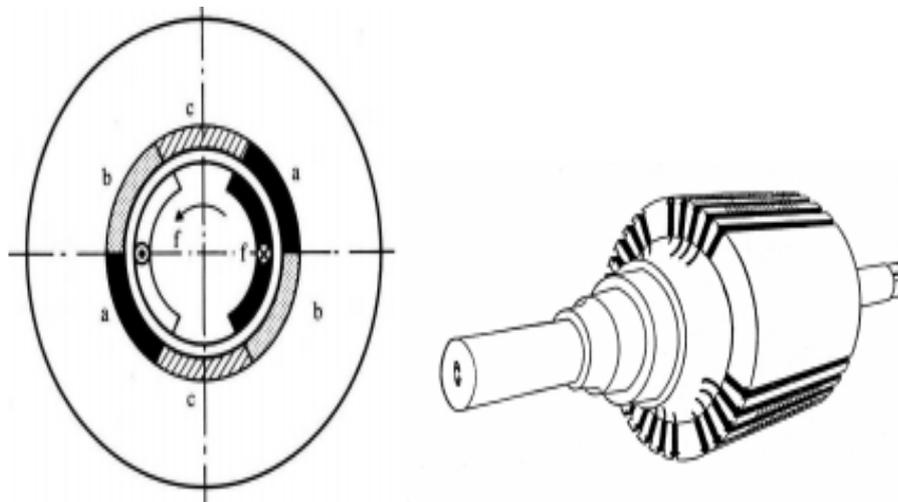
- Production d'énergie (alternateur à bon rendement)
- Application nécessitant une vitesse stable en fonction de la charge
- Moteur pas à pas

### I.3 Les types de machines synchrones

Les machines synchrones ont toutes un stator portant des enroulements triphasés . Notons que ce stator est constitué par un empilement de tôles (réalisées dans un Matériau à haute perméabilité magnétique) de manière à réduire le plus possible l'effet des courants de Foucault.

En revanche, nous distinguons deux types de machines synchrones, en fonction de la structure du rotor.

#### I.4.1 Machines à rotor lisse



**Fig.I 5** : machine à rotor lisse ( $p= 1$ )

Ces machines, appelées également turboalternateurs, sont généralement entraînées par des Turbines à vapeur ou à gaz. Ces dernières fonctionnent de préférence à des vitesses élevées. Ces machines synchrones comportent une, ou au plus deux, paires de pôles. Dans un Système à

50Hz, elles tournent donc à 3000 tr/min ( $p = 1$ , centrales thermiques classiques) ou à 1500 tours par minute ( $p = 2$ , Centrales nucléaires).

Le rotor est constitué d'un cylindre en acier forgé, de forme allongée dont le diamètre est relativement petit par rapport à la longueur, afin de réduire les contraintes mécaniques liées à la force centrifuge. Les conducteurs de l'enroulement d'excitation sont logés dans des encoches, creusées longitudinalement dans le rotor, comme le montre la figure 5.

Les machines synchrones modernes ont un excellent rendement, de l'ordre de 99 %. Ceci signifie néanmoins qu'un générateur d'une puissance nominale de 500 MW, par exemple, est le siège de pertes calorifiques d'une puissance de 5 MW, ce qui est loin d'être négligeable !

Il importe de refroidir la machine afin d'éviter des " points chauds " qui peuvent détériorer les isolants entourant les conducteurs. A cette fin, on fait circuler de l'hydrogène ou de l'eau à l'intérieur des barres creuses qui constituent les enroulements statoriques. L'hydrogène a une capacité d'évacuation de la chaleur sept fois supérieure à celle de l'air et l'eau douze fois.

#### I.4.2 Machines à pôles saillants

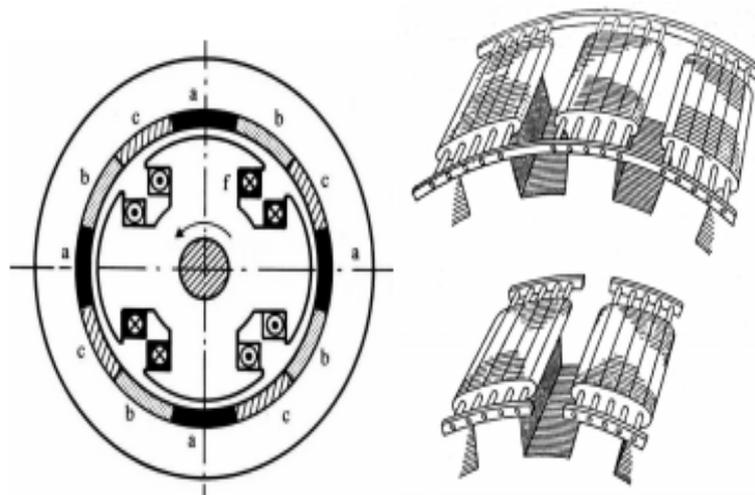


Fig.I 6 : machine à pôles saillants ( $p=2$ )

Ces machines sont généralement entraînées par des turbines hydrauliques. Ces dernières tournent à des vitesses nettement plus faibles que les turbo-alternateurs. Les machines synchrones qu'elles entraînent doivent donc comporter un nombre de paires de pôles beaucoup plus élevé (au moins quatre en pratique). Or, il serait malaisé de loger de nombreux pôles dans un rotor cylindrique comme celui de la figure 5. Il est plus indiqué de les placer en

"excroissance" comme représenté à la figure 6. L'entrefer d'une telle machine n'est pas d'épaisseur constante : il est minimum en face d'un pôle et maximum entre deux pôles. Comparé à celui d'un turbo-alternateur de même puissance, le rotor à pôles saillants présente un diamètre nettement plus élevé (forces centrifuges plus faibles) et une longueur nettement plus courte.

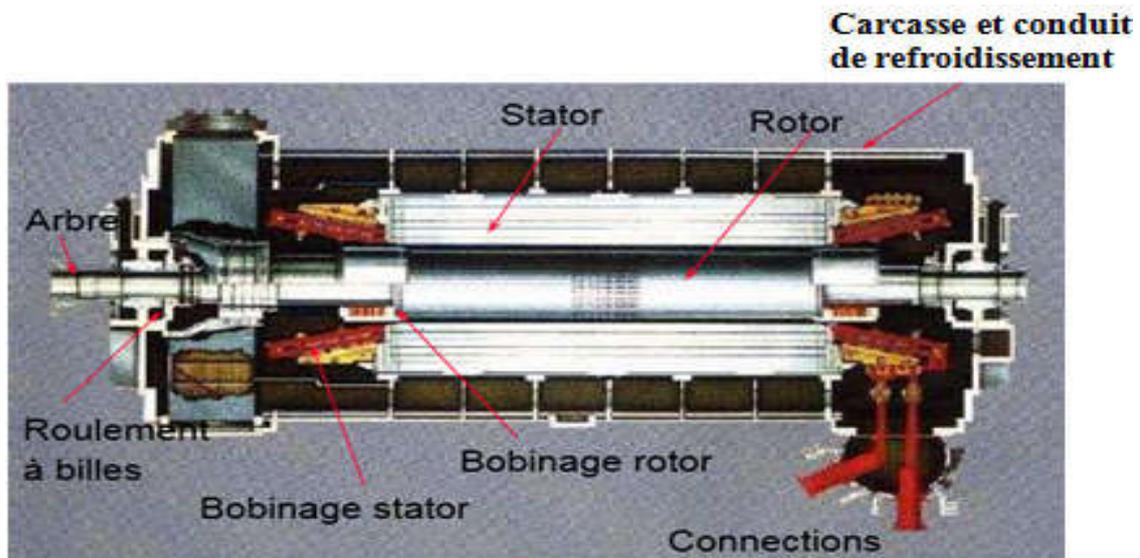
Le rotor est généralement constitué d'un empilement de tôles magnétiques serrées les une contre les autres. L'ensemble est calé sur l'axe de la machine, constitué d'un cylindre de diamètre plus faible.

Les générateurs à pôles saillants sont généralement refroidis par circulation d'air. Les rotors des générateurs synchrones sont également équipés d'amortisseurs. Dans les machines à rotor lisse, il s'agit de conducteurs plats, logés dans les mêmes encoches que ceux de l'enroulement d'excitation et reliés en leurs extrémités pour permettre la circulation des courants induits. Dans les machines à pôles saillants, les amortisseurs sont constitués de barres logées dans les pôles et reliées à leurs extrémités par des anneaux (figure 6) ou par des segments. En régime établi parfait aucun courant ne circule dans les barres d'amortisseur. En effet, les champs statoriques et rotoriques sont fixes par rapport au rotor le flux d'induction magnétique est donc constant dans le circuit constitué par les barres d'amortisseurs et aucune tension n'y est induite. Par contre, suite à une perturbation, il se peut que le rotor oscille par rapport au champ statorique. Des courants sont alors induits dans les barres d'amortisseurs. En vertu de la loi de Lenz, ces courants induits tendent à s'opposer à la cause qui les crée. Il apparaît donc un couple de rappel supplémentaire qui tend à amortir les oscillations du rotor et à réaligner ce dernier avec le champ statorique. Ce couple d'amortissement n'existe qu'en régime perturbé.

Dans les turboalternateurs, des courants sont induits dans la masse métallique du rotor et ces courants créent également un couple d'amortissement.

#### **I.4 Alternateur**

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute l'énergie électrique que nous consommons; ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. L'Alternateur est une machine synchrone générant un courant alternatif triphasé, elle transforme l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW.[13]



**Fig.I 7** : Photographie de l'alternateur

Les turboalternateurs sont des machines synchrones à pôles lisses largement utilisées dans la production d'électricité d'origine thermique ou nucléaire. Il est essentiel que ces machines soient fiables, puisqu'un arrêt implique non seulement des pertes financières élevées, mais aussi, comme il s'agit d'alternateurs de grande puissance, une interruption de la génération d'une quantité importante d'énergie, ce qui peut affecter la stabilité du réseau.[14]

### I.5.1 Description

a) **Stator** : c'est la partie fixe de l'alternateur. Il se compose de :

-**carcasse** : Destinée à recevoir le circuit magnétique, est réalisée en un seul élément.

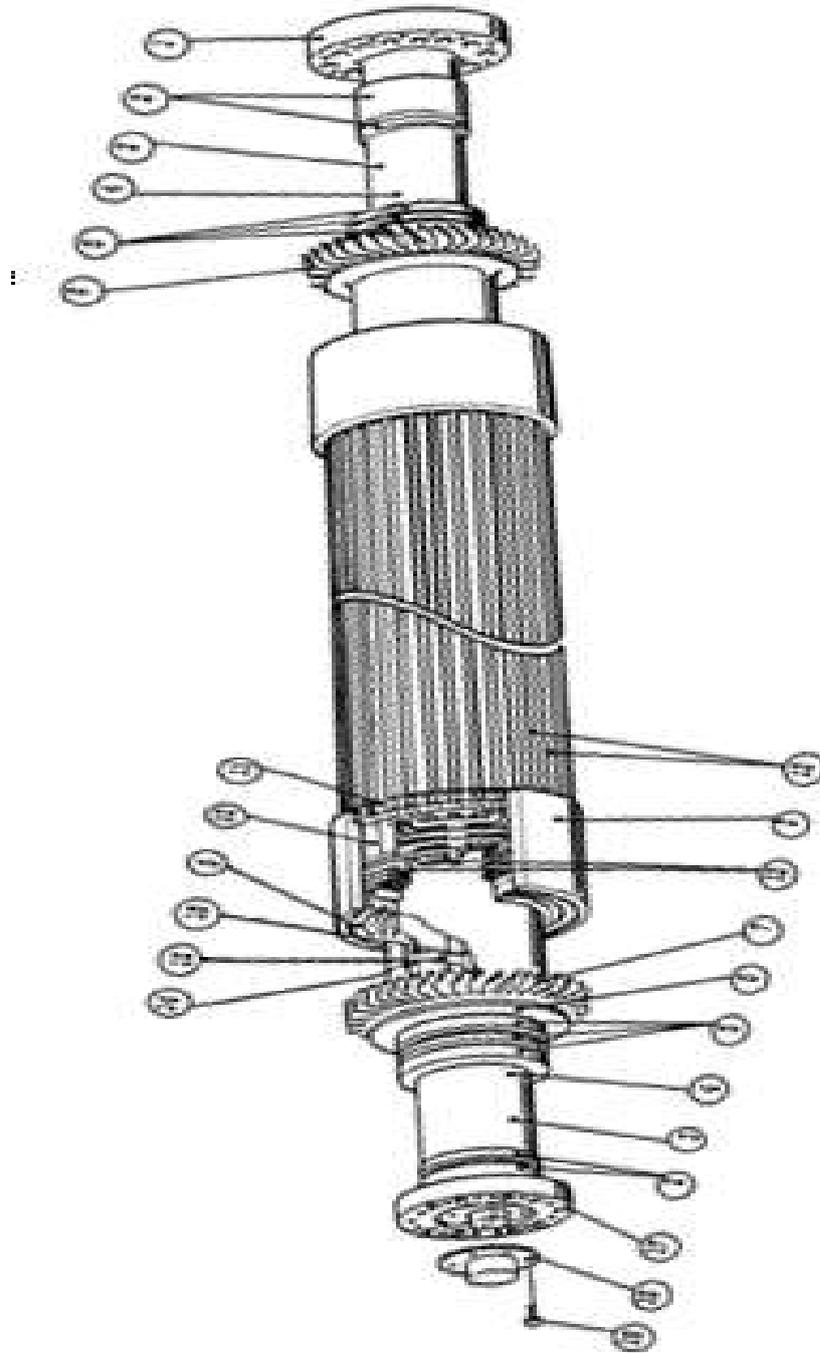
-**circuit magnétique** : est constitué d'un empilage de tôles magnétiques isolées entre elles, assurant un refroidissement efficace des parties actives de la machine.

-**Bobinage stator** : le bobinage est formé de barres, constitué de fil de course de 4x2mm, isolé de deux grippages verre fin , chaque barre est formée de 60 rubans de cuivre.

b) **Rotor** : c'est la partie tournante de l'alternateur, entraînée par la turbine.il est composé de :

1. plateau d'accouplement coté TUREBINE
2. portée des couvercles extérieurs
3. fusées

4. sans objet
5. portée des couvercles intérieurs
6. plateaux porte ventilateurs
7. ventilateurs axiaux
8. frettes
9. plateau porte frettes
10. amortisseurs
11. verrou de frette
12. calage des têtes de bobines
13. encoches longitudinales
14. connexion extérieure
15. tiges de connexion radiale
16. connexion centrale
17. plateau d'accouplement coté excitation
18. couvercle de protection
19. vis de fixation



**Fig. I 8 :** les composantes de rotor d'alternateur

**Arbre rotor :** l'arbre en acier forgé est du type monobloc, une extrémité est prévue pour recevoir le manchon d'accouplement au réducteur turbine, l'autre extrémité est épanouie et forme le plateau pour accouplement avec l'arbre rotor de l'alternateur d'excitation pour accouplement avec réducteur des auxiliaires.

La partie centrale est usinée pour recevoir l'enroulement inducteur.

**Bobinage rotor :** Le bobinage inducteur du rotor est constitué de conducteurs en cuivre à l'argent méplat à haute conductibilité.

La forme des spires est obtenue sur gabarit.

- c) **Ventilation :** la ventilation de l'alternateur se fait en circuit ouvert. Des ouvertures sur la carcasse du stator permettent le raccordement du circuit d'air de ventilation, aux gaines d'amenée et de refoulement preuves.

**Ventilation du stator :** La ventilation du stator est très efficace et permet de refroidissement du circuit magnétique et du bobinage.

**Ventilation du rotor :** le fond des encoches du rotor est pourvu d'un canal longitudinal dans lequel circule l'air de refroidissement.

d) **Paliers :**

La carcasse est fermée à ces extrémités par des flasques en deux pièces, les parties inférieures de ces flasques supportent chacune un palier constitué d'une coquille en acier contenant le coussinet en deux parties, ces coussinets sont munis de blocs de centrage isolés pour éviter le passage des courants de circulation.

**Paliers N°01 :** est situé dans le corps d'admission du compresseur.

**Paliers N° 02 :** est situé dans la partie intérieur du corps d'échappement compresseur.

**Paliers N° 03 :** est situé au centre du cadre d'échappement au bout de l'arbre turbine.

### I.5.2 Fonctionnement

Le rotor de l'alternateur est entraîné par la turbine. Lorsque la vitesse de la turbine atteint 97.5% de la vitesse nominale, le relais s'excite et donne l'ordre d'amorçage de l'excitation alternateur en fermant le contacteur, qui donne lui-même l'ordre de fermeture du contacteur d'amorçage. La batterie alimente l'inducteur de l'excitateur, l'excitateur fournit le courant d'excitation au rotor de l'alternateur principal. Le rotor induit une f.é.m. au niveau du stator. Cette tension croît. L'amorçage est stoppé à environ 30% de la tension nominale stator. Dès cet instant là l'alternateur est auto excité. La tension stator continue à croître jusqu'à la tension de consigne.

Le dispositif de synchro-couplage agit sur la vitesse de la turbine et sur la consigne de régulation de tension pour réunir les conditions de couplage. Après couplage, le groupe monte en charge et s'y maintient à la consigne de charge minimale (5MW) en attendant d'une prise de charge plus importante. Le régulateur de charge assure l'asservissement de la puissance fournie à un point de consigne sélectionné

L'arrêt du groupe sur un ordre normal ou par un ordre issu d'une protection, fait ouvrir le disjoncteur de groupe et en suite le circuit d'excitation. Le disjoncteur de groupe et en suite le circuit d'excitation.[14]

### **I.5 Les défauts de barre de l'alternateur**

Dans ce paragraphe sont présentés différents défauts d'un turboalternateur, leurs origines et leur classification.

Une défaillance de machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement [15]. Les raisons de défaillances dans les machines tournantes électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, nature de la charge et le calendrier de maintenance.

Les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine[6].

Une classification des défauts qui existent dans les alternateurs selon leurs origines est présentée comme suivante :

#### **I.6.1 Les défauts d'origine interne**

La source du défaut est une avarie d'un composant de la machine elle-même, l'isolation des conducteurs peut se rompre ou se percer par des causes (électriques, thermiques, mécaniques)

##### **Electriques :**

- Court-circuit entre une phase et la masse

- Court-circuit entre 2 phases avec ou sans contact a la masse
- Court-circuit entre les 3 phases, souvent par évolution d'un court-circuit biphasé (extension d'arc)
- Défaillance au niveau de l'isolation
- Rupture de barre
- Défaillance au niveau du circuit magnétique

**Thermiques :** sur échauffement par surcharge ou manque de refroidissement

**Mécaniques :** usure, des organes mécaniques tels que constituée entraînant un dur mécanique qui se manifeste par une surcharge de l'alternateur, comme :

- Contact entre le stator et rotor
- Défaut de roulements
- Excentricité
- Mouvement des enroulements et des tôles [18] [19]

### I.6.2 Défauts d'origine externe

Les groupes constitués d'une turbine ou d'un moteur thermique et d'un alternateur peuvent être soit connectés directement à un système de distribution (réseau d'usine, auto producteur), soit raccordés au système général de production transport distribution d'électricité, ou réseau par l'intermédiaire d'un transformateur élévateur de tension, appelé transformateur principal (TP).

Dans une centrale de production, l'énergie nécessaire aux auxiliaires est prélevée, soit en amont, soit en aval du transformateur principal, par un transformateur de soutirage (TS).

Les défauts qui peuvent affecter le système électrique sont de différentes natures :

- Les courts-circuits, monophasés ou polyphasés, peuvent se produire sur la liaison directe entre l'alternateur et le réseau ou entre l'alternateur et le TP et/ou le TS ; sur la liaison entre le TP et le système électrique ; sur les alimentations des services auxiliaires.

Les déséquilibres entre la production et la consommation d'énergie électrique peuvent être dus à :

- Un manque de production, entraînant une baisse de fréquence du groupe turboalternateur.

- Un surplus de production, entraînant une hausse de fréquence du groupe turboalternateur.
- Un défaut de répartition des charges, principalement réactives entraînant une surcharge en courant de l'alternateur ; la surcharge en puissance active est, en effet, peu probable, du fait de la limitation de puissance mécanique de la machine motrice (Turbine, moteur diesel, etc.).

Les pertes de synchronisme de l'alternateur raccordé au réseau peuvent provenir de :

- L'apparition et le maintien d'un court-circuit sur le réseau, proche de l'alternateur.
- L'augmentation de l'impédance de liaison (ouverture de lignes HT), au-delà de la limite de stabilité.
- L'augmentation de l'angle interne (diminution du courant d'excitation de l'alternateur)

Les courants déséquilibrés peuvent être dus à :

- Une alimentation de charges monophasées.
- Des dissymétries locales de réseau (non-transposition de lignes, ouverture de phase ou courts-circuits bi- ou monophasés).
- Les baisses de tension du réseau peuvent provenir d'une insuffisance de production de l'énergie réactive (tension basse) ou de courts-circuits (creux de tension). Ces phénomènes entraînent une surcharge en courant de l'alternateur, voire une perte de synchronisme.

Les surtensions sont dues à :

- un défaut de fonctionnement de la régulation de tension de l'alternateur.
- une diminution brutale de la puissance fournie par la machine ou délestage, par ouverture de la ligne de raccordement au réseau par exemple. Ce défaut peut affecter plus particulièrement des groupes hydrauliques, dont la régulation de vitesse est en général plus lente que celle des turboalternateurs.

Les défauts mécaniques ont des conséquences sur les grandeurs électriques, par exemple la fermeture volontaire ou intempestive des vannes d'alimentation en vapeur (ou en eau) de la turbine entraîne le passage de la machine en fonctionnement en moteur synchrone, avec consommation de puissance active sur le réseau. C'est la phase dite de retour d'énergie. Notamment, si le groupe reste couplé au réseau, le fonctionnement de la turbine à vapeur dans

ces conditions n'est pas admissible de façon prolongée, du fait du risque d'échauffement des ailettes.[20]

La Figure 9 présente l'arbre de défaut de la machine synchrone où les défauts sont classifiés selon leur emplacement : rotor et stator

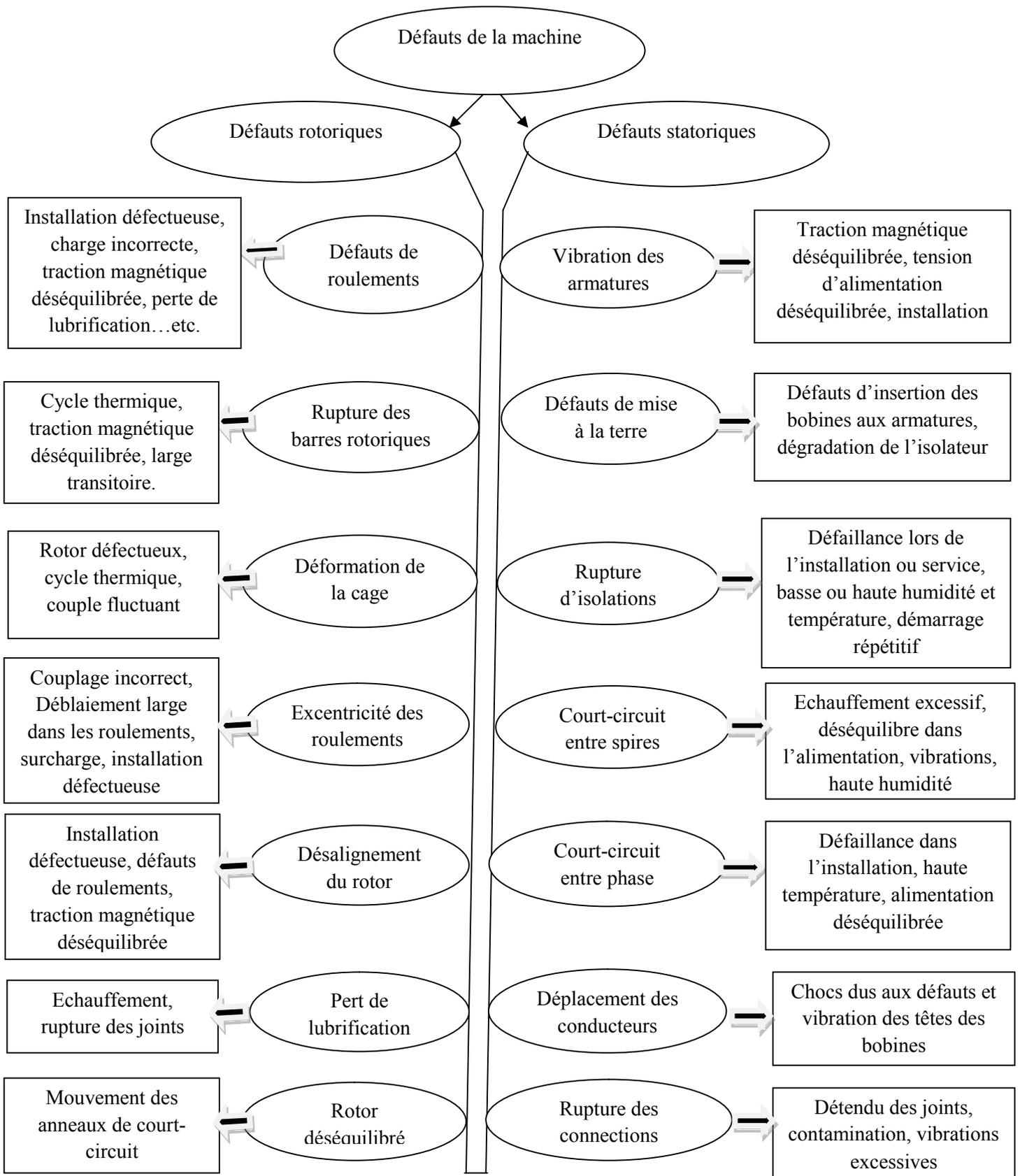


Fig.I 9 : Principaux défauts de la machine synchrone

## I.6 Défauts de rupture de barres

Nous nous intéressons dans notre travail sur les défauts de rupture de barre, le même défaut que nous retrouvons dans le stator.

La rupture de barre est un défaut le plus fréquent au stator. Elle peut se situer au niveau de son encoche. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations (nous détaillons dans le chapitre suivant avec des résultats des simulations), qui elles-mêmes provoquent une engendre des vibrations mécaniques et donc un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine[21]. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées[22].

L'apparition d'un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leur rupture et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine.

Devant la multitude des défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, les techniques de surveillance se sont rapidement imposées auprès des utilisateurs des machines électriques. Elles commencent également à intéresser les concepteurs.

Les ruptures de barres peuvent être dues par exemple à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.) à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures). Cela fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante) [23], si l'inertie de l'entraînement est plus faible des oscillations apparaissant sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques.

## Conclusion

Après plusieurs années de fonctionnement, les machines sont plus susceptibles de développer des défauts dans les stators des turboalternateurs. Dans le cas où ces défauts s'avèrent graves, ils peuvent entraîner la destruction partielle totale de la machine, et par conséquence provoquer un arrêt de cette machine. Donc on a besoin des méthodes pour détecter ces défauts.

# **CHAPITRE II :**

## **Méthode Des Eléments Finis**

## II.1 Introduction

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation. Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face aux différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement.

La modélisation permet de s'affranchir de ces difficultés si l'on possède des modèles de machine électrique dédiés au diagnostic, c'est-à-dire des modèles de fonctionnement sains mais aussi des modèles de fonctionnement en présence de défaut. En effet, les méthodes de modélisation jouent actuellement un rôle important dans la capitalisation des connaissances de l'état de la machine, du procédé et de la caractérisation des défaillances. Il existe à ce jour plusieurs méthodes de modélisation adéquates comme la méthode des éléments finis et la méthode analytique. Grâce à ces approches, il est possible de décrire le comportement de la machine en présence d'un défaut et de permettre ainsi de caractériser son influence.

## II.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (FEM) est la méthode la plus adéquate et la plus répandue pour le calcul de champs magnétiques statiques ou quasi-statiques, elle permet de décrire fidèlement des géométries complexes et de tenir compte des non linéarités des propriétés physiques telles que la loi (hb dans les matériaux magnétiques) [24] [25]. La modélisation des machines électriques a connu un développement remarquable ces dernières décennies grâce à l'utilisation de la méthode des éléments finis. En effet, beaucoup de laboratoires et chercheurs se sont penchés sur différents aspects pour aboutir actuellement à des outils de calculs permettant de tenir compte de plusieurs phénomènes physiques jusque là négligés ou approchés par des modèles externes. La méthode d'éléments finis est capable d'examiner l'effet de saturation et les effets d'harmoniques de l'espace et donne beaucoup d'informations précises sur le comportement des machines électriques.

Les analyses en régimes transitoires pas à pas dans le temps de la machine électrique se font grâce à la disponibilité des ordinateurs puissants. Cette méthode a permis un apport significatif en termes d'identification des paramètres des modèles circuit alliant ainsi la rapidité des modèles circuits et la précision des modèles champ. L'utilisation de cette méthode pour la modélisation des défauts dans les machines électriques est une étape importante qu'ont franchi un certain nombre de chercheurs [26] [27] [28]. Lorsqu'un défaut se produit dans la machine électrique, la répartition des courants dans les encoches et la distribution du champ sont plus ou moins

modifiées en fonction de la gravité du défaut. La méthode d'éléments finis peut être utilisée pour le calcul de champs et l'identification précise des paramètres de la machine en présence de défaut.

L'avantage qu'apporte une méthode basée sur le calcul de champ réside dans le fait qu'elle décrit les phénomènes localement, en particulier un défaut, elle en donne ensuite une représentation globale vu du circuit électrique équivalent. Actuellement, on peut disposer d'un outil complet permettant la simulation d'une machine électrique en présence d'un défaut et connectée à son alimentation. C'est ce que nous allons présenter en détail dans les chapitres suivants. Cependant, l'utilisation de tels outils nécessite un temps de calcul long et une modélisation pour chaque configuration de défaut. Bien que cette approche de modélisation décrive précisément le comportement des variables internes et externes de la machine, elle ne peut pas être adéquate pour le diagnostic des machines électriques.

La méthode d'éléments finis a été utilisée pour l'identification des paramètres des modèles circuits équivalents de machines électriques avec défaut. [29].

### II.3 Le principe du calcul par éléments finis

Le principe du calcul par éléments finis est de diviser la structure de la machine étudiée en nombre important d'éléments de dimensions finies puis de résoudre les équations de Maxwell sur chacun de ces éléments. Les conditions aux limites de chaque élément sont fixées par les éléments voisins. La combinaison de tous ces éléments de calcul permet alors de connaître l'état magnétique de la structure complète et donc d'effectuer des calculs de flux, de force, et d'inductance...L'intérêt de cette méthode de calcul est qu'elle permet comme tout calcul théorique d'avoir accès aux trois phases de manière indépendante. La méthode des éléments finis discrétise une formulation intégrale de l'équation aux dérivées partielles pour conduire à un système d'équations algébriques qui fournit une solution approchée du problème étudié.

Le domaine d'étude est décomposé en un nombre fini d'éléments polygonaux qui forment le maillage. La valeur du potentiel vecteur est déterminée sur tous les sommets des polygones (les sommets sont appelés les nœuds du maillage). En employant des fonctions d'interpolation appropriées, la solution en tout point du domaine sera déterminée en fonction des valeurs aux sommets de l'élément. Pour transformer un système d'équations aux dérivées partielles par une formulation intégrale les processus les plus souvent utilisés sont la méthode des résidus pondérés et la méthode variationnelle. Une seconde étude a été réalisée en régime dynamiques à l'aide du

logiciel FLUX 2d avec lequel deux modélisations ont été réalisées l'une pour le cas sain la seconde pour le cas de défaut [30].

## **II.4 Les différentes méthodes de résolutions**

Nous avons dit qu'il existe trois grandes familles de modèles permettant de simuler et d'optimiser une machine électrique avec : les modèles numériques, les modèles analytiques et les modèles semi-numériques. Elles ont toutes leurs avantages et leurs inconvénients, ce qui les rendent souvent complémentaires. Ces méthodes ont généralement été développées dans des logiciels de modélisation afin de faciliter le travail de conception. Ce paragraphe présente ces méthodes ainsi que les outils logiciels disponibles dans le cadre de ces travaux.

### **II.4.1 Les modèles analytiques**

Les modèles analytiques décrivent les systèmes à dimensionner avec des équations liées entre elles par des grandeurs physiques (magnétisme, thermique...) géométriques. Ils sont difficiles à mettre en place car ils nécessitent de décrire de façon analytique des phénomènes complexes (non-linéarité des matériaux, calcul de pertes...) [31]. Ils demandent une très bonne connaissance de ces phénomènes et du fonctionnement de la machine ce qui implique une grande expertise. Ces modèles amènent souvent le concepteur à réaliser des hypothèses plus ou moins fortes nécessitant de recalculer le modèle à partir de simulations numériques ou à l'aide de mesures réalisées sur des prototypes. Cependant les modèles analytiques présentent l'avantage de pouvoir effectuer des calculs rapides et il a été démontré dans [32] que coupler à un algorithme d'optimisation permet d'explorer un large domaine de solutions pour converger vers une configuration optimale.

Elle nous donne la solution exacte à travers les méthodes suivantes :

- Séparation des variables.
- Expansion des séries.
- Solution intégrale.
- Méthode de perturbation.

### **II.4.2 Les modèles semi-numériques**

Un modèle semi-numérique est un modèle analytique qui est mis en équation et résolu de façon numérique facilitant ainsi le travail du concepteur. Dans le domaine de

l'électromagnétisme ces modèles sont basés sur la théorie des réseaux de réductances qui s'appuie sur l'équivalence magnétique-électrique et permet de formuler un problème magnétique sous la forme d'un circuit électrique équivalent. D'autres physiques, comme la thermique peuvent être modélisées en utilisant la même analogie.

La mise en place de ce type de modèles nécessite une bonne connaissance du système et dans notre cas des lois de l'électromagnétisme. Ces modèles sont moins lourds à mettre en place que les modèles analytiques purs. Le point fort de cette méthode est d'allier la mise en équation et la résolution numérique à la rapidité de convergence des méthodes analytiques ce qui lui confère un compromis intéressant par rapport aux deux méthodes précédentes.

Cette méthode permet de réaliser des études paramétriques lourdes mais rapides avec une précision correcte ce qui est idéal pour effectuer du prédimensionnement [33] [34]. Il faut noter que la validation physique du modèle est très importante pour réaliser ce type d'études.

### II.4.3 Les modèles numériques de calcul éléments finis

Les méthodes de calcul par éléments finis ont depuis longtemps prouvé leur efficacité en simulation et en dimensionnement de systèmes électromagnétiques avec une très bonne précision [35] [7].

Elle nous donne la solution approximative à travers ces méthodes :

- La méthode des éléments finis.
- La méthode des résidus pondérés.
- La méthode moments.
- La méthode des différences finis.

### II.5 Les équations de Maxwell

Les calculs par éléments finis sont basés sur la résolution des équations de Maxwell dans l'hypothèse des états quasi stationnaires. Ces équations lient les différentes grandeurs qui caractérisent le fonctionnement d'un système électromagnétique soit le champ électrique  $\mathbf{E}$ , le champ magnétique  $\mathbf{H}$ , l'induction électrique  $\mathbf{D}$  et l'induction magnétique  $\mathbf{B}$  [36] [15] [37] [38].

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{II. 1})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II. 2})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 \quad (\text{II. 3})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = \rho \quad (\text{II. 4})$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) + \vec{B}_r \quad (\text{II. 5})$$

$$\vec{B} = \vec{B}(\vec{H}) \quad (\text{II. 6})$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_s \quad (\text{II. 7})$$

Les relations (II.1), (II.2), (II.3), (II.4) représentent les équations de Maxwell.

Les relations (II.5), (II.6) représentent les lois de comportement magnétique.

Les courants de déplacement sont négligeables devant les courants de conduction la loi d'Ampère (II.1) s'écrit alors :

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II. 8})$$

La loi de Gauss s'écrit (dans le cadre des systèmes étudiés on peut considérer que les charges

Volumiques sont négligées)

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = 0 \quad (\text{II. 9})$$

Le potentiel vecteur magnétique  $A$  est défini par :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (\text{II. 10})$$

Pour garantir l'unicité de la solution nous utiliserons la jauge de Coulomb soit :

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = 0 \quad (\text{II. 11})$$

La substitution de (II.10) dans (II.2) donne :

$$\vec{\nabla} \times \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II. 12})$$

Que l'on peut écrire en introduction le potentiel scalaire  $\phi$  :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} \phi \quad (\text{II. 13})$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} \phi \quad (\text{II. 14})$$

La substitution de par son expression (II.14) dans l'équation (II.7) donne :

$$\vec{j} = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \vec{\nabla} \phi + \vec{j}_s \quad (\text{II. 15})$$

A partir de (II.5), (II.8), (II.10), (II.15), l'équation aux dérivées partielles qui régit le problème s'écrit :

$$\vec{\nabla} \times \left( \frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{j}_s - \sigma \vec{\nabla} \phi - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} \times \vec{M}(\vec{A}) + \vec{\nabla} \times \left( \frac{1}{\mu_0} \vec{B}_r \right) \quad (\text{II. 16})$$

De (I.28) on peut déduire :

$$\vec{\nabla} \times \vec{j} = 0 \quad (\text{II. 17})$$

L'introduction de (II.15) dans (II.17) et en tenant compte de (II.11) donne :

$$\vec{\nabla} \times (\sigma \vec{\nabla} \phi) = 0 \quad (\text{II. 18})$$

La résolution des équations (II.15) et (II.17) en bidimensionnel. Dans ces conditions, le système est contenu dans le plan OXY, et on suppose qu'il est invariant dans la direction OZ.

La forme de la solution recherchée vérifie l'équation

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = \frac{\partial A_z(x, y, t)}{\partial z} = 0 \quad (\text{II. 19})$$

Le fait que  $J$  ait une seule composante selon la direction OZ nous permet de choisir donc

$$\phi = 0.$$

Ainsi la relation (II.15) s'écrit

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -js + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \left( \frac{\partial My}{\partial x} - \frac{\partial Mx}{\partial y} \right) - \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_0} (Rr)_y \right) \right) - \left( \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_0} (Rr)_x \right) \right) \quad (\text{II. 20})$$

## II.6 Le logiciel FLUX 2D

Le calcul par MEF est largement développé au cours de ces dernières années grâce aux grandes améliorations dans le domaine informatique. Cette avancée a mis au point des logiciels très performants tels que FLUX2D, FEMLAB, FEMM et Maxwell 2D. Ces derniers permettent de traiter les problèmes électromagnétiques les plus complexes.

Dans cette section, un modèle magnétostatique à deux dimensions d'un Turboalternateur est établie. Celui-ci tient compte des spécificités géométriques de la machine ainsi que de la nature de ses matériaux. La résolution de ce modèle est effectuée à l'aide du logiciel commercial de la société **Cedrat** « FLUX 2D » basé sur la méthode des éléments finis (MEF) à deux dimensions. Il permet le calcul des états magnétiques, électriques ou thermiques des dispositifs en régimes permanents, transitoires et harmoniques, avec des fonctionnalités d'analyse multiparamétrique étendues, les couplages circuit et cinématique. Ceci nécessite la résolution d'équations diverses équations de Maxwell, de la chaleur, loi de comportement des matériaux. Flux est développé (en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Electrostatique et Matériaux Diélectriques et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué en France par la société CEDRAT.

Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite " bande de roulement " pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage.

Le modèle géométrique est basé sur la mise en œuvre des coordonnées de tous les points et de leur fusion en utilisant des lignes pour définir les bords de chaque partie de la machine [39] [40].

Les étapes nécessaires pour analyser un problème sous FLUX 2D sont les suivantes :

- ✓ Choisir le plan de travail  $[x, y]$  en coordonnées cartésiennes ou  $[r, z]$  en coordonnées polaires.
- ✓ Donner les Caractéristiques général de la machine
- ✓ Introduire minutieusement les dimensions géométriques des différentes parties de la machine.
- ✓ Affecter les matériaux des différentes parties de la machine.
- ✓ Affecter les conditions aux limites du domaine d'étude.
- ✓ Choisir un maillage.
- ✓ Lancer la résolution.

L'environnement de travail du logiciel FLUX2D est donné par la figure II.1 :

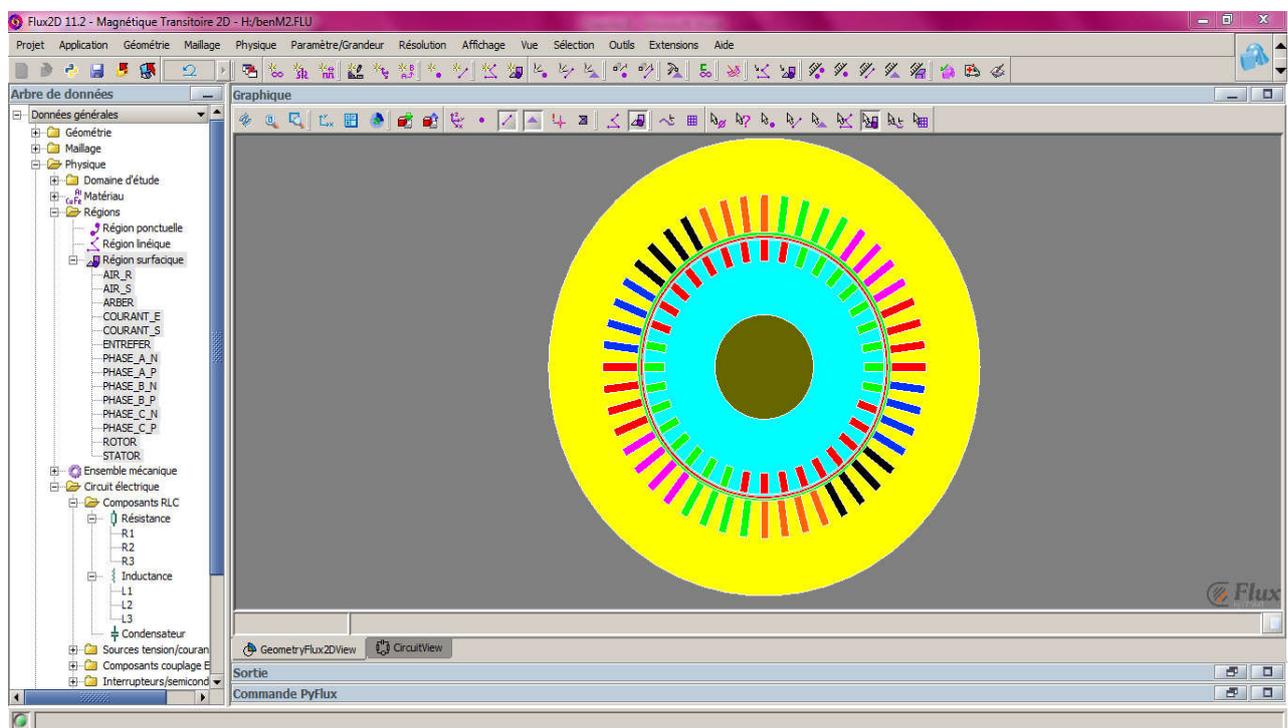


Fig.II 1 : L'interface de logiciel FLUX 2D

II.7 La discrétisation du domaine

La première étape consiste à discrétiser le domaine d'étude en éléments. Ces derniers ont une géométrie simple Figure II.2 Ils peuvent être à une, deux ou trois dimensions et avoir plusieurs ordres. Généralement, des éléments du premier ordre suffisent pour les domaines d'application classiques. Chaque élément est constitué de nœuds arêtes et facettes qui sont les inconnues de chaque élément. Ainsi, le type d'inconnues (nœuds, arêtes et facettes) dépend de la formulation utilisée. Ce sont ces inconnues que nous cherchons à déterminer dans un problème d'éléments finis.

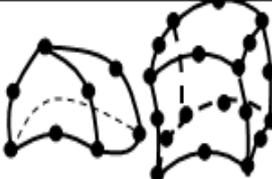
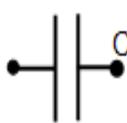
Eléments	linéaires	paraboliques (quadratiques)	cubiques
unidimensionnels			
bidimensionnels			
tridimensionnels			
autres types	 Masse	 Ressort	 Contact

Fig.II 2 : Les éléments finis sont générés par des points qui ne sont que des nœuds de la structure.

II.8. Approximation nodale

La méthode des éléments finis est basée sur la construction systématique d'une approximation  $u$  du champ des variables  $u$  par sous domaine. Cette approximation est construite sur les valeurs approchées du champ aux nœuds de l'élément considéré, on parle de représentation nodale de l'approximation ou plus simplement d'approximation nodale.

### II.8.1 Définition de l'approximation nodale

L'approximation par éléments finis est une approximation nodale par sous domaines ne faisant intervenir que les variables nodales du domaine élémentaire de :

$$\forall M \in De \quad (II. 21)$$

$$u \times (M) = [N(M)] \{U_n\} \quad (II. 22)$$

$u * (M)$  : Valeur de la fonction approchée en tout point M de l'élément

$[N]$  : Matrice ligne des fonctions d'interpolation de l'élément

$\{U_n\}$  : Variables nodales relatives aux nœuds d'interpolation de l'élément dans le cas général le champ à approcher est un champ vectoriel. Nous utilisons alors la notation matricielle suivante:

$$\{u \times (M)\} = [N(M)] \{U_n\} \quad (II. 23)$$

Les nœuds  $M_i$  sont des points de l'élément pour lesquels on choisi d'identifier l'approximation  $u^*$  à la valeur du champ de variables  $u$ . Nous en déduisons que :

$$\forall M_i \quad u \times (M_i) = u_i \quad (II. 24)$$

Soit pour l'approximation nodale

$$\forall M_i \quad N_j (M_i) = \begin{cases} 0 & Si i \neq j \\ 1 & Si i = j \end{cases} \quad (II. 25)$$

### II.8.2 Construction d'une approximation nodale linéaire

Soit une fonction d'une variable définie sur un domaine discrétisé en trois éléments à deux nœuds .Construisons l'approximation nodale associée à ces éléments Figure II.3.

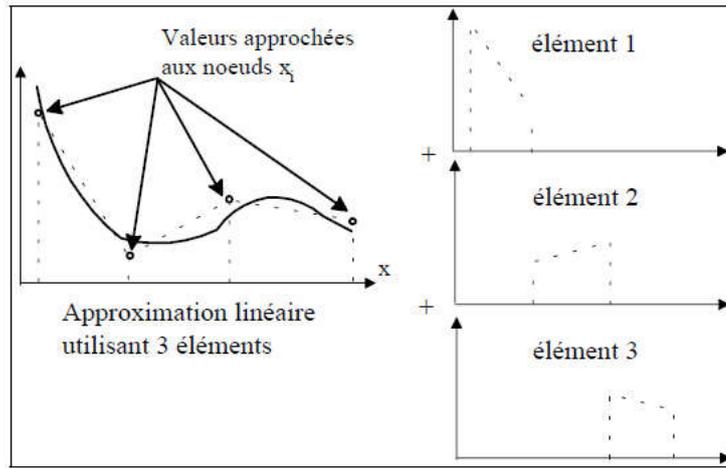


Fig.II 3 : Approximation nodale à une dimension

Pour chaque élément nous avons deux variables nodales nous cherchons donc une approximation à deux paramètres. Le plus simple est d'utiliser une base polynomiale ce qui nous conduit à une approximation linéaire de la forme :

Or pour

$$u(x) = [1, x] \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \tag{II. 26}$$

Pour

$$X = 0 \quad u(0) = u_i \tag{II. 27}$$

$$X = le \quad u(le) = u_j \tag{II. 28}$$

Nous en déduisons

$$\begin{cases} a_1 = u_i \\ a_2 = \frac{u_j - u_i}{le} \end{cases} \tag{II. 29}$$

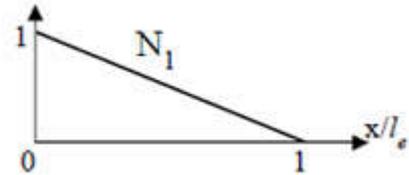
soit pour l'approximation position

$$u(x, t) = \left[ 1 - \frac{x}{le}, \frac{x}{le} \right] \begin{Bmatrix} u_i(t) \\ u_j(t) \end{Bmatrix} \tag{II. 30}$$

Nous venons de construire les deux fonctions d'interpolation de l'élément linéaire à deux

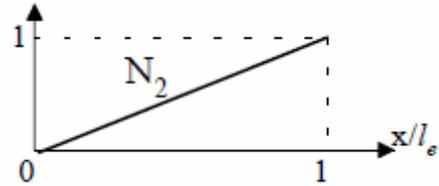
nœuds :  $N1(x) = 1 - \frac{x}{le}$

Nous vérifions que : 
$$\begin{cases} N1(0) = 1 \\ N1(le) = 0 \end{cases}$$



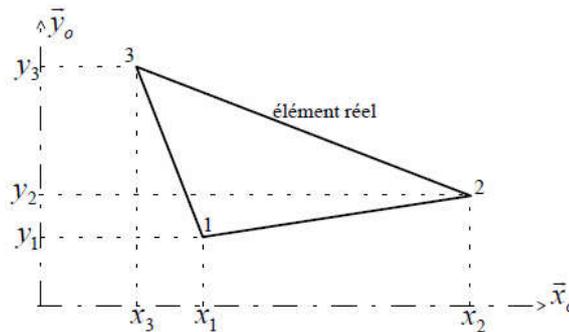
$N2(x) = \frac{x}{le}$

Nous vérifions que : 
$$\begin{cases} N2(0) = 0 \\ N2(le) = 1 \end{cases}$$



### II.8.3 Construction des fonctions d'interpolation d'un élément triangulaire

Soit un élément triangulaire à trois nœuds :



Nous avons trois variables nodales, nous cherchons donc une approximation polynomiale linéaire de la forme :

$$u(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \end{Bmatrix} \tag{II. 31}$$

Identifions les valeurs nodales :

$$u \times (x_i, y_i) = u_i \tag{II. 32}$$

Nous obtenons la relation matricielle suivante :

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \tag{II. 33}$$

Il est simple de vérifier que la relation inverse est de la forme :

$$\tag{II. 34}$$

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{pmatrix} \Delta_{23} & \Delta_{31} & \Delta_{12} \\ y_{23} & y_{31} & y_{12} \\ x_{32} & x_{13} & x_{21} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \text{ avec } \begin{cases} A = \text{aire du triangle} \\ x_{ij} = x_i - x_j \text{ et } y_{ij} = y_i - y_j \\ \Delta_{ij} = x_i y_j - x_j y_i \end{cases}$$

Reportons ces résultats dans l'approximation nous obtenons :

$$u \times (x, y) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \tag{II. 35}$$

$$N_i = \frac{1}{2A} (\Delta_{jk} + x y_{jk} - y x_{jk}) \tag{II. 36}$$

Avec par permutation circulaire de ijk

Nous venons de construire les fonctions d'interpolation d'un élément triangulaire quelconque, si la démarche est simple les calculs le sont moins du fait de la forme quelconque de l'élément. En pratique les fonctions d'interpolation sont construites pour des éléments possédant des propriétés géométriques permettant de simplifier les calculs.

II.9 Eléments à deux dimensions triangulaires

a. Approximation linéaire

La base polynomiale utilisée est  $(1, s, t)$ . L'élément de référence est un triangle rectangle à trois nœuds de type "T3".

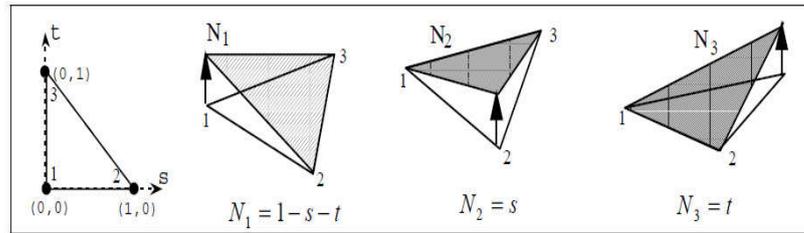


Fig.II 4 : Fonctions d'interpolations linéaires du triangle

b. Approximation quadratique

La base polynomiale utilisée est  $(1, s, t, s^2, st, t^2)$ . L'élément de références un triangle rectangle à six nœuds de type "T6" :

$$L1 = 1 - s - t, \quad L2 = s, \quad L3 = t$$

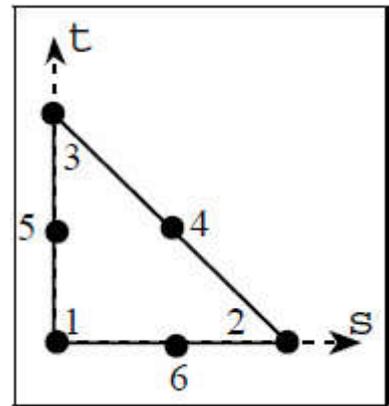
Pour les 3 nœuds sommet :

$$i = 1, 2, 3 \quad N_i = L_i (2L_i - 1)$$

Pour les 3 nœuds d'interface (4, 5, 6) :

$$i = 1, 2, 3 \quad N_{i+3} = 4L_i L_k$$

$$j = i, k \quad \text{et} \quad k \neq i$$



La figure ci dessous donne une représentation de deux des fonctions d'interpolation. Les autres s'obtiennent par permutation des indices.

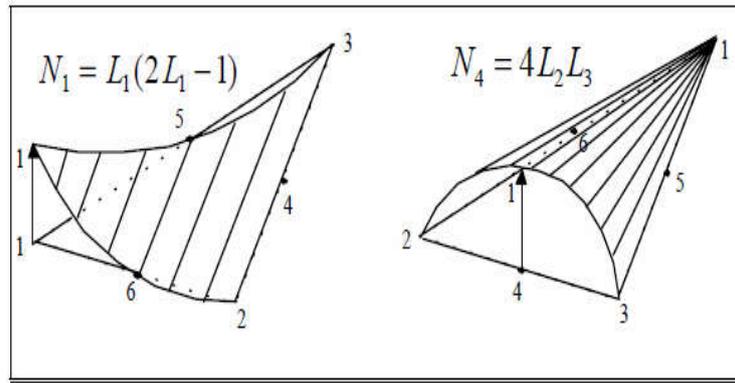


Fig.II 5 : Fonctions d'interpolations quadratiques du triangle

**c. Assemblage et conditions aux limites**

Les règles d'assemblage sont définies par la relation :

$$D \cong \sum_{e=1}^{ne} D_e \tag{II. 37}$$

L'assemblage des matrices élémentaires masse [Me] et raideur [Ke] s'effectue selon les mêmes règles. Ces règles sont définies par sommation des termes correspondant au travail virtuel calculé pour chaque élément :

$$\sum_{e=1}^{ne} \{ \delta un \} T [ M_e ] \{ \ddot{U}n \} = \{ \delta U \} T [ M ] \{ \ddot{U} \} \tag{II. 38}$$

$$\sum_{e=1}^{ne} \{ \delta un \} T [ K_e ] \{ Un \} = \{ \delta U \} T [ M ] \{ Un \} \tag{II. 39}$$

Cette opération traduit simplement que la forme quadratique associée à l'ensemble du domaine est la somme des formes quadratiques des sous - domaines. Elle consiste à « ranger » dans une matrice globale, les termes des matrices élémentaires. La forme de cette matrice dépend bien évidemment de l'ordre dans lequel sont définies les variables globales de {U}.

Pour les efforts donnés l'assemblage ne pose pas de problème, il est défini par sommation des termes correspondant au travail virtuel calculé pour chaque élément.

$$\sum_{e=1}^{ne} \{\delta u_n\}^T \{F d_e\} = \{\delta U\}^T \{F_d\} \quad (\text{II. 40})$$

Pour les efforts inconnus l'assemblage peut être mené de façon identique. Cependant, si les liaisons entre les éléments sont parfaites la somme des efforts inconnus aux nœuds internes de la structure est nulle. Nous pouvons en tenir compte pour simplifier l'expression du travail virtuel des efforts inconnus, en ne calculant que le travail virtuel des efforts correspondants aux liaisons cinématiques imposées à la structure, et à celui des liaisons non parfaites

Après assemblage, nous obtenons la forme matricielle du principe des travaux virtuels :

$$[M] \left\{ \ddot{U} \right\} + [K] \{U\} = \{F_d\} + \{F_i\} \quad (\text{II. 41})$$

## II.10 Etapes d'analyse par la MEF

Pour faire une analyse par MEF prenez soin lorsque vous faites la modélisation. Mieux vaut prévenir que guérir. Le processus de modélisation nécessite que l'action physique du problème à être résolu doit être bien comprise afin de choisir des types d'éléments finis appropriés, convenables, qui puissent représenter de façon adéquate l'action physique réelle [41].

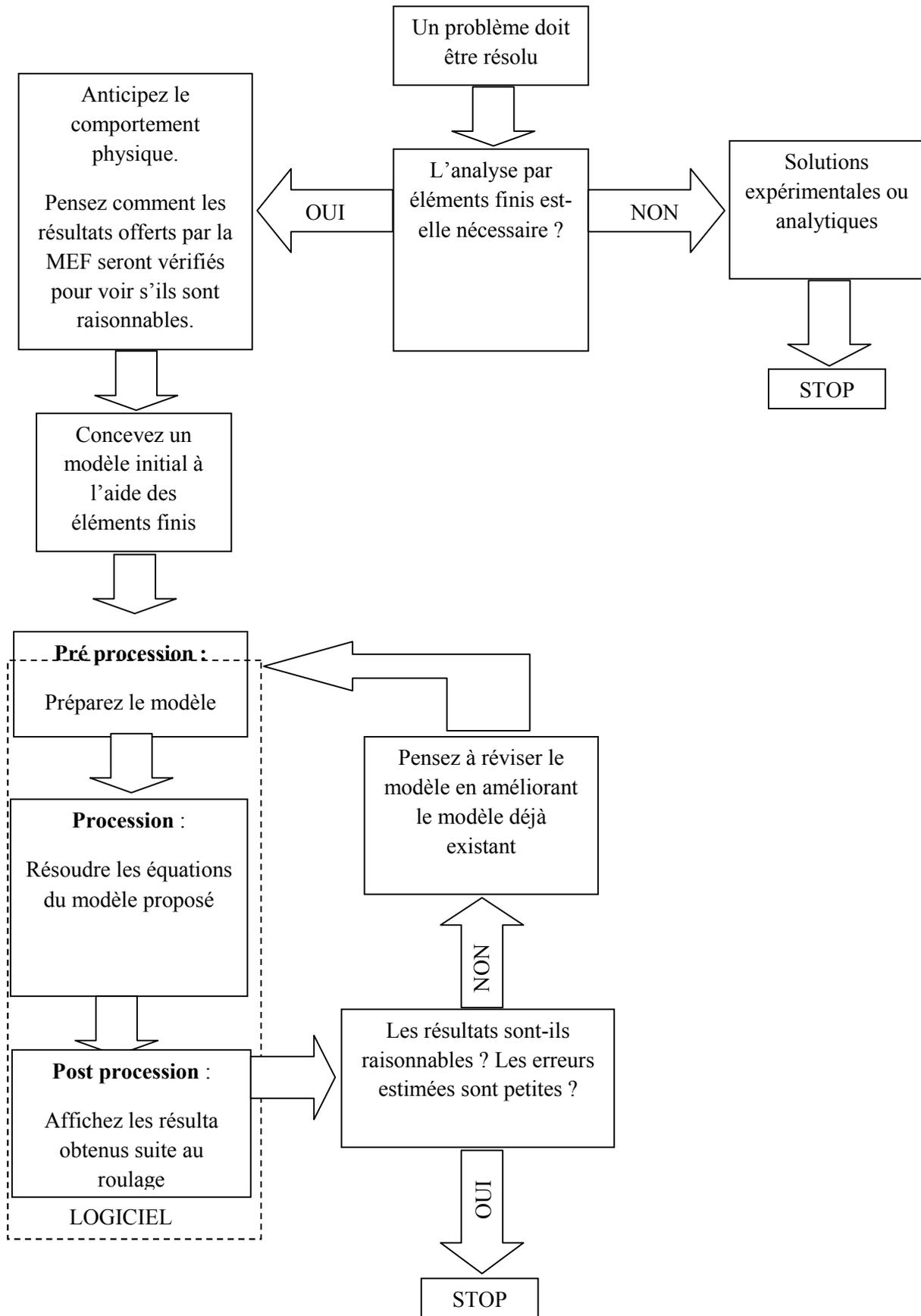


Fig.II 6: Principales étapes pour une analyse par la Méthode des Eléments Finis

**Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différentes méthodes de surveillance des défauts qui reposent souvent sur l'analyse des grandeurs mesurables et l'identification d'une signature d'un défaut déjà connu et répertorié. Les méthodes de modélisation jouent actuellement un rôle important dans la capitalisation des connaissances de l'état de la machine, du procédé et de la caractérisation des défaillances. Il existe à ce jour plusieurs méthodes de modélisation adéquates comme la méthode des éléments finis ou la méthode analytique. Grâce à ces approches, il est possible de décrire le comportement de la machine en présence d'un défaut et de permettre ainsi de caractériser son influence.

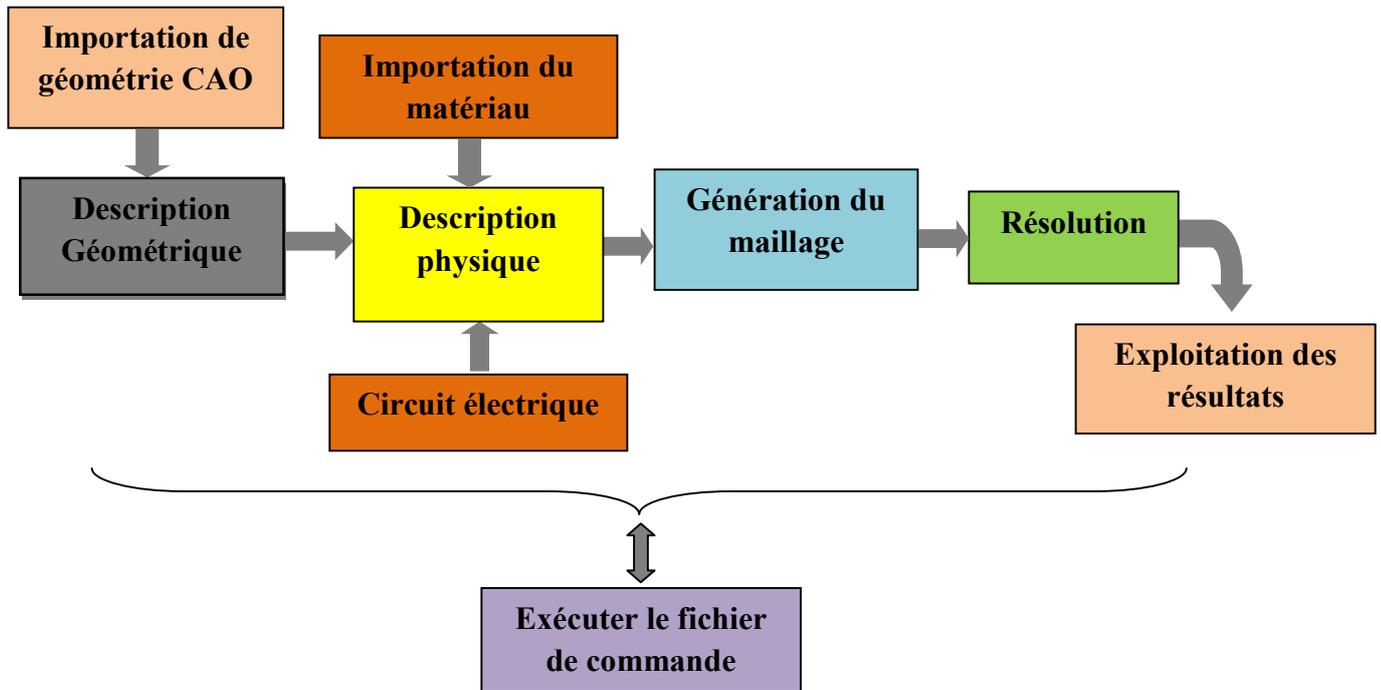
# **CHAPITRE III :**

**Application Sur La Méthode**

**Des Eléments Finis**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la modélisation d'une machine synchrone avec la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel FLUX2D. En suivant les étapes présentées dans le schéma synoptique suivant figure III.1 :



**Fig.III 1:** Le schéma synoptique des étapes de modélisation de la machine

### III.2 Pré-processeur

Au cours de cette partie nous allons entamer les caractéristiques géométriques, physiques et la décomposition de notre objet à modéliser :

#### 1. Caractéristiques générales de la machine synchrone triphasée :

- Puissance apparente nominale  $S_n = 26,7 \text{ KVA}$  ;
- Vitesse de rotation = 1500tr/min.
- Tension nominale entre phases  $U_n = 220\text{V}$  ;
- Courant nominal  $I_n = 20\text{A}$  ;
- Facteur de puissance  $\cos \varphi = 0,8$  inductif ;
- Fréquence  $f = 50 \text{ Hz}$  ;

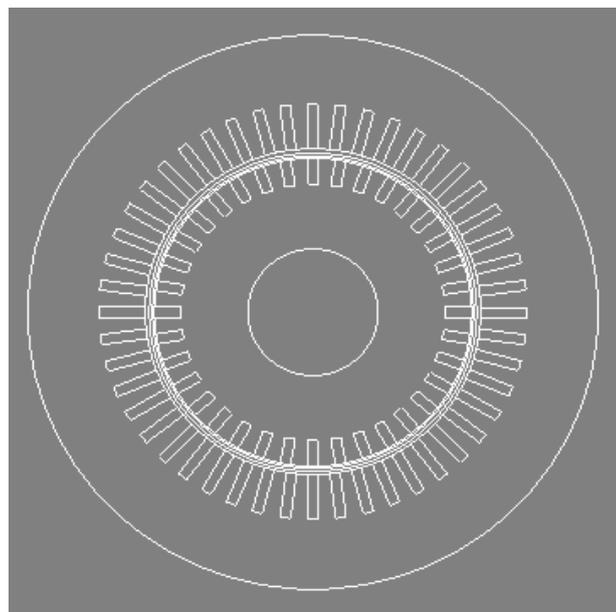
- Couplage étoile.

## 2. Construction de Géométrie

La saisie des paramètres de la machine dans **FLUX2D** :

**Tableau 1** : les paramètres Géométriques de la machine

Rayon rotor	307 mm
Rayon stator	552 mm
Longueur entrefer	1.67 mm
profondeur de la machine	380 mm
nombre d'encoches du rotor	36 encoches
nombre d'encoches du stator	48 encoches
Nombre de pôles	4 pôles
Largeur d'encoches rotoriques	10 mm
Largeur d'encoches statoriques	10 mm
Profondeur d'encoches rotoriques	18mm
Profondeur d'encoches statoriques	45 mm
Nombre de spires statoriques	10 spires



**Fig.III 2** : Géométrie de la machine

### 3. Physique

La description des caractéristiques physiques sert à:

- définir le type du problème (magnétostatique);
- à associer un matériau à chaque région qui compose le domaine figure III.3
- décrire les caractéristiques physiques des matériaux, en électricité, ce sont en général des caractéristiques électromagnétiques telles que: perméabilité magnétique, conductivité électrique, densité de courant,....etc
- décrire les conditions aux limites (conditions de Dirichlet) :

La condition issue de la méthode développée a été programmée sur toute la périphérie extérieure du domaine d'étude de notre générateur (Le potentiel magnétique  $A=0$ )

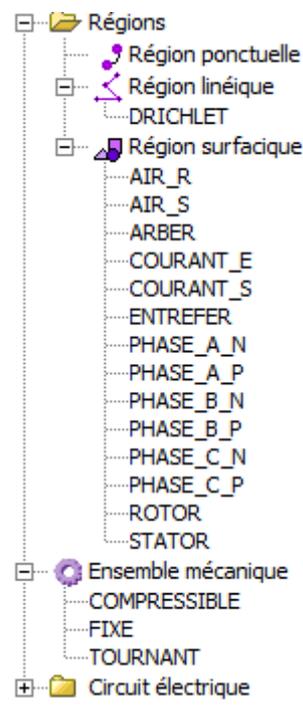


Fig.III 3 : propriété physique

### 4. Matériau

Dans le cadre des simulations par éléments finis nous avons modélisé les matériaux magnétiques doux à partir des courbes de premières aimantations données par le fabricant. Le matériau ferromagnétique doux susceptible d'être utilisés au rotor et stator est **FLU-STEEL-1010-XC10** La Figure III.4 présente le courbe de première aimantation de ce matériau.

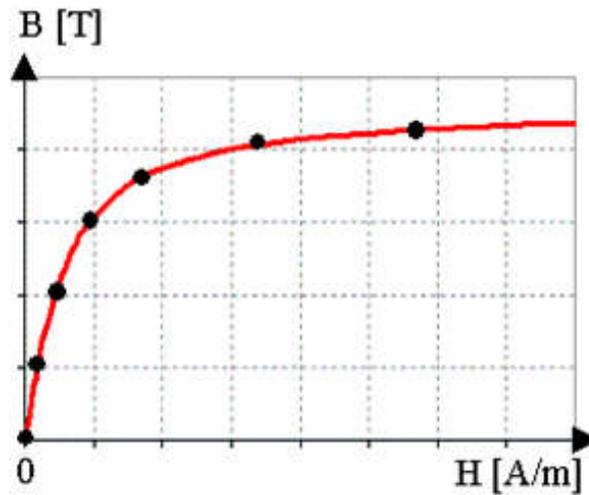


Fig.III 4 : Courbe B/H du FLU-STEEL-1010-XC10

### 5. Bobinage triphasé

la Figure III.5 représente le schéma de bobinage d'une phase statorique. Il faut alimenter le bobinage de telle sorte qu'il y ait un système triphasé équilibré aux bobines du stator. nous allons donc répartir également les encoches pour des phases A, B et C. suivant le repère :

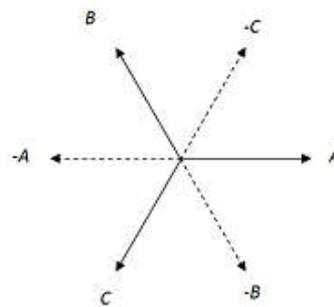
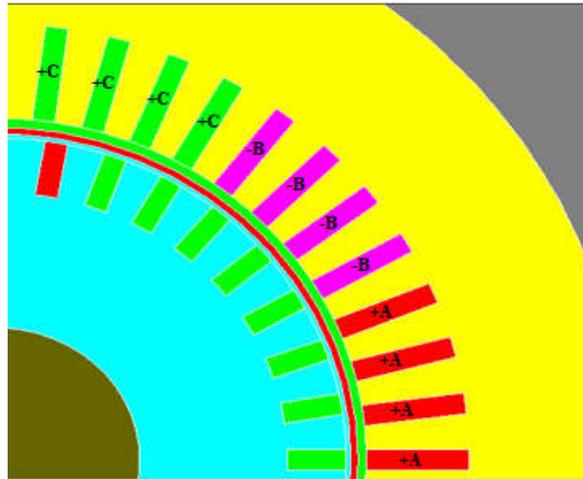


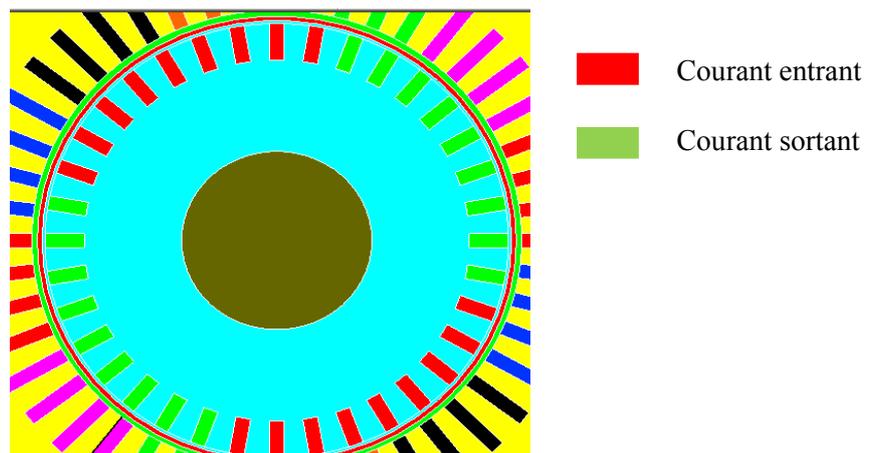
Fig.III 5 : Système vectorielle des phases A, B, C

S'il y a  $N_{enc}$  ,total alors dans un quadrant du machine, nous aurons  $N_{enc}/4$ . Comme nous souhaitons avoir un système triphasé équilibré, il faut qu'on alimente le même nombre d'encoches pour chaque phase. Puisqu'il y a trois phases, dans le premier quadrant nous avons  $N_{enc}/12$  pour chaque phase,( tel comme le montre la définition du nombre d'encoches par pôle et par phase  $m= N_{enc}/3.2p$  ). La figure suivante montre la distribution des phases pour une machine de 48



**Fig.III 6 :** Alimentation de la Machine Synchrone à concentration du flux

Nous faisons le bobinage rotorique d'une machine de 36 encoches et deux phases, nous avons 18 encoches pour chaque phase. La figure suivante montre la distribution des phases :



**Fig.III 7 :** Schéma de bobinage du rotor

## 6. Ensembles mécaniques

Nous allons spécifier les parties fixes et mobiles

1-Tournant : rotor et l'arbre

2-Fixe : stator

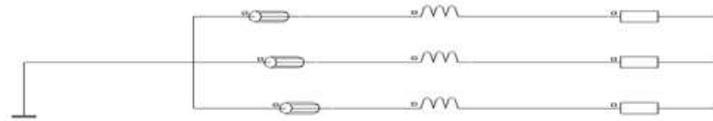
3-Compressible : entrefer

## 7. Circuit électrique

$$R1=R2=R3=100 \Omega$$

$$L1=L2=L3=0.001 \text{ H}$$

R interne de tous les conducteurs bobinés  $0.1 \Omega$

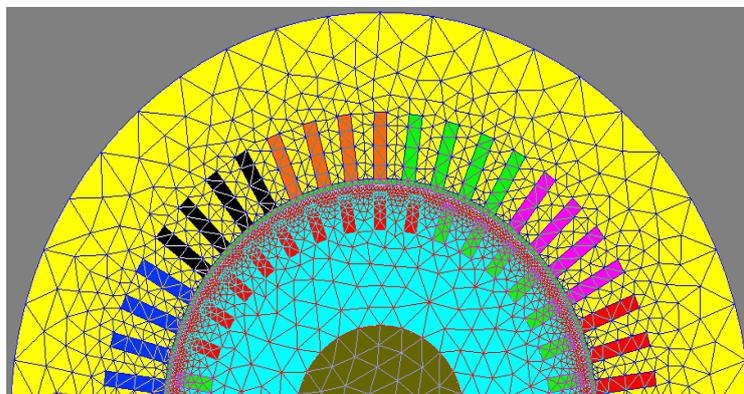


**Fig.III 8** : circuit électrique de la machine

## 8. Maillage

La méthode des éléments finis repose sur une discrétisation du domaine d'analyse selon un maillage.

Nous avons resserré ce maillage près des endroits d'intérêt (entrefer où entrées des encoches par exemple) parce que la variation est brusque l'induction à l'entrefer, et plus le maillage est resserré aux endroits d'intérêt, plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la solution exacte de l'équation aux dérivés partielles



**Fig.III 9** : maillage d'une demi-coupe de la machine

### III.3 Processeur (Résolution)

Nous prenons le Sénéario :

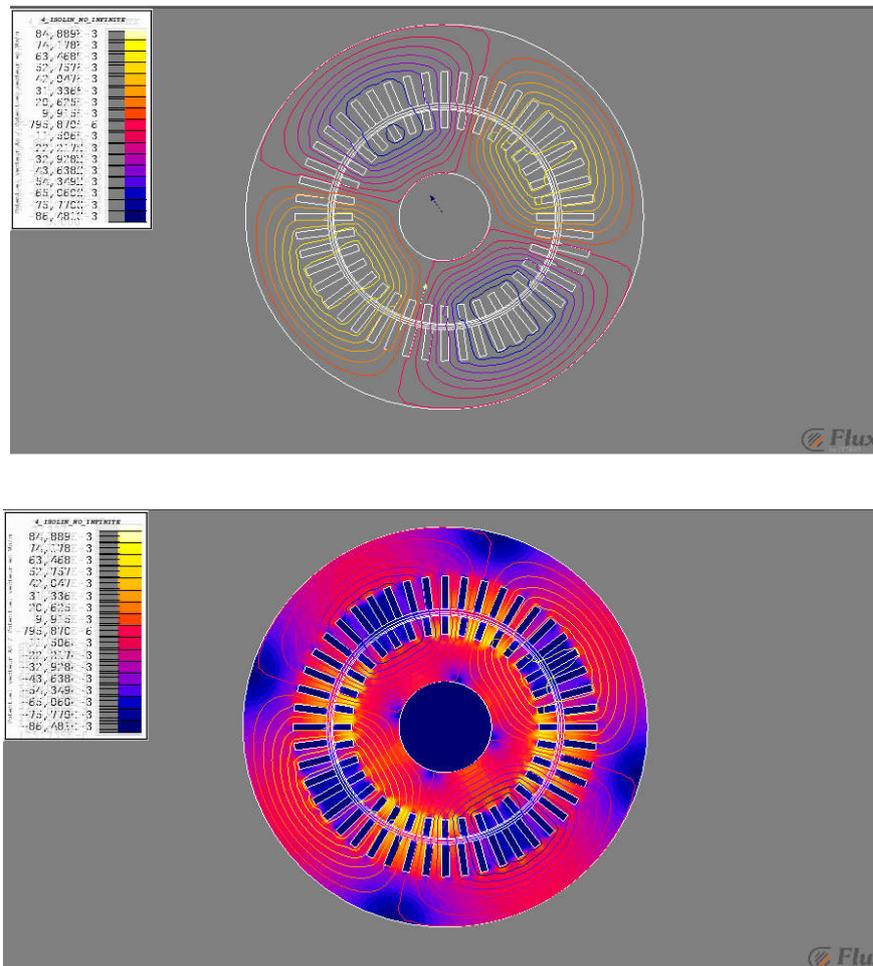
Borne supérieure 0.1s et la valeur du pas 0.0300s.

Nous traçons les courbes convenables au paramètre choisi tout en suivant des étapes biens précisées.

### III.4 Post-processeur

Le post-processeur permet de visualiser les grandeurs :

**Les lignes des champs magnétiques :**



**Fig.III 10 :** les lignes du champ de la machine

❖ Les résultats de machine saine

La machine est une génératrice fonctionne à vitesse constante. Nous avons obtenus à partir de la modélisation de la machine par le logiciel FLUX 2D les courbes suivant :

• Vitesse

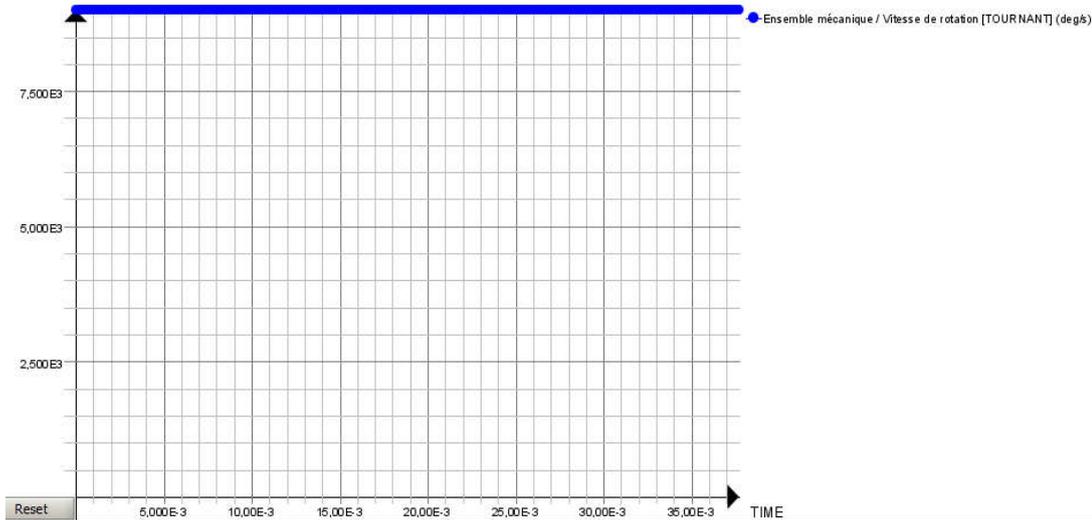


Fig.III 11 : la courbe de la vitesse

Nous imposons une vitesse de 1500 [tr/min].

• Courant :

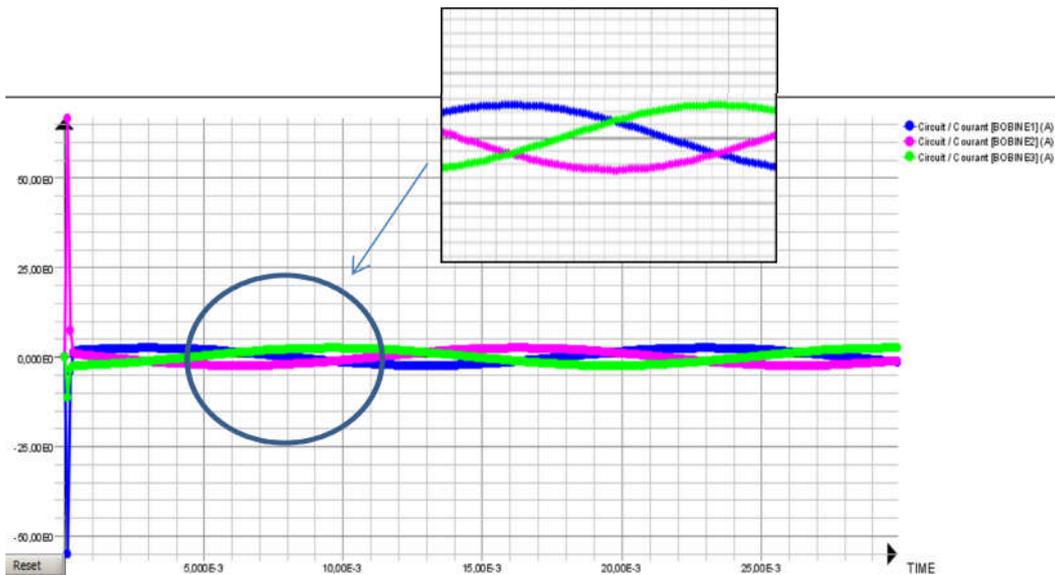


Fig.III 12 : les courants dans les conducteurs bobinés

Le graphe représente la variation du courant en fonction du temps, nous remarquons que le courant prend au démarrage une valeur maximale et après centienne second il devient un signal sinusoïdal triphasé.

- Tension :

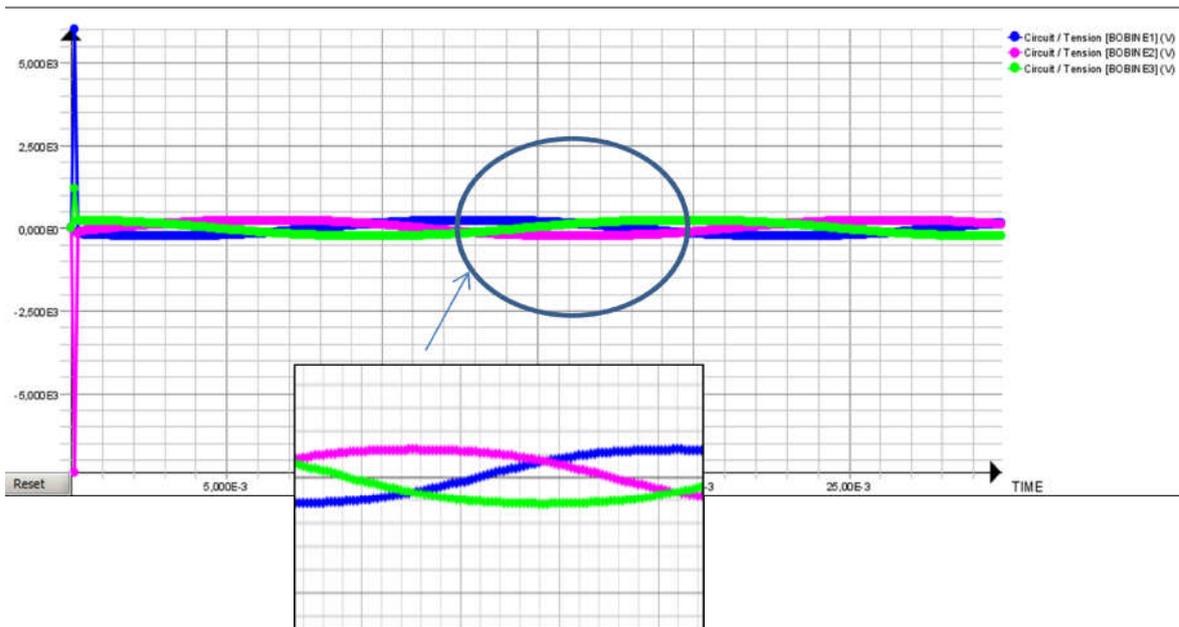


Fig.III 13 : les tensions dans les phases

Les courbes de la tension dans le graphe est un signal sinusoïdal triphasé.

- Couple électromagnétique :

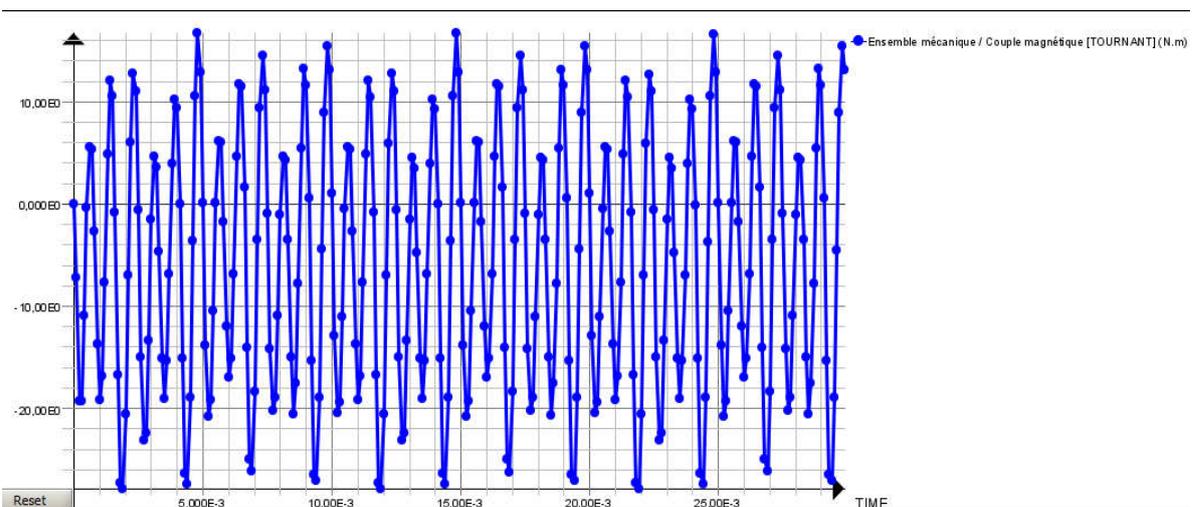


Fig.III 14 : le couple électromagnétique

Ce graphe donne la variation du couple électromagnétique dans la partie tournante de la machine, c'est un signal périodique avec beaucoup d'oscillations et amplitude maximale plus de 16.66 [N.m].

- **Champ magnétique (composante normale) :**

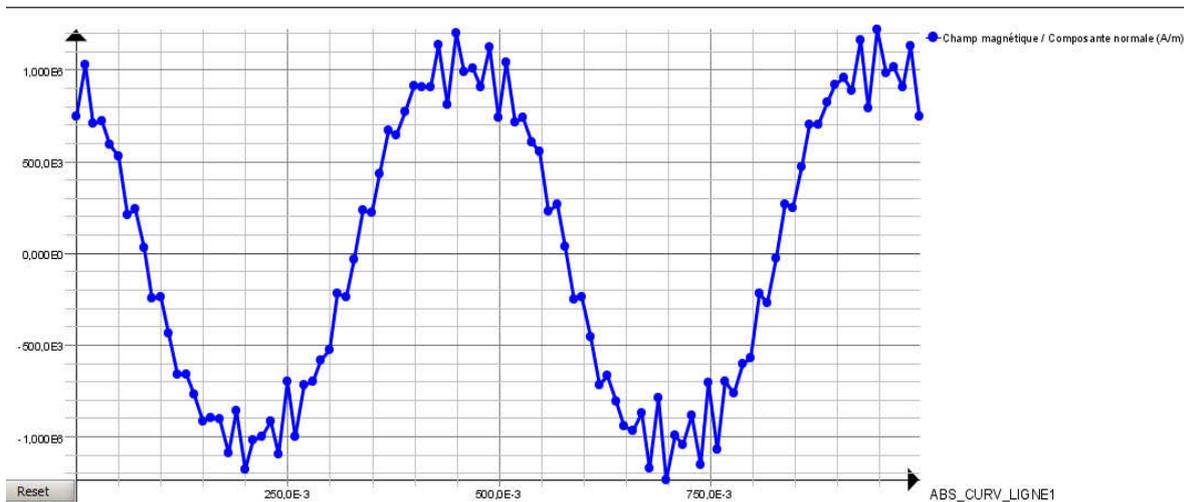


Fig.III 15 : les composantes normales du champ magnétique

Cette figure définit les composantes normales du champ magnétique de la machine, c'est un signal sinusoïdal avec une valeur maximale de 1.6e6 [A/m].

- **Induction magnétique (module)**

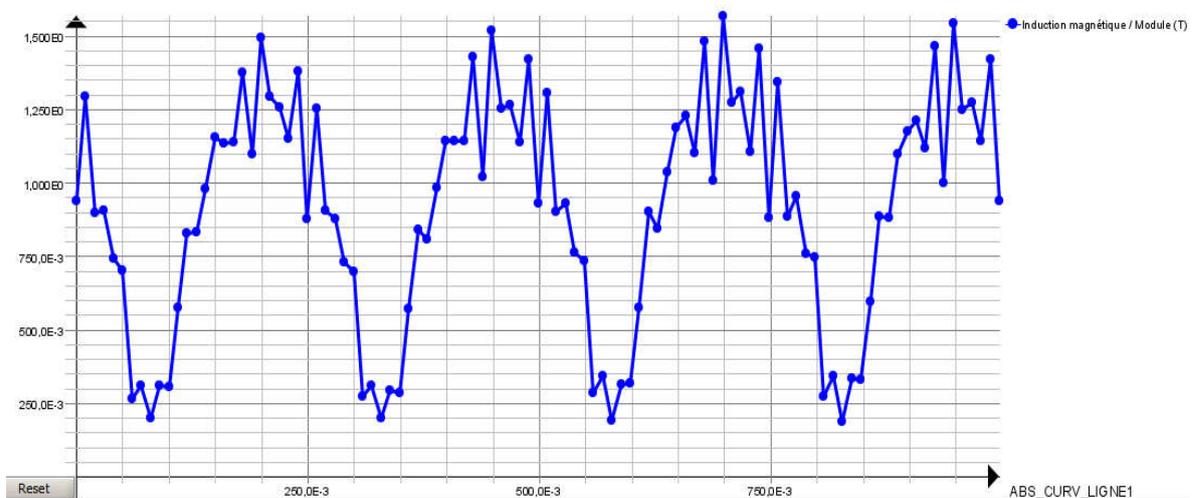


Fig.III 16 : l'induction magnétique

Ce graphe représente la variation de l'induction magnétique en fonction du temps .le module est varie de  $193.71e-3[T]$  à  $1.56[T]$ .

- Flux magnétique (bobine) :

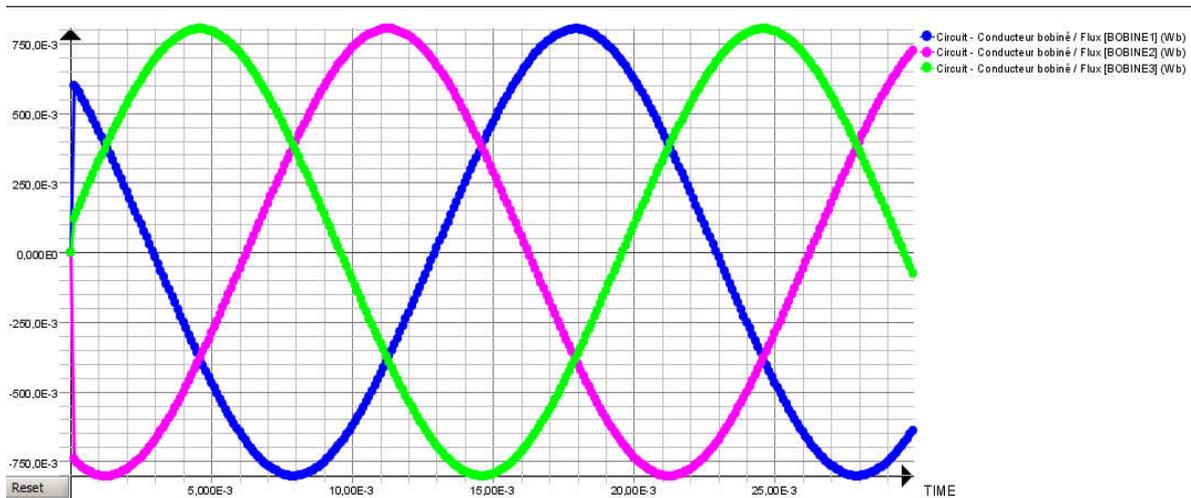


Fig.III 17 : le flux magnétique

Cette courbe définit les allures des flux magnétiques dans les conducteurs bobinés, c'est un signal triphasé sinusoïdal et valeur maximale de  $803.15e-3 [Wb]$ .

- Flux magnetique dans l'enterfer

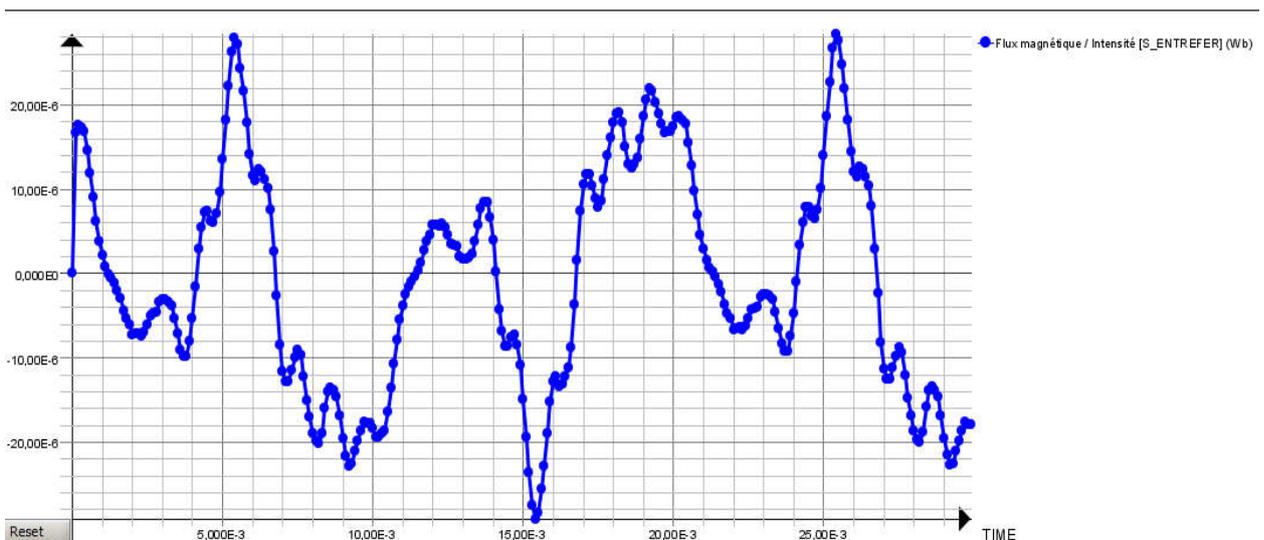


Fig.III 18 : le flux magnétique dans l'enterfer

Cette figure visualise la variation du flux magnétique dans l'enterfer en fonction du temps avec une amplitude de  $28.34e-6 [wb]$  et des ossillations périodiques.

❖ Les résultats de machine avec défauts

$R1=100000 \Omega$  (résistance du défaut dans la phase A)

$R2=R3=100 \Omega$

• Vitesse :

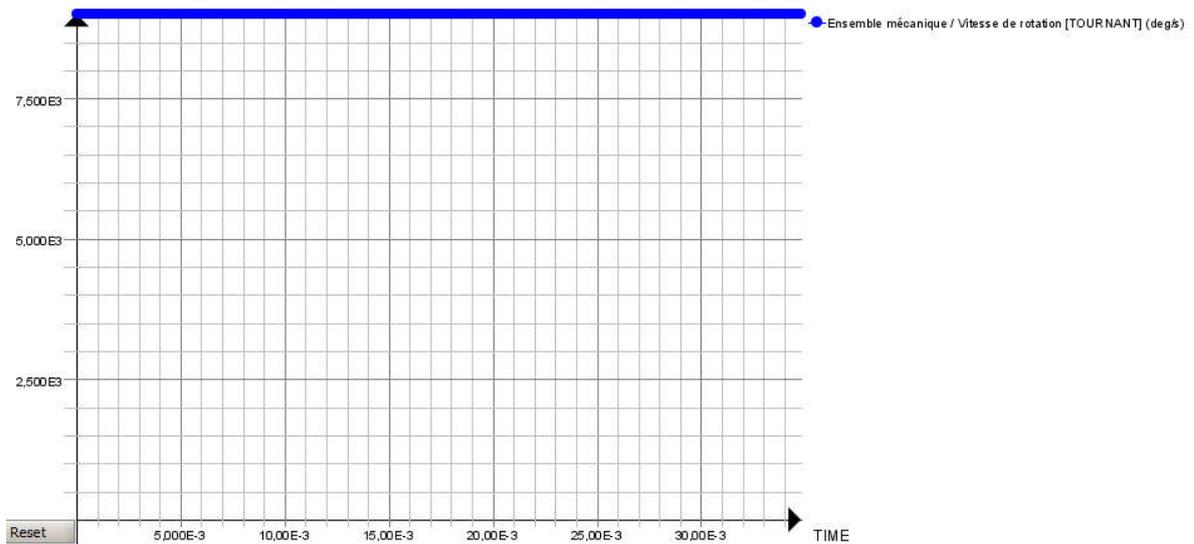


Fig.III 19 : la variation de la vitesse en présence du défaut

Nous imposons une vitesse de 1500[tr/s].

• Courant :

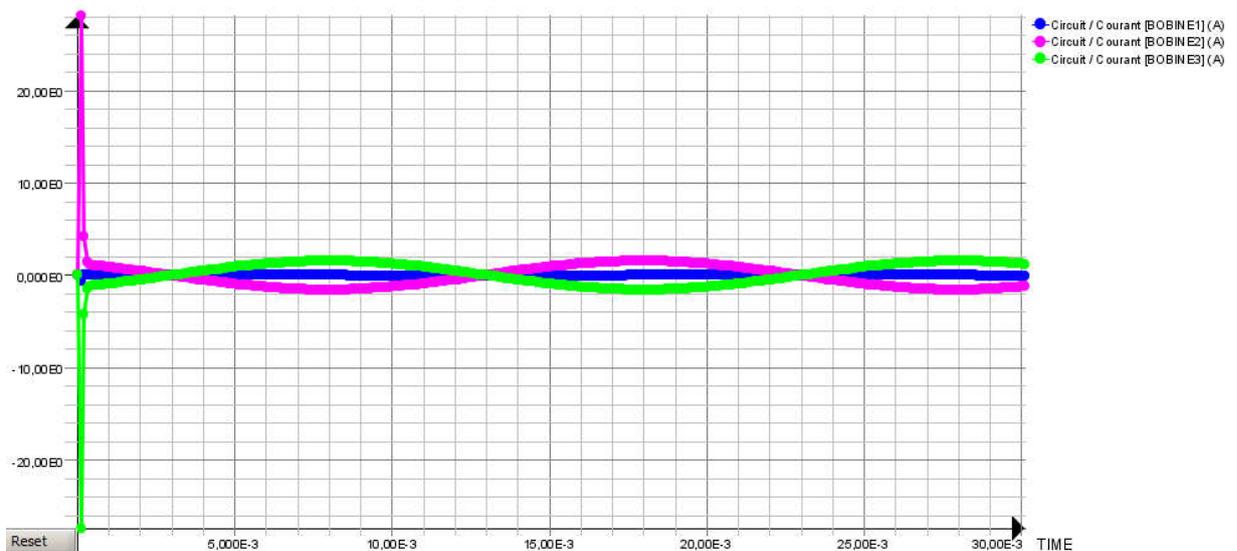


Fig.III 20 : les courants dans les conducteurs en présence du défaut

Ce graphe représente la variation du courant en fonction du temps, nous remarquons le courant, au démarrage, et après centienne secondes devient un signal sinusoïdal triphasé mais dans la première phase il est annulé.

- Tension :

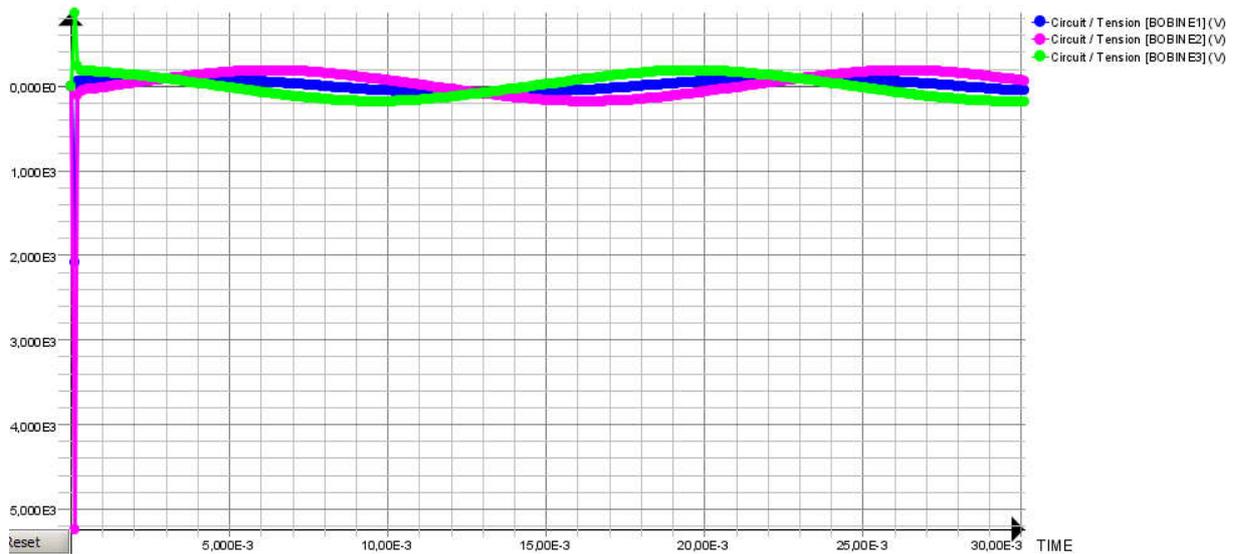


Fig.III 21 : les tensions du conducteur en présence du défaut

La tension dans la figure ci-dessous est un signal triphasé sinusoïdal.

- Couple électromagnétique :

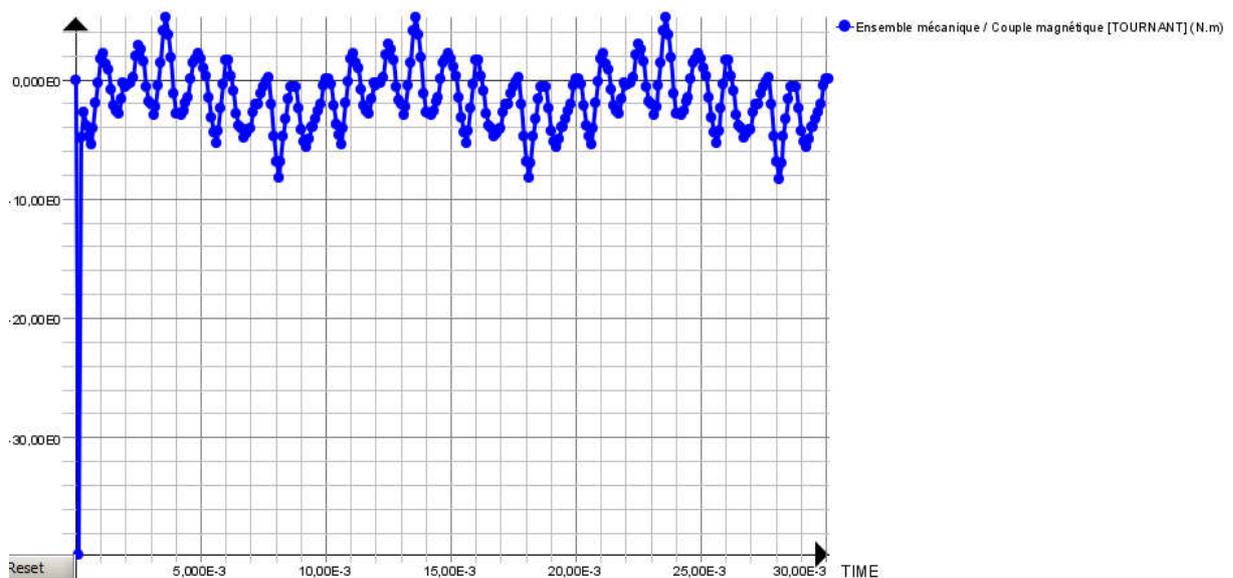
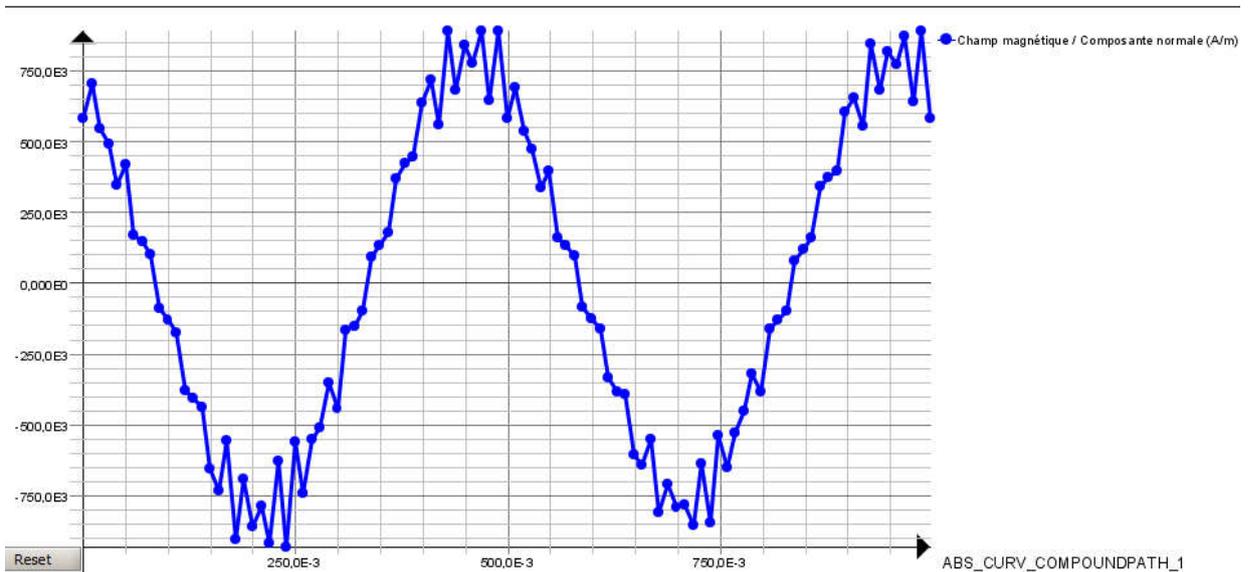


Fig.III 22 : le couple électromagnétique en présence du défaut

Le signal dans la figure au dessous définit le couple électromagnétique dans la partie tournante c'est un signal périodique avec une valeur maximale 5[N.m].

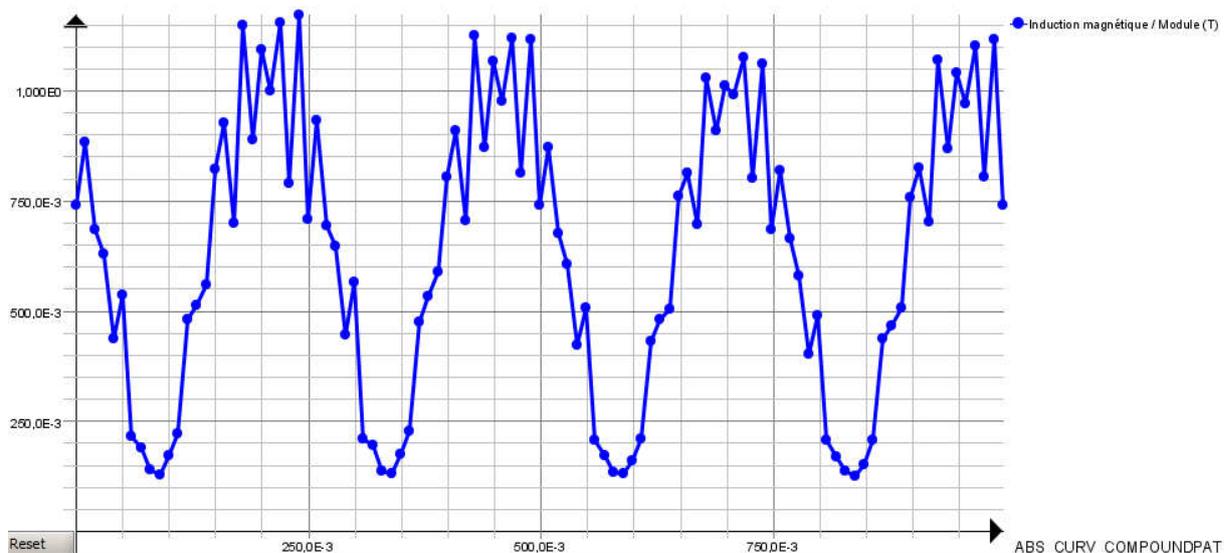
- **Champ magnétique (composante normale) :**



**Fig.III 23 :** le champ magnétique dans la partie tournante en présence du défaut

Cette figure définit le champ magnétique dans les composantes normales de la machine, c'est un signal triangulaire avec une valeur maximale de 889e3 [A/m].

- **Induction magnétique (module) :**



**Fig.III 24 :** l'induction magnétique en présence du défaut

Ce graphe représente la variation de l'induction magnétique en fonction du temps, entre  $126.16e-3[T]$  à  $1.171[T]$ .

- Flux magnétique :

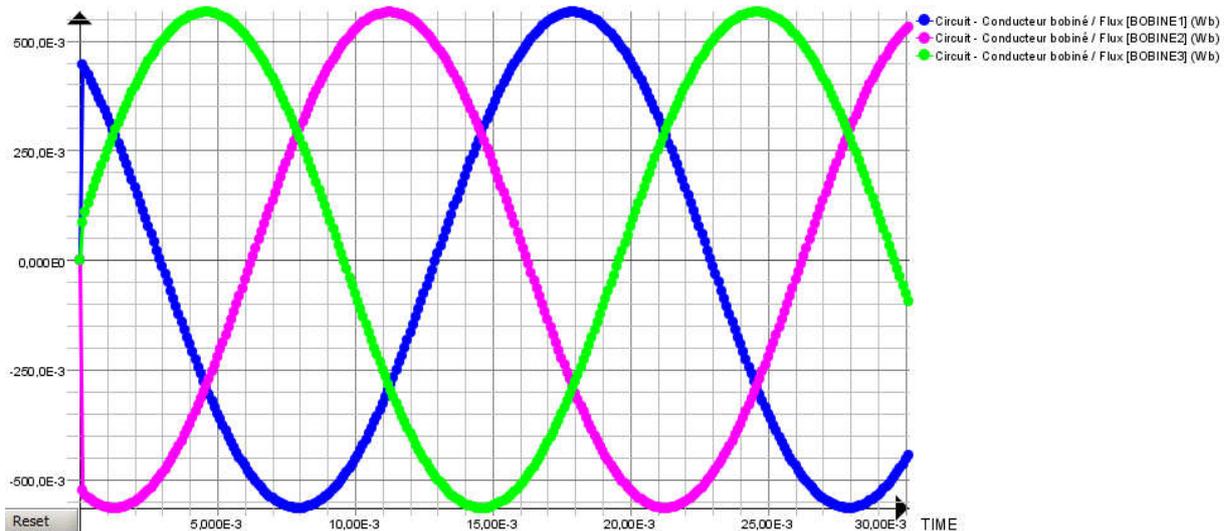


Fig.III 25 : les flux magnétique en présence du défaut

Cette courbe définit les allures des flux magnétiques dans les conducteurs bobinés, c'est un signal triphasé sinusoïdal avec une valeur maximale de  $567-3 [Wb]$ .

- Flux magnétique dans entrefer :



Fig.III 26 : le flux magnétique en présence du défaut

Nous remarquons dans cette courbe que le flux magnétique dans l'entrefer prend la valeur  $30.74e-6$  [wb] comme une valeur maximale, et il reste un signal périodique.

❖ Comparaison des résultats de la machine saine et avec défaut

• Courant :

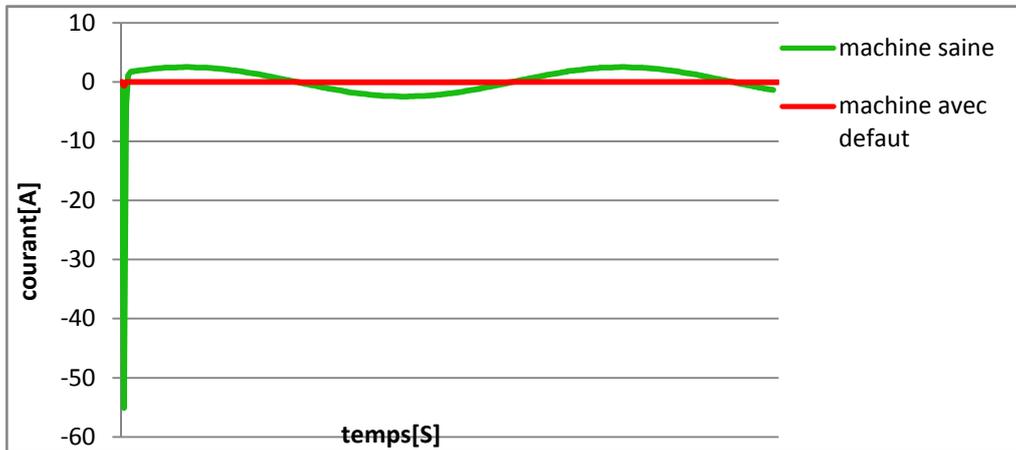


Fig.III 27 : Comparaison des courants [A] de la phase A de la machine (saine, avec défaut)

Ce graphe représente la variation du courant en fonction du temps de la machine saine et en défaut, nous remarquons que le courant dans la machine saine est un signal sinusoïdal, par contre en présence du défaut, il est nulle.

• Flux magnétique :

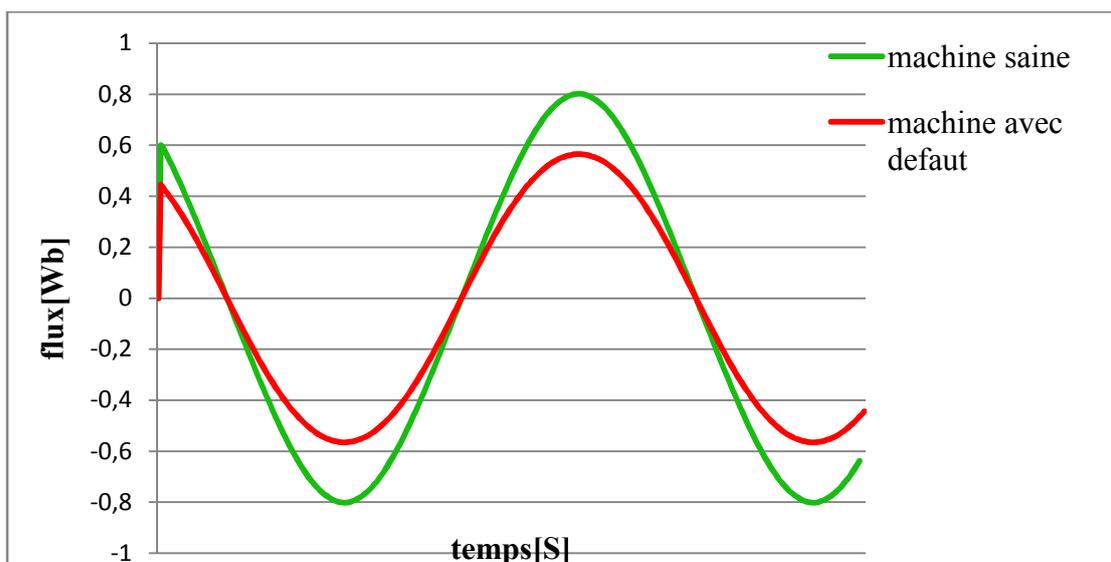
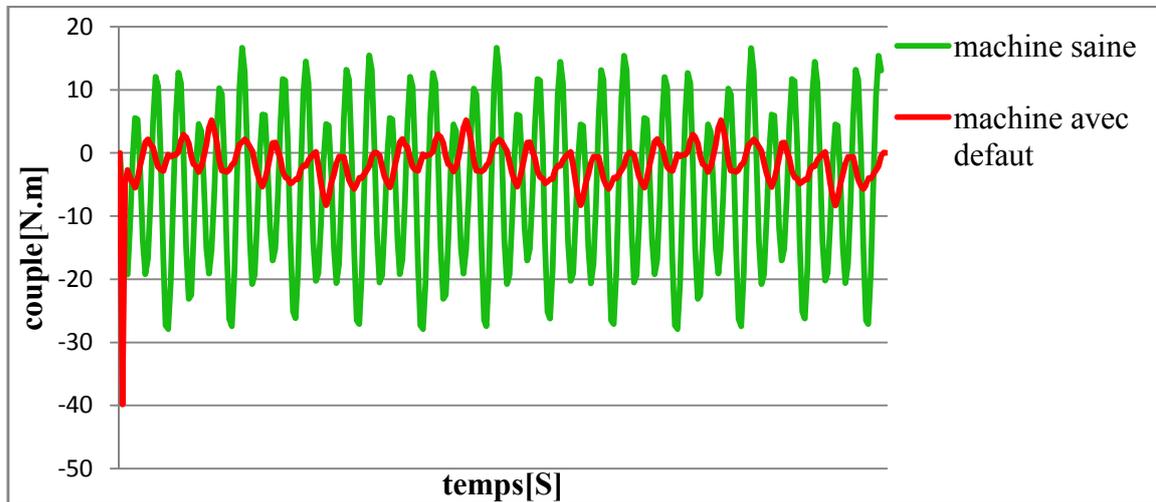


Fig.III 28 : Comparaison des Flux magnétiques [Wb] de la phase A de la machine (saine, avec défaut)

Cette courbe définit les allures des flux magnétiques dans les conducteurs bobinés de la machine saine et avec défaut, nous remarquons que l'amplitude du flux magnétique diminue en présence du défaut.

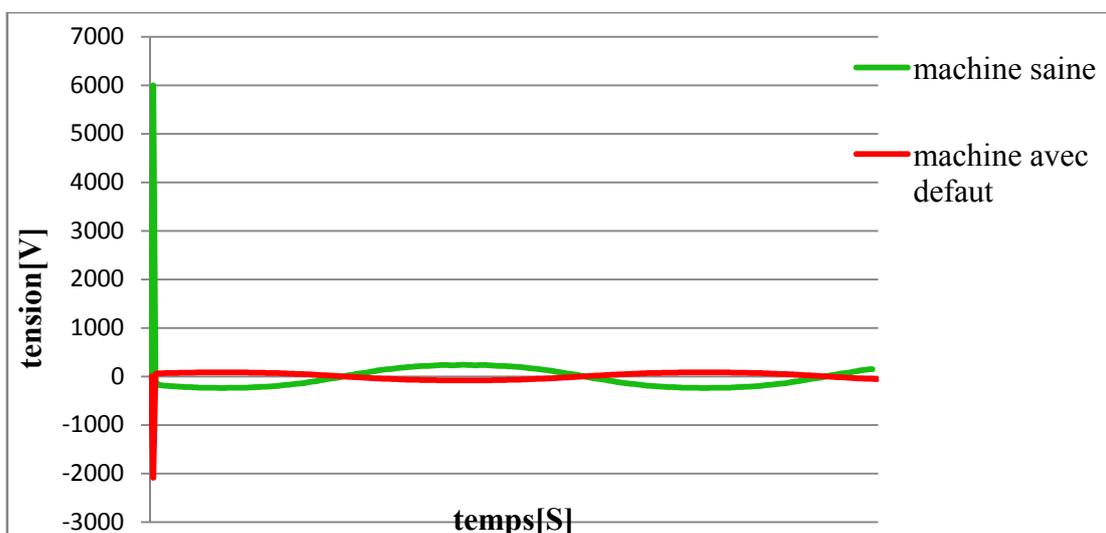
- **Couple électromagnétique :**



**Fig.III 29 :** Comparaison des couples électromagnétiques [N.m] de la machine (saine, avec défaut)

Les signaux dans cette figure définissent le couple électromagnétique de la machine saine et avec défaut, nous remarquons que la valeur de flux diminue en présence du défaut jusqu'à atteindre une valeur de zéro.

- **Tension :**



**Fig.III 30 :** Comparaison des tensions [V] de la machine (saine, avec défaut)

Cette figure visualise la variation de la tension en fonction du temps dans la phase A de la machine saine et avec défaut, nous constatons la démunition de l'amplitude de la tension en présence du défaut.

### **Conclusion**

Nous avons vu la démarche à suivre pour réaliser une analyse numérique d'une machine synchrone en utilisant le logiciel **FLUX 2D**. Tout d'abord, nous avons défini la géométrie, avec les coordonnées de chaque point. Après, nous avons mis les propriétés des matériaux. Finalement, il fallait mettre les conditions aux limites et mailler cette géométrie.

Ce chapitre expose les résultats de simulation du diagnostic du défaut de rupture de barres du machine synchron. la simulation du défaut de cassure de barres s'obtient par l'augmentation de la résistance de la barre concernée par le défaut. Nous concluons à la fin que la rupture de la barre provoque la diminution de la valeur du courant, de la tension et du couple avec le flux bien sur.

# **Conclusion Générale**

### Conclusion générale

Les travaux de notre projet de fin d'étude portent sur la modélisation de la rupture de barre d'une machine synchrone, les défauts peuvent survenir suite au vieillissement des stators mais aussi suite à des chocs mécaniques lors d'opérations de maintenance. Les conditions de fonctionnement, telles des surtensions ou des problèmes de ventilation, peuvent également engendrer ces défauts. Ceux-ci peuvent perturber le fonctionnement de la machine s'ils ne sont pas détectés suffisamment tôt et menés pour le diagnostic de tels défauts, il existe la modélisation numérique par éléments finis au logiciel Flux2D qui est basée sur l'analyse des équations au dérivé partielle.

Ce travail est divisé en trois chapitres. Dans le premier, nous présentons une généralité sur les machines synchrones et les différents types des défauts, leurs classifications et leurs origines d'une manière détaillée.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les principales techniques de détection par la méthode des éléments finis.

Dans le dernier chapitre nous détaillons la modélisation de la machine en fonctionnement sain et en présence du défaut.

Nous concluons que la rupture de la barre provoque la diminution de la valeur du courant, de la tension et du couple avec le flux bien sur.

**Bibliographie :**

- [1] N. Fallati, « Implantation dans Hypersim d'un modèle de défauts internes dans la machine synchrone », École de technologie supérieure, 2005.
- [2] O. Mouad et S. Bendaoud, *Machine synchrone/asynchrone*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2010.
- [3] J. M. Miller, A. R. Gale, P. J. McCleer, F. Leonardi, et J. H. Lang, « Starter-alternator for hybrid electric vehicle: comparison of induction and variable reluctance machines and drives », in *Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE*, 1998, vol. 1, p. 513–523.
- [4] F. Reiter Jr et T. Stuart, « Composite powder metal synchronous reluctance machine », in *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International*, 2003, vol. 1, p. 523–527.
- [5] W. Cai, P. Pillay, Z. Tang, et A. Omekanda, « Experimental study of vibrations in the switched reluctance motor », in *Proc. IEEE IEMD Conf*, 2001, vol. 1, p. 576–581.
- [6] A. Fonseca, « Comparaison de machines à aimants permanents pour la traction de véhicules électriques et hybrides », Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2000.
- [7] Y. Honda, T. Nakamura, T. Higaki, et Y. Takeda, « Motor design considerations and test results of an interior permanent magnet synchronous motor for electric vehicles », in *Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS'97., Conference Record of the 1997 IEEE*, 1997, vol. 1, p. 75–82.
- [8] J.-M. Biedinger, G. Friedrich, J.-P. Vilain, et C. Plasse, « Etude de faisabilité d'un altemo-demarreur integre-Comparaison des solutions asynchrone et synchrone a rotor bobine », *Rev. Electr. Electron.*, p. 98–103, 1999.
- [9] G. Friedrich, L. Chédot, et J. M. Biedinger, « Comparison of two optimal machine design for integrated starter-generator applications », in *Int. Conf. Electrical machines*, 2002.
- [10] P. ARMIROLI, C. PLASSE, et E. VON WESTERHOLT, « L'alterno-démarrreur, du Stop-Start au semi-hybride », *Actes INRETS*, p. 65–80, 2002.
- [11] L. Albert, C. Chillet, A. Jarosz, et F. Wurtz, « Analytic modelling of automotive claw-pole alternator for design and constrained optimization », in *European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse*, 2003.
- [12] B. Zhang, H. Bai, S. D. Pekarek, W. Eversman, R. Krefta, G. Holbrook, et D. Buening, « Comparison of 3-, 5-, and 6-phase machines for automotive charging applications », in *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International*, 2003, vol. 3, p. 1357–1362.

- 
- [13] D. Bareille, L. Mossion, et C. Garnier, *Électrotechnique*. Dunod, 2008.
- [14] Y. Le Menach, « Contribution a la modelisation numerique tridimensionnelle des systemes electrotechniques », 1999.
- [15] B. Vaseghi, « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MACHINES ELECTRIQUES EN PRESENCE DE DEFAUT ENTRE-SPIRES Modélisation–Réduction du courant de défaut », Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2009.
- [16] R. Casimir, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, G.-A. Capolino, G. Rostaing, J.-P. Rognon, E. Foulon, L. Loron, H. Razik, et others, « Comparison of modelling methods and of diagnostic of asynchronous motor in case of defects », in *Power Electronics Congress, 2004. CIEP 2004. 9th IEEE International*, 2004, p. 101–108.
- [17] G. K. Singh et others, « Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques », *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 65, n° 3, p. 197–221, 2003.
- [18] A. Ceban, « Méthode globale de diagnostic des machines électriques », Artois, 2012.
- [19] M. Khov, « Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents: Détection des courts-circuits par suivi paramétrique », 2009.
- [20] M. Karakache, « Contribution à l'analyse de la sureté de fonctionnement du système de protection d'un turboalternateur », 2008.
- [21] M. S. N. Saïd, M. E. H. Benbouzid, et A. Benchaib, « Detection of broken bars in induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation », *Energy Convers. IEEE Trans. On*, vol. 15, n° 1, p. 66–70, 2000.
- [22] G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, et H. Razik, « A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis », *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, n° 2, p. 1127–1142, 2007.
- [23] A. Ceban, R. Pusca, et R. Romary, « Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis », *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 59, n° 5, p. 2082–2093, 2012.
- [24] N. Bianchi, *Electrical machine analysis using finite elements*. CRC press, 2005.
- [25] O. A. Mohammed et N. A. Demerdash, « A 3-D finite element perturbational method for determining saturated values of transformer winding including experimental verification », *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 21, n° 5, p. 1877–1879, 1985.
- [26] M. Dai, A. Keyhani, et T. Sebastian, « Fault analysis of a PM brushless DC motor using finite element method », *Energy Convers. IEEE Trans. On*, vol. 20, n° 1, p. 1–6, 2005.

- 
- [27] O. A. Mohammed, Z. Liu, S. Liu, et N. Y. Abed, « Internal short circuit fault diagnosis for PM machines using FE-based phase variable model and wavelets analysis », *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 43, n° 4, p. 1729–1732, 2007.
- [28] B. Vaseghi, N. Takorabet, et F. Meibody-Tabar, « Fault analysis and parameter identification of permanent-magnet motors by the finite-element method », *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 45, n° 9, p. 3290–3295, 2009.
- [29] B. Vaseghi, N. Takorabet, et F. Meibody-Tabar, « Stator turn fault study and parameter extraction of induction machines using FEM », *COMPEL- Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 29, n° 3, p. 885–899, 2010.
- [30] « Modélisation & Simulation de Défauts D'une Machine Synchrone à Réductance Variable 2009 BOUCHAREB Ilhem - Recherche Google ». BOUCHAREB+Ilhem15-mai-2016].
- [31] M. Elleuch et M. Poloujadoff, « Analytical model of iron losses in power transformers », *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 39, n° 2, p. 973–980, 2003.
- [32] F. Wurtz, « Une nouvelle approche pour la conception sous contraintes de machines électriques », Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 1996.
- [33] B. Sesanga n'tshuika, « Optimisation de gammes: application à la conception des machines synchrones à concentration de flux », Grenoble, 2011.
- [34] L. Albert, « Modélisation et optimisation des alternateurs à griffes. Application au domaine automobile », Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2004.
- [35] S. Brisset, « Démarches et outils pour la conception optimale des machines électriques », Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I, 2007.
- [36] J. L. Müller, « Contribution à la modélisation de tests de diagnostic de courts-circuits entre tôles dans les stators de turboalternateurs », Lille 1, 2012.
- [37] Y. Choua, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault », phdthesis, Université Paris Sud - Paris XI, 2009.
- [38] X. Shi, « Contribution à la simulation du mouvement en 3D avec la méthode des éléments finis, appliquée à la modélisation des machines électriques », Lille 1, 2005.
- [39] S. Perez, « Contribution au dimensionnement optimal d'alternateur à griffes sans aimant- Apport des alliages FeCo », Université de Grenoble, 2013.

- [40] B. Boussad, « Contribution a la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs: application aux machines a aimants permanente (BDCM-PMSM). », Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou, 2012.
- [41] Zghari Nourredine et Loumir Omar, « Analyse des défauts de désaimantation des moteurs synchrones à aimants permanents par la méthode des éléments finis », Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master, UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET., 2015.

## ملخص:

يتمحور هذا العمل حول دراسة مختلف الأعطال في الآلات المتزامنة في حالة مولد. هذا النوع من الآلات الكهربائية هو الأكثر شيوعا و الأكثر استعمالا بالنسبة لأنواع الأخرى من الآلات الكهربائية في كل النظام الطاقوى.

في هذه الأطروحة وبصورة مبدئية نهتم بدراسة الآلات الكهربائية و هذا عن طريق الربط بين العلاقات الكهربائية و المغناطيسية. و نركز بالخصوص على النمذجة والمحاكاة للأعطال الكهربائية في آلات متزامنة وذلك بالنمذجة بالطريقة الرقمية للعناصر المحددة باستعمال برنامج FLUX 2D, هذه الطريقة تسمح بمحاكاة أنواع مختلفة من العيوب مثل شق الشوط الأول ومدى تأثيره على الآلات المتزامنة من خلال مقارنة النتائج المتحصل عليها للوصول إلى نتائج قريبة من الحلول الواقعية.

**الكلمات المفتاحية-** الآلات الكهربائية المتزامنة -الطريقة الرقمية للعناصر المحددة- شق الشوط الأول- برنامج FLUX 2D.

## Résumé

Ce travail est basé sur l'étude des différents types des défauts dans les machines synchrones par un mode de fonctionnement génératrice.

Ces machines sont les versions les plus répandues des machines électriques classiques dans tous les systèmes énergétiques.

Dans cette PFE, nous s'intéressons principalement à l'étude des machines électriques par le couplage des équations électriques et magnétiques. La modélisation et simulation des défauts des machines synchrones par la méthode numérique basée sur la méthode des éléments finis en utilisant logiciel FLUX 2D, permettent de simuler les différents types de défaut tel que la rupture de barre et l'influence de ce défaut sur la machine par la comparaison des résultats obtenus pour aboutir à des résultats approches de la réalité.

**Mots clés** –Machines synchrones, la méthode numérique par les éléments finis, rupture de barre, Flux 2D.

