

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière : Electrotechnique  
Spécialité Machines électriques

présenté par

**SAHOUI Mohamed**

&

**BENACHOUR Ouassim**

---

# Modélisation et diagnostic de la cassure des barres rotoriques d'une machine asynchrone

---

Proposé par : D<sup>r</sup> KOUCHIH

Année Universitaire 2017-2018

### *Remerciement*

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Dr. KOUCHIH Djilali pour son dévouement, ces conseils et son soutien moral tout le long de l'élaboration de ce travail. Ainsi que nous remercions pour toute l'aide et le soutien qu'il nous a offert tout au long de nos études.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A la mémoire de mon père.

A ma mère avec toute mon affection.

A mon frère et mes sœurs.

A ma famille.

A tous mes amis.

A tous mes camarades

WASSIM

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, pour leur encouragement continu, leur aide et leur grand sacrifice.*

*Mon cher frère et mes chères sœurs pour leur soutien et leur encouragement.*

*Mes grands-mères*

*Mes chers oncles et mes chères tantes.*

*Mes cousins et cousines et à toute la famille.*

*Et à tous mes amis et à tous ceux que j'aime.*

*Mohamed*



## ملخص:

في هذه المذكرة، درسنا عطب انكسار قضبان الجزء الدوار في المحرك اللامتزامن ثلاثي الاطوار وطريقة التشخيص الأكثر استعمالاً والتي هي التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت بالقيام بتصميم بطريقة العناصر المنتهية باستعمال برنامج FLUX 2D وتجارب تطبيقية على محرك لا متزامن ثلاثي الاطوار حقيقي.

**كلمات المفاتيح:** محرك لامتزامن، اعطاب، تشخيص، انكسار القضبان.

---

## Résumé :

Dans ce mémoire, nous avons étudié le défaut de cassures des barres rotoriques dans le moteur asynchrone triphasé qui est l'analyse spectrale des courants statoriques en faisant une modélisation par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel FLUX 2D et des essais expérimentaux sur un moteur asynchrone réel.

**Mots clés :** moteur asynchrone, défauts, diagnostic, cassure des barres.

---

## Abstract :

In this note, we studied the breaking rotor bars fault in the three-phase asynchronous motor and the most used diagnostic method which is the spectral analysis of the stator current by doing a modeling by the finite element method using FLUX 2D software and experimental tests on a real asynchronous motor.

**Keywords :** asynchronous motor, faults, diagnostic, breaking of bars.

---

# Listes des acronymes et abréviations

---

**v1** : tension simple de la phase (v)

**r1** : résistance du stator ( $\Omega$ )

**x1**: réactance de fuite du stator ( $\Omega$ )

**Xm** : réactance magnétisante ( $\Omega$ )

**Rf** : résistance représentant les pertes fer ( $\Omega$ )

**E1** : tension induite dans le stator (v)

**E2** : tension induite dans le rotor (v)

**x2** : réactance de fuite du rotor ( $\Omega$ )

**r2** : résistance du rotor rendant compte des pertes joules rotoriques ( $\Omega$ )

**X** : Réactance de fuite

**g** : glissement

**fs** : fréquence statorique

$\vec{E}$  : Champ électrique ( $V \cdot m^{-1}$ )

$\vec{B}$  : Induction magnétique (T)

$\vec{B}_r$ : Induction rémanente des matériaux ferromagnétiques (T)

$\vec{H}$  : Champ magnétique ( $A \cdot m^{-1}$ )

$\vec{j}$ : Densité de courant ( $A \cdot m^{-2}$ )

$\vec{D}$  : Induction électrique ( $C \cdot m^{-2}$ )

$\rho$  : Charge volumique ( $C \cdot m^{-3}$ )

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ : Densité de courant de déplacement ( $A \cdot m^{-2}$ )

$\mu$ : Perméabilité magnétique ( $H \cdot m^{-1}$ )

$\nu = \frac{1}{\mu}$  la relativité magnétique.

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide. ( $H \cdot m^{-1}$ )

# Listes des acronymes et abréviations

---

$\delta$  : Conductivité électrique ( $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ )

$\mathcal{E}$  : Permittivité électrique absolue ( $\text{F. m}^{-1}$ )

$\mathcal{E}_0$  : Permittivité électrique du vide ( $\text{F. m}^{-1}$ )

$\mathcal{E}_r$  : Permittivité électrique relative du milieu ( $\text{F. m}^{-1}$ )

$i$  ( $i^2 = -1$ ) : unité imaginaire

$\omega$  : Pulsation électrique ( $\text{rad.s}^{-1}$ )

# Table des matières

---

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : GENERALITES</b> .....	<b>3</b>
1.1 Introduction .....	4
1.2 Présentation de la machine asynchrone .....	5
1.3 Description de la machine asynchrone .....	6
1.3.1 Stator .....	7
1.3.2 Rotor .....	8
A Rotor bobiné .....	8
B Rotor a cage d'écureuil .....	9
1.3.3 Les enroulements .....	10
1.3.4 Circuit magnétique .....	10
1.3.5 La carcasse .....	11
1.3.6 L'arbre .....	11
1.3.7 Ventilateur.....	12
1.3.8 Les roulement .....	12
1.4 Schémas équivalents .....	13
1.5 Défauts des machines électrique tournantes .....	14
1.5.1 Défauts statoriques .....	18
1.5.2 Défauts rotoriques .....	19
A Défauts de roulements .....	19
B Excentricité .....	20
C Défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit .....	22
1.6 Méthodes de diagnostic des machines électrique .....	23
1.6.1 Les méthodes de connaissances .....	24
1.6.2 Les méthodes de redondances analytiques .....	25
1.6.3 Les méthodes par modélisation de signaux .....	25
A Technique mécanique .....	26
A.1 Diagnostic par mesure de la température .....	26
A.2 Diagnostic par mesure des vibrations .....	26
B Diagnostic chimiques .....	27
C Technique magnétique électrique .....	28
C.1 La transformée de fourrier rapide .....	28
C.2 Diagnostic par mesure de flux magnétique axial de fuite .....	29
C.3 Diagnostic par l'analyse du courant statorique .....	30
1.7 Conclusion .....	31

<b>CHAPITRE 2 : CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR .....</b>	<b>32</b>
2.1 Introduction .....	33
2.2 Définition et étapes de la CAO .....	33
2.3 CAO des machines électriques .....	34
2.4 Implémentation de CAO .....	35
2.4.1 Le Matériel .....	35
2.4.2 Le Logiciel .....	35
2.5 Logiciel FLUX 2D .....	37
A Historique du logiciel .....	37
B Présentation de FLUX 2D .....	37
2.6 Conclusion .....	39
<b>CHAPITRE 3 : MODÉLISATION PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS .....</b>	<b>40</b>
3.1 Introduction .....	41
3.2 Méthode Des éléments Finis .....	42
3.2.1 Historique de méthode d'élément finis .....	42
3.2.2 Présentation de la méthode des éléments finis .....	42
3.2.3 Principe de la méthode des éléments finis .....	43
3.2.4 Les équations de Maxwell .....	45
A Equation de Maxwell-Faraday .....	46
B Equation de Maxwell-Ampère .....	46
C Equation de Maxwell-Gauss .....	46
D Equation de conservation de flux magnétique .....	46
3.2.4 Les lois de comportement de milieux .....	48
A Le cas du vide .....	48
B Les milieux conducteurs : la loi d'ohm .....	48
C Comportement diélectrique des matériaux .....	49
D Comportement magnétique des matériaux .....	49
3.2.5 Les modèles .....	50
A Model magnétostatique .....	50
B Model magnétodynamique .....	51
C Model magnétique transitoire .....	52
3.3 Simulation de la machine asynchrone en flux 2D .....	51
3.3.1 Les paramètres de machine .....	51
3.3.2 la géométrie de la machine asynchrone .....	53
3.3.3 Domaine de calcul du champ électromagnétique .....	54
3.3.4 Le Maillage.....	55
3.3.5 Matériaux conducteurs .....	56
3.3.6 Matériaux magnétiques .....	56

# Table des matières

---

3.3.7	Couplage de circuit .....	57
3.4	Résultats de simulation de mas .....	58
3.4.1	Fonctionnement à vide a l'état sain .....	58
3.4.2	Fonctionnement en charge a l'état sain .....	62
3.4.3	Fonctionnement en charge avec une barre cassée .....	67
3.4.4	Fonctionnement avec deux barres cassées .....	72
3.4.5	Fonctionnement avec trois barres cassées .....	77
3.4.6	Simulation de cassure de trois barres l'un après l'autre .....	82
3.5	Conclusion .....	84
<b>CHAPITRE 4 : ETUDE EXPERIMENTALE.....</b>		<b>85</b>
4.1	Introduction .....	86
4.2	La réalisation pratique .....	86
4.3	Les résultats pratique .....	87
4.3.1	Moteur en état sain .....	87
A	Essai à vide .....	87
B	Essai en charge.....	89
4.3.2	Moteur avec défaut (1 barre cassée) .....	90
A	Essai à vide .....	90
B	Essai en charge.....	91
4.3.3	Moteur avec défaut (2 barre cassée) .....	92
A	Essai à vide .....	92
B	Essai en charge.....	94
4.3.4	Moteur avec défaut (3 barre cassée) .....	95
A	Essai à vide .....	95
B	Essai en charge.....	96
4.5	Conclusion .....	97
<b>Conclusion générale .....</b>		<b>98</b>
<b>Bibliographie .....</b>		<b>99</b>

# Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Eléments de construction d'une machine asynchrone .....	6
<b>Figure 1.2.</b> Stator d'une machine asynchrone .....	7
<b>Figure 1.3.</b> Rotor bobiné .....	8
<b>Figure 1.4.</b> Rotor a cage d'écureuil .....	9
<b>Figure 1.5.</b> Circuit magnétique .....	10
<b>Figure 1.6.</b> Le roulement .....	12
<b>Figure 1.7.</b> Schéma équivalent de moteur asynchrone .....	13
<b>Figure 1.8.</b> Schéma équivalent <i>ramené au stator</i> de moteur asynchrone .....	13
<b>Figure 1.9.</b> Évolution du pourcentage des défauts pendant une décennie .....	16
<b>Figure 1.10.</b> Défauts statoriques .....	18
<b>Figure 1.11.</b> Excentricité statique .....	21
<b>Figure 1.12.</b> Excentricité dynamique .....	21
<b>Figure 1.13.</b> Excentricité mixte .....	21
<b>Figure 1.14.</b> rupture de barre ; rupture d'anneau de court-circuit .....	22
<b>Figure 1.15.</b> Diaporama des méthodes de diagnostic de machines électriques .....	24
<b>Figure 1.16.</b> Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial .....	29
<b>Figure 1.17.</b> schéma synoptique du principe de la méthode du specter du courant statorique .....	30
<b>Figure 2.1.</b> La structure globale des logiciels de CAO .....	36
<b>Figure 2.2.</b> Présentation de FLUX 2D .....	38
<b>Figure 3.1.</b> Fonction d'interpolation d'un élément .....	44
<b>Figure 3.2.</b> Caractéristique de la machine asynchrone .....	52
<b>Figure 3.3.</b> Caractéristiques statoriques de la machine asynchrone .....	52
<b>Figure 3.4.</b> Caractéristiques rotoriques de la machine asynchrone .....	52
<b>Figure 3.5.</b> La géométrie de la machine asynchrone .....	53
<b>Figure 3.6.</b> Dimension des encoches, a) l'encoche statorique, b) l'encoche rotorique .....	53
<b>Figure 3.7.</b> Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique .....	54
<b>Figure 3.8.</b> Maillage .....	55
<b>Figure 3.9.</b> Caractéristiques B(H) du matériau magnétique .....	56
<b>Figure 3.10.</b> Circuit électrique de moteur lié à la géométrie .....	57
<b>Figure 3.11.</b> Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique à vide .....	58
<b>Figure 3.12.</b> Densité du courant dans les barres rotoriques a vide .....	58
<b>Figure 3.13.</b> Courants statoriques à vide .....	59
<b>Figure 3.14.</b> Couple électromagnétique à vide .....	60
<b>Figure 3.15.</b> Vitesse de rotation à vide .....	60
<b>Figure 3.16.</b> Courant rotorique dans une barre à vide .....	61
<b>Figure 3.17.</b> Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique en charge .....	62
<b>Figure 3.18.</b> Densité du courant dans les barres rotoriques en charge .....	62
<b>Figure 3.19.</b> Courants statoriques en charge. ....	63
<b>Figure 3.20.</b> Les harmonique des courants statoriques en charge .....	64
<b>Figure 3.21.</b> Couple électromagnétiques charge .....	64

## Liste des figures

<b>Figure 3.22.</b> Vitesse de rotation en charge .....	65
<b>Figure 3.23.</b> Courant rotorique d'une barre en charge .....	66
<b>Figure 3.24.</b> Les valeurs des Courants des barres rotoriques a l'etat sain en charge .....	66
<b>Figure 3.25.</b> Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique avec (1BC) .....	67
<b>Figure 3.26.</b> Densité du courant dans les barres rotoriques avec (1BC) .....	67
<b>Figure 3.27.</b> Les courants statoriques en charge avec une barre cassée (1BC) .....	68
<b>Figure 3.28.</b> spectre d'harmonique en charge avec une barre cassée (1BC) .....	69
<b>Figure 3.29.</b> Couple électromagnétiques charge (1BC) .....	70
<b>Figure 3.30.</b> Vitesse de rotation en charge (1BC) .....	70
<b>Figure 3.31.</b> Courants rotoriques en charge avec (1BC) .....	71
<b>Figure 3.32.</b> Les valeurs des Courants des barres rotoriques avec (1BC) en charge .....	71
<b>Figure 3.33.</b> Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique avec (2BC) .....	72
<b>Figure 3.34.</b> Densité du courant dans les barres rotoriques avec (2BC) .....	72
<b>Figure 3.35.</b> Les courants statoriques en charge avec (2BC) .....	73
<b>Figure 3.36.</b> Spectre d'harmonique en charge avec (2BC) .....	74
<b>Figure 3.37.</b> Couple électromagnétiques charge (2BC) .....	75
<b>Figure 3.38.</b> Vitesse de rotation en charge (2BC) .....	75
<b>Figure 3.39.</b> Courants rotoriques en charge avec (2BC) .....	76
<b>Figure 3.40.</b> Les valeurs des Courants des barres rotoriques avec (2BC) en charge .....	76
<b>Figure 3.41.</b> Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique avec (3BC) .....	77
<b>Figure 3.42.</b> Densité du courant dans les barres rotoriques avec (3BC) .....	77
<b>Figure 3.43.</b> courants statoriques en charge avec (3BC) .....	78
<b>Figure 3.44.</b> spectre d'harmonique en charge avec (3BC) .....	79
<b>Figure 3.45.</b> Couple électromagnétiques en charge (3BC) .....	80
<b>Figure 3.46.</b> Vitesse de rotation en charge (3BC) .....	80
<b>Figure 3.47.</b> Courants rotoriques en charge avec (3BC) .....	81
<b>Figure 3.48.</b> Les valeurs des Courants des barres rotoriques avec (3BC) en charge .....	81
<b>Figure 3.49.</b> Comportement de couple .....	82
<b>Figure 3.50.</b> Comportement de vitesse .....	82
<b>Figure 3.51.</b> Comportement des barres rotorique .....	83
<b>Figure 4.1.</b> Banc d'essai utilisé pour le diagnostic du défaut de cassure de barres .....	87
<b>Figure 4.2.</b> Les courants statoriques au régime permanent à vide .....	88
<b>Figure 4.3.</b> Le spectre d'harmonique donné par l'analyseur pour l'etat sain à vide .....	88
<b>Figure 4.4.</b> Les courants statoriques au regime permanent en charge .....	89
<b>Figure 4.5.</b> Le spectre d'harmonique donné par l'analyseur pour l'etat sain en charge .....	89
<b>Figure 4.6.</b> Rotor à cage avec une barre cassée .....	90
<b>Figure 4.7.</b> Les courants statorique à vide au regime permanent avec une barre cassée.....	90
<b>Figure 4.8.</b> Le spectre d'harmonique à vide avec une barre cassée .....	91
<b>Figure 4.9.</b> Les courants statorique en charge au regime permanent avec une barre cassée .....	91
<b>Figure 4.10.</b> Le spectre d'harmonique en charge avec une barre cassée .....	92
<b>Figure 4.11.</b> Rotor à cage avec deux barres cassées .....	92



## Liste des figures

---

<b>Figure 4.12.</b> Les courants statorique à vide au regime permanent avec deux barres cassées .....	<b>93</b>
<b>Figure 4.13.</b> Le spectre d'harmonique à vide avec deux barres cassées .....	<b>93</b>
<b>Figure 4.14.</b> Les courants statorique en charge au regime permanent avec deux barres cassées .....	<b>94</b>
<b>Figure 4.15.</b> Le spectre d'harmonique en charge avec deux barres cassées .....	<b>94</b>
<b>Figure 4.16.</b> Rotor à cage avec trois barres cassées .....	<b>95</b>
<b>Figure 4.17.</b> Les courants statorique à vide au regime permanent avec trois barres cassées .....	<b>95</b>
<b>Figure 4.18.</b> Le spectre d'harmonique à vide avec trois barres cassées .....	<b>96</b>
<b>Figure 4.19.</b> Les courants statorique en charge au regime permanent avec trois barres cassées .....	<b>96</b>
<b>Figure 4.20.</b> Le spectre d'harmonique en charge avec trois barres cassées .....	<b>97</b>

# Liste des tableaux

---

**Tableau 1.1.** Défauts des machines électriques selon leurs origines ..... **15**

**Tableau 3.1.** B(H) du matériau magnétique STEEL\_NLIN ..... **56**

## *Introduction générale*

De nos jours l'utilisation de la machine asynchrone augmente de façon très rapide cette croissance de l'utilisation de ce type de machine électrique est essentiellement due à sa robustesse mécanique son faible coût d'achat et de fabrication et sa simplicité de construction, ou encore sa quasi-absence d'entretien, et pour ces cas là on trouve cette machine dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme le nucléaire, le pétrole, l'aéronautique, la chimie ou encore les transports ferroviaires.

Le diagnostic des machines électriques s'est largement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient pour certaines applications indispensables. Les chaînes de production doivent être dotées d'un système ou des programmes de maintenances préventives et correctives pour assurer leur continuité de fonctionnement car une quelconque défaillance peut provoquer une coupure de production, aussi elle peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable.

Malheureusement, ces machines sont soumises à des plusieurs contraintes de natures différentes (électriques, mécaniques, thermiques, magnétiques et environnementales). Le cumul de ces contraintes cause des défauts dans les différentes parties du moteur.

Les exigences industrielles en terme de maintenance orientent la recherche vers un diagnostic utilisant des grandeurs électromagnétiques telles que flux, courant, tension, et plus particulièrement le courant statorique qui n'exige qu'un capteur de courant qui donne une image sur le courant de phase statorique, d'autre part cette technique permet d'améliorer la fiabilité du moteur et d'augmenter sa durée de vie.

Dans notre mémoire on a concentré notre recherche sur les défaillances rotoriques et en particulier sur le défaut de cassure des barres et les méthodes de diagnostic qui peuvent nous aider à détecter les défauts.

Le présent mémoire est rédigé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est réservé à la présentation des machines asynchrones. Nous présentons dans sa première partie, l'historique de la machine, les éléments de construction et les différents défauts qui peuvent se produire sur chacun de ses éléments. En suite, on a présenté une étude statistique sur les défauts et ses localisations puis on a défini quelques méthodes de diagnostic des défauts.

Finalement nous terminons le premier chapitre par une analyse des différentes techniques de diagnostic utilisées.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la conception assistée par ordinateur qui est la méthode la plus efficace pour concevoir les machines électriques et visualiser toutes les caractéristiques principales et secondaires. Dans cette partie on a défini la CAO et présenter leur historique ensuite on a présenté les domaines d'utilisation de la CAO.

Dans le troisième chapitre, nous présentons la modélisation en élément finis, ces étapes et son principe général puis on passe à la simulation de la machine asynchrone par le logiciel FLUX 2D puis on présente les résultats de la simulation pour des différentes conditions de fonctionnement ( l'état sain et à l'état de défaut de cassure des barres ).

Le quatrième chapitre est réservé aux essais pratiques ou on a travaillé sur un moteur asynchrone réel à l'état sain puis on a créé un défaut rotorique et on a relevé tout les résultats des essais.

Finalement, on clôture ce mémoire par une conclusion générale faisant ressortir l'intérêt de ce travail ainsi que les perspectives et les recommandations relatives au développement futur du travail effectué.

**CHAPITRE 1 :  
GENERALITES**

## 1.1 Introduction

La machine asynchrone, connue également sous le terme anglo-saxon de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor.

Comme les autres machines électriques (machine à courant continu, machine synchrone), la machine asynchrone est un convertisseur électromécanique basé sur l'électromagnétisme permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant électrique et un dispositif mécanique.

Cette machine est réversible et susceptible de se comporter, selon la source d'énergie, soit en « moteur » soit en « générateur », dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse :

- En fonctionnement « moteur », dans deux quadrants du plan couple-vitesse, l'énergie électrique apportée par la source est transformée en énergie mécanique vers la charge
- En fonctionnement « générateur », dans les deux autres quadrants l'énergie mécanique de la charge est transformée en énergie électrique vers la source (la machine se comporte comme un frein)

Dans ce chapitre on base sur l'historique du moteur asynchrone, son principe de fonctionnement et les défauts qui peuvent lui arriver.

## 1.2 Présentation de la machine asynchrone

Depuis son invention à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, la machine asynchrone s'est imposée dans l'industrie grâce à sa robustesse, sa fiabilité et son coût modéré. Par le passé, on lui reprochait son facteur de puissance relativement faible par rapport à la machine synchrone et la difficulté de faire varier sa vitesse.

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs :

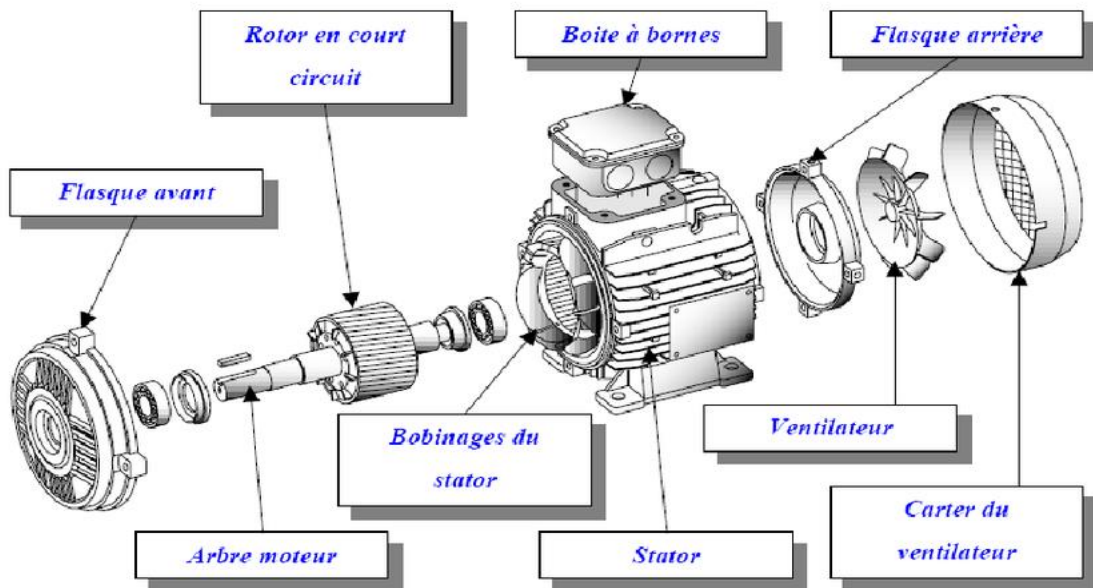
- en **1887**, **Nikola Tesla** dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets ;
- pendant la même période **Galileo Ferraris** publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en **1885**, puis une théorie sur la machine asynchrone en avril 1888 ;
- en **1889**, **Mikhaïl Dolivo-Dobrovolski**, électricien allemand d'origine russe, invente la première machine asynchrone à courant triphasé à cage d'écurie qui sera construite industriellement à partir de **1891**.

En fait, ces limitations sont plutôt liées aux sources d'alimentation à tension et fréquence fixes et aux moyens de commande utilisés à l'époque et non pas à la machine asynchrone elle-même. En effet, avec le développement, réalisé ces dernières années, aussi bien dans le domaine théorique (méthodes et moyens de calcul) que dans le domaine pratique (développement de l'électronique de commande, de l'électronique de puissance et de micro-informatique), ces limitations ont disparu et la machine asynchrone a vu son rôle se confirmer et son champ d'application s'élargir pour englober de nouveaux domaines tels que la robotique, la traction électrique,... etc.

Malgré son existence et ce progrès technologique considérable, la machine asynchrone est loin de livrer tous ses secrets, au contraire, une connaissance plus fine de la machine est devenue plus que jamais nécessaire. En effet, les conditions d'utilisations de la machine ont totalement changé, elle est devenue une partie intégrante d'un système complexe comprenant l'alimentation, la commande et la charge. La tendance actuelle est d'intégrer cet ensemble et d'optimiser pour en faire un actionneur intelligent.

Pour concrétiser cet objet, il faudra développer des modèles fiables et faciles à mettre en œuvre pour les composants de ce système et notamment pour la machine car elle représente l'interface entre la partie électrique et la partie mécanique [1].

## 1.3 Description de la machine asynchrone



**Figure 1.1.** Eléments de construction d'une machine asynchrone.

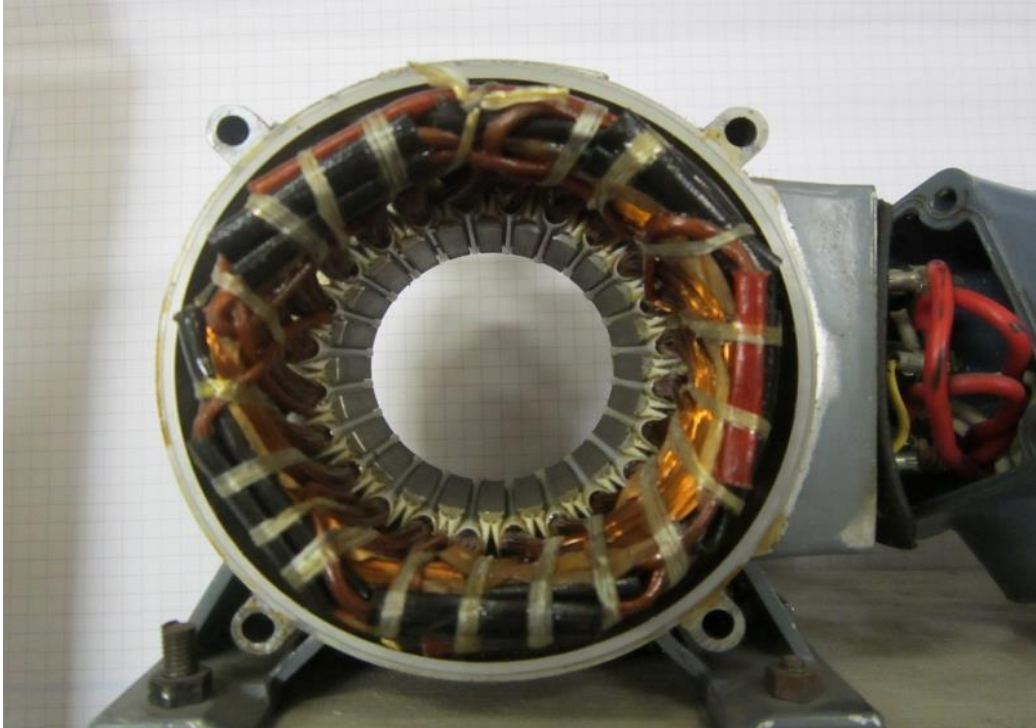
Une machine asynchrone, ou machine à induction se présente sous la forme d'un carter entourant le circuit ferromagnétique statorique. Elle comporte un stator semblable à celui d'un moteur synchrone triphasé, par contre, le rotor en cage d'écureuil se compose seulement de barres reliées des deux cotés par des couronnes qui les mettent en court-circuit.

Il n'y a aucune liaison directe galvanique entre le stator et le rotor, seul l'enroulement du stator est relié au réseau triphasé. La puissance électrique qui lui est demandée est transmise au rotor par le flux magnétique traversant l'entrefer: [2].



La machine asynchrone représenté à la *Figure 1.1* comporte: [2]:

## 1.3.1 Stator



*Figure 1.2.* Stator d'une machine asynchrone

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.[3]:

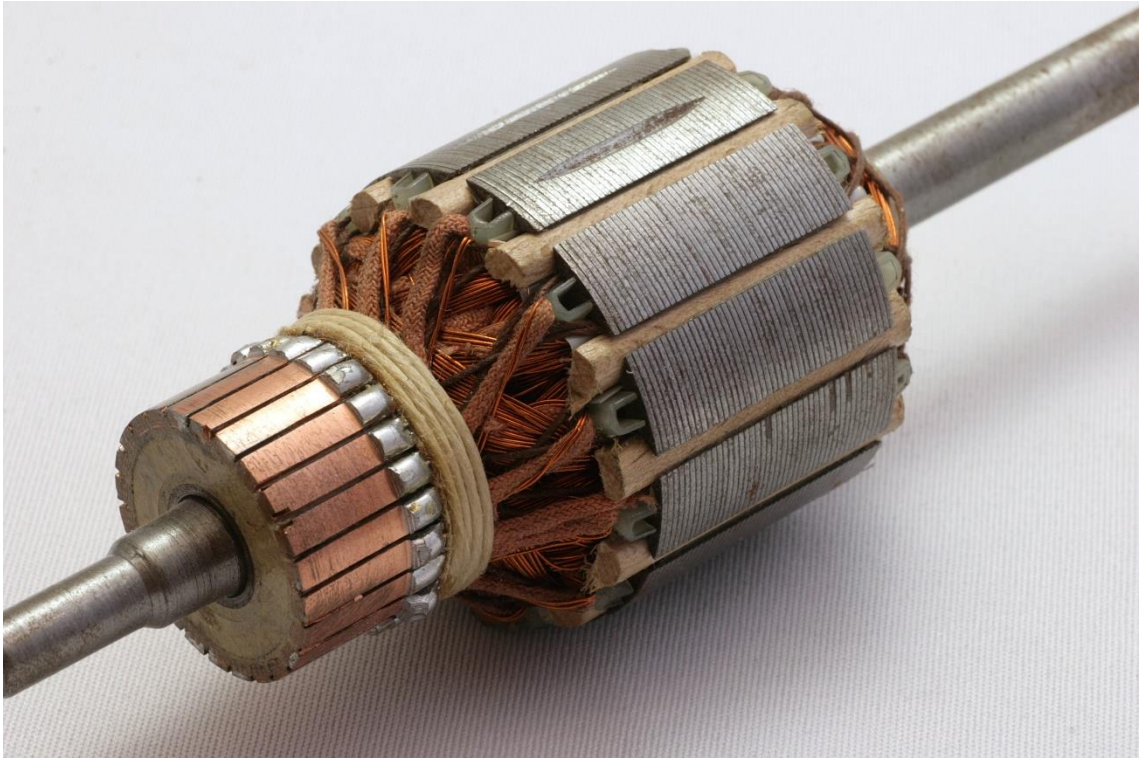
- Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique.
- Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre.

L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer la distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

## 1.3.2 Rotor

Il y a deux types

### *a/ Rotor bobiné*



**Figure 1.3.** rotor bobiné

Le rotor bobiné *Figure 1.3*, de la machine est constitué de 3 bobines, chaque bobine est reliée à une bague, les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor.

Ce type de rotor a été conçu pour permettre la variation de la résistance du rotor en insérant des résistances en série avec les bobines afin de réaliser un démarrage rotorique. Ce dispositif a ensuite permis la variation de vitesse avec un rendement acceptable au moyen d'un procédé appelé cascade hyposynchrone.

Le coût élevé et l'apparition des variateurs de fréquence a rendu obsolète ce type de machines.

## *b/ Rotor a cage d'écureuil*



**Figure 1.4.** Rotor a cage d'écureuil

Dans le rotor à cage, Figure 1.4 les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service [3].

## 1.3.3 Les enroulements

Les enroulements assure le passage des courants électriques à l'intérieur de la machine. On trouve principalement les enroulements statoriques et rotoriques, ces enroulements sont, dans le cas général, du type polyphasé, chaque encoche ménagée dans la tôle magnétique débouche sur l'entrefer et contient un certain nombre de conducteurs, on réalise: soit des bobinages en un étage, ou tous les conducteurs d'une encoche appartiennent à une même phase et qui sont utilisés pour les machines de faible puissance, soit des bobinages en deux étages, ou tous les conducteurs d'un étage situés dans une encoche appartiennent à une même phase et sont reliés électriquement en série, suivant la valeur du pas de bobinage, il peut arriver que deux phases cohabitent dans la même encoche. Ces bobinages sont du type imbriqué ou ondulé et ils sont couramment utilisés dans les machines de moyenne et de forte puissance [4] .

## 1.3.4 Circuit magnétique



**Figure1.5.** Circuit magnétique

le couple développé dans une machine électrique est proportionnel au produit du flux magnétique par le courant induit.

Il existe donc deux constituants principaux pour la partie active d'une machine: un ensemble de conducteurs chargé de véhiculer les courants et un circuit magnétique dont les fonctions principales sont:

- La canalisation des lignes d'induction magnétiques,
- Le maintien des conducteurs,
- La conduction thermique des conducteurs vers les zones de refroidissement (canaux de ventilation, entrefer).

Le circuit magnétique doit donc présenter à la fois des propriétés magnétiques, des caractéristiques mécaniques déterminées et une bonne conductivité thermique. Les pertes fer, par hystérésis et par courant de Foucault sont relativement importantes dans ces types de circuits, on utilise des tôles de faible épaisseur, à grande perméabilité et à pertes magnétiques réduites [4].

## 1.3.5 La carcasse

La carcasse est une enveloppe métallique qui joue le rôle de protection contre les conditions extérieures. Elle agit comme échangeur thermique et guide l'air de ventilation, elle comporte aussi le support de fixation du moteur.

## 1.3.6 L'arbre

L'arbre de la machine électrique est un organe de transmission du mouvement de rotation. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor, au circuit magnétique et aux enroulements tournants. L'arbre est lui-même supporté par un ou plusieurs paliers suivant la configuration de l'ensemble de la ligne d'arbre. Dans certains cas, l'arbre sert de soutien au collecteur, aux ventilateurs, aux bagues, aux rotors, ainsi qu'à des accessoires variés [4].



## 1.3.7 Ventilateur

La ventilation a pour but de dégager les pertes internes de leurs différentes sources qui est due a la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique, ou inversement et d'assurer aussi un refroidissement homogène que des bobinages.

On peut distinguer deux grands systèmes de ventilation: Ventilation axiale, dans cette solution, et comme son nom l'indique, l'air circule suivant un chemin sensiblement parallèle à l'axe de la machine, il suffit de mettre le ventilateur à l'une des extrémités pour assurer le mouvement de l'air et ventilation radiale. Dans les grosses machines, on utilise la ventilation radiale symétrique, le fluide de refroidissement étant dirigé perpendiculairement à l'arbre. Il est possible d'utiliser aussi un ventilateur radial qu'un ventilateur axial pour engendrer la pression nécessaire pour vaincre les pertes de charge du circuit de refroidissement [4] .

## 1.3.8 Les roulement



*Figure 1.6.* Le roulement

les roulements soutiennent le rotor et assurent sa libre rotation. Les déplacements axiaux sont bloqués par un calage longitudinal sur l'un des paliers, l'autre palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre.

## 1.4 Schémas équivalents

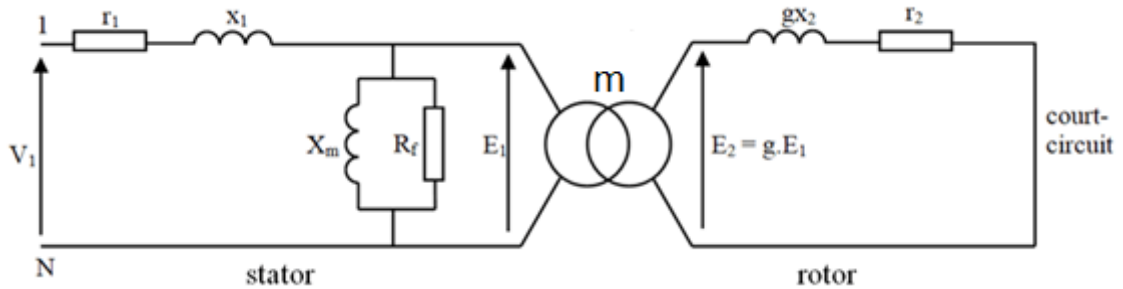


Figure 1.7. Schéma équivalent du moteur asynchrone

Pour modéliser la machine réelle, on désigne un circuit électrique qui comporte des dipôles linéaires

Le schéma équivalent en accord comprend, au minimum, une association de résistances et d'inductances.

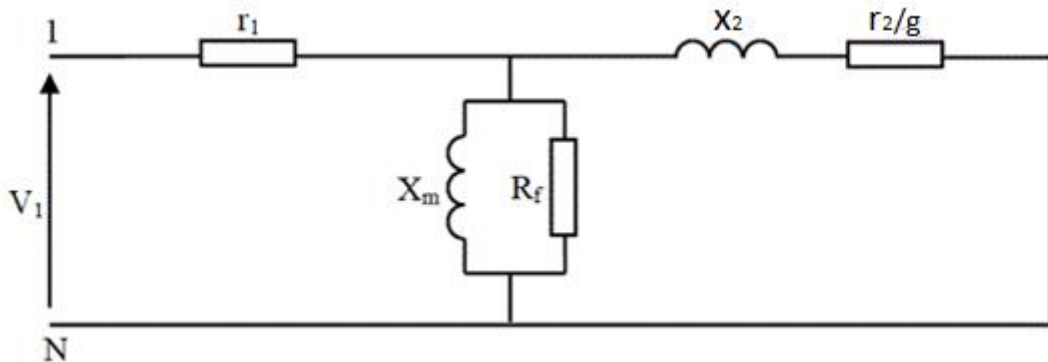


Figure 1.8. Schéma équivalent ramené au stator du moteur asynchrone

En peut transformés les circuits magnétiquement couplés en de nombreux schémas, il est possible de décrire la machine asynchrone avec chacun de ces schémas transformés

Dans la pratique, seuls certains modèles sont effectivement utilisés.

Le modèle à fuites secondaires avec l'ensemble ramené au stator est le plus fréquent dans la littérature car il comporte des éléments que l'on peut identifier relativement simplement et de manière suffisamment précise et il est simple d'emploi **Figure 1.8**

## 1.5 Défauts des machines électrique tournantes

Dans ce paragraphe sont présentés différents défauts des machines électriques, 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.

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.

D'après 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 [5].

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le **Tableau 1.1**.



# Chapitre 1 : Généralités

Défaillances des machines électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
		Mouvement des enroulements et des tôles	
		Électrique	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Défaillance au niveau du circuit magnétique		
	Externe	Mécanique	Charge oscillante
			Surcharge de la machine
			Défaut de montage
		Environnementale	Humidité
			Température
			Propreté
		Électrique	Fluctuation de la tension
			Sources de tensions déséquilibrées
Réseau bruité			

**Tableau 1.1.** Défaits des machines électriques selon leurs origines

Statistiquement, il est difficile de donner une répartition exacte des défaillances de machines électriques puisque le recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance [8].

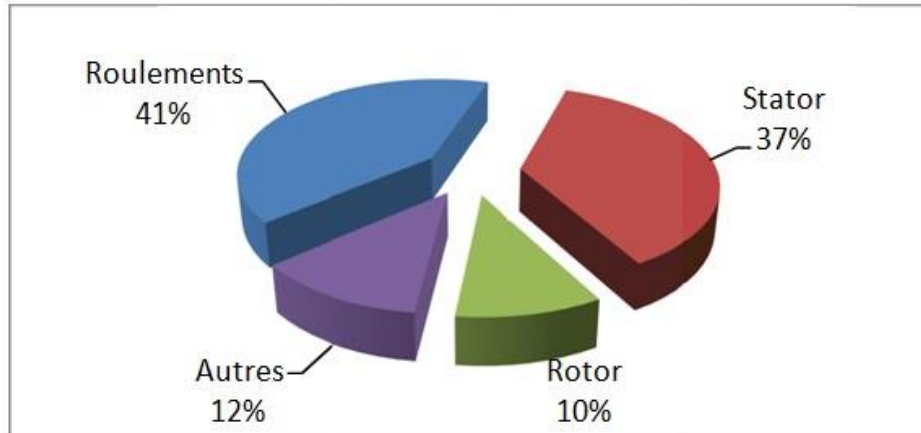
Des multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à présent. Toutes ces statistiques concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie [12.14.15].

Les études effectuées sur des machines asynchrones de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) dans les années 90 par Thorsen [15] mentionnées après par Thomson [14] ont montré que sur cette gamme de puissance certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres et les pannes le plus fréquentes sont du type mécanique (voir *Figure 1.9* (a)).

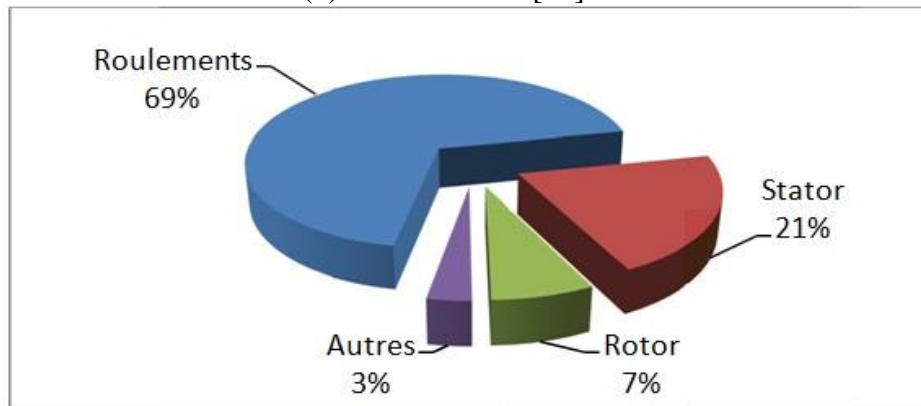
# Chapitre 1 : Généralités

La majorité d'entre elles se situent sur les roulements (41 %) et le stator (37 %). Les moins fréquentes sont les panne au rotor (10 %) et les autres types constituent 12 %.

(a) Thomson 1999 [14]



(b) Bonnett 2008 [12]



**Figure 1.9.** Évolution du pourcentage des défauts pendant une décennie

Une étude statistique récente faite par Bonnett [12] sur les machines asynchrones de grande puissance, exploitées dans l'industrie pétrochimique, montre que 69 % de pannes se situent sur les roulements, 21 % au stator, 7 % au rotor et 3 % dans les autres régions de la machine (voir *Figure 1.9.* (b)).

Comme cela a été déjà mentionnée dans l'étude de Thomson [14], la répartition présentée dans l'étude de Bonnett [12] confirme que les défauts des machines de grande puissance proviennent principalement de roulements et du bobinage statorique (voir *Figure 1.9.* (a), (b)).

D'autre part, ces études montrent que pendant une décennie la répartition du pourcentage de ces défauts a changé, les défauts de roulements sont passés de 41% à 69%, les défauts au stator sont passés de 37% à 21% et celles au rotor de 10% à 7%. On constate que les défauts dans le stator et le rotor sont de moins en moins fréquents. Cela est dû à l'amélioration de la technique de fabrication de machines électriques (par exemple, l'amélioration des isolants). La principale source de défaillance reste les roulements.

Il est à noter que les techniques d'alimentation des machines électriques provoquent aussi des défaillances, par exemple, les enroulements sont excités par des tensions comprenant des fronts raides ce qui accélère le vieillissement de l'isolation du bobinage statorique.

Les causes des défauts au stator et au rotor sont multiples, les plus fréquentes d'entre eux sont énumérées ci-dessous[12] :

## ❖ Défauts statoriques :

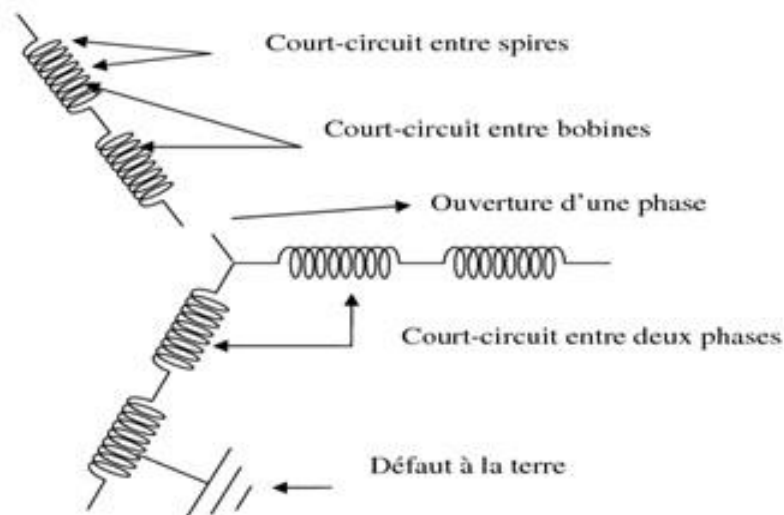
- court-circuit entre spires : surtension, température excessive, vibration, humidité ;
- court-circuit entre phases : haute température, alimentation déséquilibré, défaut d'installation ;
- défaut d'isolation : démarrage fréquent, décharge partielle, condition, température et humidité extrême .
- défaut entre le stator et la carcasse : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc .
- déplacement des conducteurs : démarrage fréquent, vibration de tête de bobines .
- défaillance des connecteurs : vibration excessive .
- vibration de la carcasse : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

## ❖ Défauts rotoriques :

- défaut de roulements : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, haute température, perte de lubrifiant, charge déséquilibrée, corrosion.
- rupture de barres : cycle thermique, régime transitoire à longue durée .
- déséquilibre magnétique.
- rupture d'une portion d'anneau : cycle thermique .
- excentricité : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défauts des roulements .
- désalignement des roulements : défaut de couplage, mauvaise installation, surcharge .
- défaut du circuit magnétique : défaut de fabrication, surcharge, cycle thermique .
- déséquilibre mécanique : mauvais alignement, mouvement des anneaux de court-circuit.

Une description succincte des défauts les plus courants est donnée dans les paragraphes suivants :

### 1.5.1 Défauts statoriques



**Figure 1.10.** Défauts statoriques

La majeure partie des défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants qui se manifestent sous la forme d'un court-circuit entre spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse.

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement.

D'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique . La contrainte thermique amenée par le courant de court-circuit risque d'entraîner la propagation du défaut à d'autres spires, ce qui peut conduire au déclenchement des protections électriques dans l'alimentation [16].

Un court-circuit entre phases peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient.

L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine.

Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs.

L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage [5].

## 1.5.2 Defauts rotoriques

### *a Défauts de roulements*

Comme il est indiqué sur la *Figure 1.9*, la majorité des défauts dans les machines électriques concernent les défauts de roulements qui ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs .

# Chapitre 1 : Généralités

---

Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Ce type de défaut induit également des variations (oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor [5].

## ***b Excentricité***

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité.

L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator.

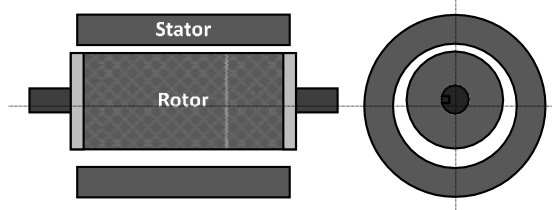
Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité.:

- La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement.
  
- Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor . L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux.

Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine .

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées [24] :

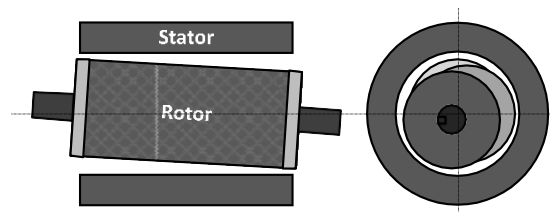
## ➤ L'excentricité statique



**Figure 1.11.** Excentricité statique

Généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.

## ➤ L'excentricité dynamique

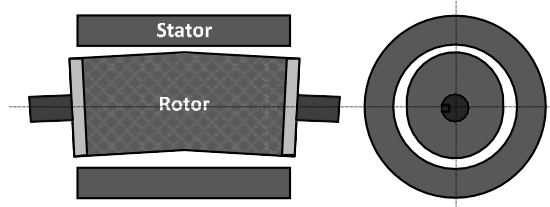


**Figure 1.12.** Excentricité dynamique

Corresponds, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator.

Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes

## ➤ L'excentricité mixte : Est la somme des deux cas présentés ci-dessus.



**Figure 1.13.** Excentricité mixte

## c Défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Les mêmes défauts qu'au stator peuvent se retrouver dans un rotor bobiné. Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (*Figure 1.14*).



**Figure 1.14.** rupture de barres ; rupture d'anneau de court-circuit

Les ruptures de barres ou de portions d'anneau 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). Si l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques [25].

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres dans une machine asynchrone à cage.

Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure .

L'apparition d'un défaut de rupture de barres ne conduit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes .



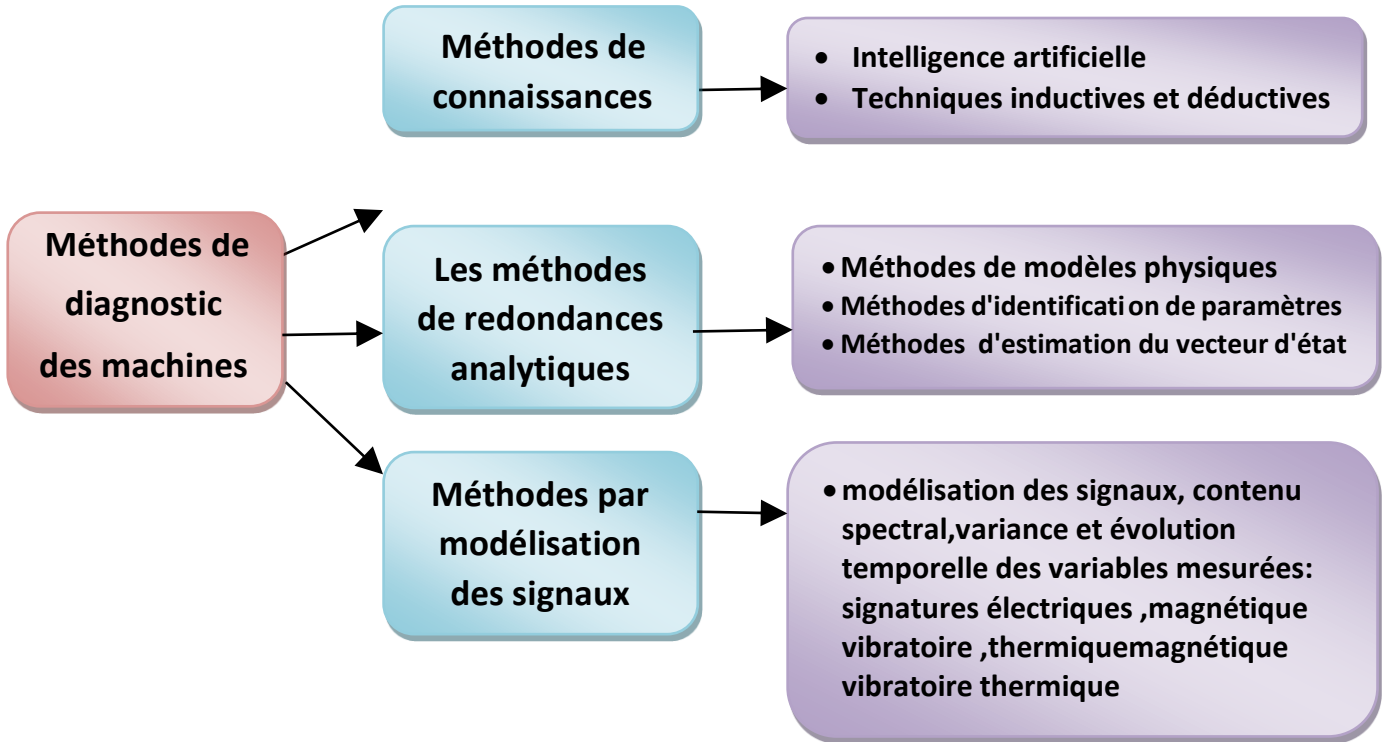
Ces barres sont alors surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine.

Devant la multitude des défauts possibles 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 [27, 28].

## 1.6 Méthodes de diagnostic des machines électrique

On retrouve, dans les différents travaux, les trois axes constituant le domaine du diagnostic des machines électriques, qui conduisent à définir trois méthodologies de diagnostic : méthodes de connaissances, méthodes de redondances analytiques et méthodes par modélisation de signaux (voir *Figure 1.15*).

La *Figure 1.15* présente le diaporama des méthodes de diagnostic de machines électriques [8].



*Figure 1.15.* Diaporama des méthodes de diagnostic de machines électriques

## 1.6.1 Les méthodes de connaissances

N'utilisent pas de modèle mathématique pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expérience humaine confortée par des retours d'expérience. Dans la littérature sont présentées plusieurs techniques de détection de défauts par ces méthodes [29].

Les techniques basées sur l'intelligence artificielle mettent en œuvre la reconnaissance de formes, les systèmes experts, les réseaux de neurones et la logique floue [33,34], qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacité.

Les méthodes inductives ou déductives ne s'appliquent pas directement au diagnostic, mais peuvent y aider. Elles sont essentiellement utilisées pour définir les causes du défaut en utilisant des modèles de pannes. Il est à noter que ces méthodes sont davantage du ressort des automaticiens que des électrotechniciens [33,34].

## **1.6.2 Les méthodes de redondances analytiques**

Se basent sur une modélisation quantitative du système et exploitent les relations entre les variables du système considéré pour identifier les paramètres physiques à surveiller. On y distingue trois classes : les méthodes de modèles physiques, les méthodes d'identification de paramètres et les méthodes d'estimation du vecteur d'état [8].

## **1.6.3 Les méthodes par modélisation de signaux**

Sont des méthodes basées sur une modélisation des signaux, le contenu spectral, la variance et l'évolution temporelle des variables mesurées.

Ces méthodes exploitent essentiellement les signatures électrique, magnétique, vibratoire, thermique ou la puissance instantanée .

La démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic des défauts sur les machines électriques repasse sur l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut.

Les grandeurs et signaux de défauts les plus fréquemment utilisés sont : les courants statoriques, la tension d'alimentation, le flux de dispersion, le couple électromagnétique, la vitesse de rotation, la puissance instantanée aussi que les vibrations mécaniques [37].

## ***a Technique mécanique***

Parmi ces techniques, on trouve [22]. :

### **a.1 Diagnostic par mesure de la température**

Les températures des supports sont surveillées sur des bases de routine, et fournissent des informations utiles. Un volume de liquide refroidissant, débouché sur des températures, est aussi précieux pour l'indication des problèmes de refroidissement et pour le contrôle lorsqu'il est proposé de faire opérer la machine au delà de sa puissance.

Les températures des bobines sont aussi impératives pour la détermination de la limite pour laquelle le moteur peut être chargé et pour l'estimation de la durée de vie rémanente de l'isolation des enroulements. Elles sont rarement mesurées à cause des problèmes d'obtention de l'isolation électrique contre les conducteurs de haute tension, bien que les détecteurs de température soient parfois intercalés dans l'isolant renfermé sur le point surchauffé du conducteur, mais cela affaiblit l'intégrité de l'isolant.

Il demeure donc une nécessité pour le capteur de fortes températures lequel peut être monté sur les enroulements ou inséré dans l'isolant électriquement isolé par rapport à son instrument de mesure.

### **a.2 Diagnostic par mesure des vibrations**

Le diagnostic vibratoire est une méthode très ancienne et très utilisée pour la détection des défauts dans les machines électriques.

Toutes les machines électriques produisent du bruit et des vibrations. Leur analyse peut être employée pour fournir des informations sur l'état de la machine.

# Chapitre 1 : Généralités

---

Plus souvent, les mesures sont faites comme une procédure non fréquente ou lorsqu'un problème est suspecté, les mesures sont faites en utilisant des accéléromètres ou des capteurs de vitesse à boulons.

Des sondes de déphasage sont aussi employées pour le contrôle du mouvement de l'arbre.

Le désalignement entre les centres des supports donnant naissance à un entrefer non uniforme produit la vibration à une fréquence double, tandis que le déséquilibre mécanique engendré.

la vibration à la vitesse angulaire, au moment où les deux dépendent de la réponse mécanique à cette fréquence.

Les signaux de vibrations détectés contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations.

## ***b Diagnostic chimiques***

Plusieurs moteurs sont refroidis par l'air ou à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur hydro réfrigéré. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air refroidissant et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge.

L'air est tiré du moteur à travers le tube vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seules les moteurs en service sont échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes.

L'huile de roulement est aussi analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents.

A ce stade, on peut conclure que la plupart des techniques précitées exigent l'emploi des capteurs, qui doivent être placés au niveau de la machine. C'est pour cette raison qu'elles peuvent être utilisées que pour les machines de grande puissance.

Ces techniques sont basées généralement sur l'utilisation des grandeurs mécaniques, afin que les ingénieurs mécaniciens puissent faire leur interprétation, malgré que les machines sont des moteurs électriques. La présence des ingénieurs électriciens est

nécessaire pour intervenir dans la partie électrique et pour cette raison, les techniques de diagnostic sont de plus en plus orientées vers l'emploi des grandeurs électriques vu leur accessibilité et la simplicité du capteur utilisé [23].

## *c Technique magnetique electrique*

### *c.1 La transformee de fourier rapide*

La transformée de Fourier rapide, est une technique mathématique de calcul rapide élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tuckey. La FFT permet de ramener le calcul de la transformée de Fourier discrète de  $N^2$  à  $N \cdot \log(N)$  opérations. Cette réduction de la complexité de calcul a suffi à faire passer facilement résolubles de nombreux problèmes liés à l'analyse spectrale. Pour une meilleure visualisation d'une analyse fréquentielle, la FFT est utilisée au travers d'une fenêtre glissante d'observation. Malgré sa célébrité et son succès, la FFT reste inadaptable pour les signaux non stationnaires et elle montre assez vite ses limitations, perte de localisation temporelle [40].

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points  $N$  égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps

de 
$$\frac{N}{N \cdot \log N}$$

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal  $x(t)$ . En effet, la FFT décompose le signal  $x(t)$  sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux  $\{e^{2\pi f k T}\} f \in R$ .

Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate.

Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts d'impulsions ou de changements de fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent

dans le signal. Ces phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire, leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence.[45]

## c.2 Diagnostic par mesure de flux magnétique axial de fuite

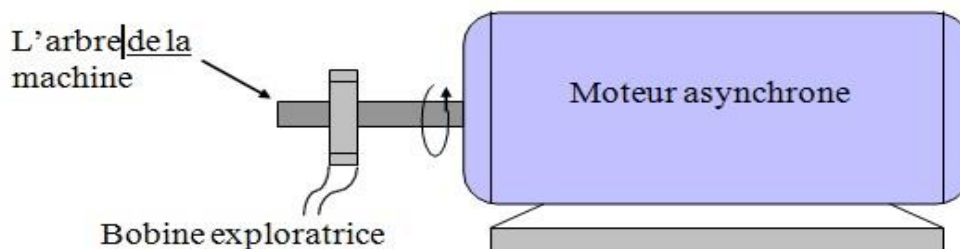
Le flux de fuite axial peut être détecté par une bobine (bobine exploratrice) enroulée autour de l'arbre de la machine (*Figure 1.16.*) et aussi par n'importe quel arrangement symétrique simple des bobines placées à l'extrémité de l'arbre de la machine ou par d'autres dispositifs sensibles telles que les sondes à effet hall.

Lorsque la bobine est enroulée autour de l'arbre d'une machine électrique, elle est le siège d'une force électromotrice ( $F_{em}$ ) induite qui est liée aux flux de fuite axiaux.

Les flux de fuites sont présents dans toutes les machines électriques en raison des asymétries dans les circuits électriques et magnétiques qui sont dues aux fluctuations du réseau électrique et les tolérances pendant le processus de fabrication.

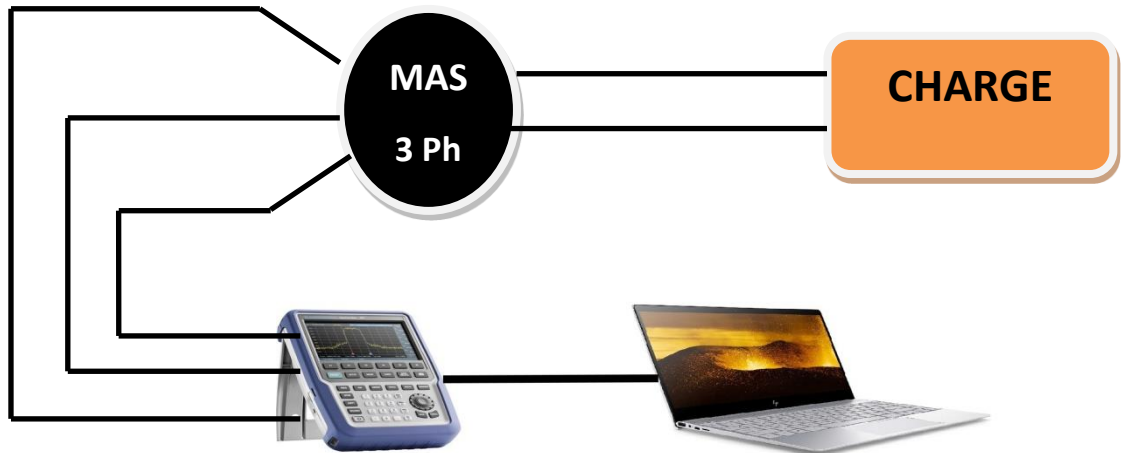
L'analyse spectrale de la tension induite peut être utilisée pour identifier les différentes asymétries et défauts. Le contenu d'harmoniques des flux de fuites axiaux du stator et du rotor est directement en relation avec les harmoniques contenus respectivement dans les courants du stator et du rotor.

La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est la condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic, c'est-à-dire ce dernier doit avoir une valeur importante [26].



**Figure 1.16.** Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial

## c.3 Diagnostic par l'analyse du courant statorique



**Figure 1.17.** schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique

Bien que la machine asynchrone soit célèbre par son faible coût de construction et ses qualités de robustesse, il peut lui arriver beaucoup des pannes électriques ou mécaniques.

Les exigences industrielles en terme de maintenance orientent la recherche vers un diagnostic utilisant des grandeurs électromagnétiques telles que le flux, le courant, la tension, et plus particulièrement le courant statorique qui n'exige qu'un capteur de courant qui donne une image sur le courant de phase statorique, d'autre part cette technique permet d'améliorer la fiabilité du moteur et d'augmenter sa durée de vie. La technique de l'analyse spectrale du courant statorique est la plus utilisée parce qu'elle permet non seulement la détection d'autres types de défauts mais aussi de s'affranchir des problèmes d'accessibilité [27.41].

Nous savons que la présence d'un défaut au sein de la cage rotorique fait apparaître des composantes additionnelles dans le spectre fréquentiel des grandeurs temporelles analysées précédemment. Par conséquent, une comparaison entre les spectres obtenus avec un rotor sain et un rotor défaillant nous permettra de mieux discerner les composantes créées par le défaut rotorique.



L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus utilisée car le spectre résultant contient une source d'informations sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone [42].

Le contenu spectral du courant statorique ne se limite pas seulement à la composante fondamentale de fréquence 50 Hz. En effet, les harmoniques d'espace contribuent à augmenter la richesse d'harmonique de ce signal. Nous pouvons remarquer la présence de plusieurs composantes dont les fréquences sont bien connues à ce jour  $(1 \pm 2g)fs$ .

Nous savons que la rupture d'une barre de la cage rotorique induit dans le spectre du courant statorique une composante de fréquence  $(1-2g)fs$ , [43.44], En effet, la rupture d'une barre rotorique crée, dans l'entrefer de la machine, un champ tournant inverse de fréquence  $gf$ . L'interaction de ce champ tournant avec la vitesse rotorique crée une composante de fréquence  $(1-2g)fs$  dans le spectre du courant statorique. La présence de cette modulation dans le courant statorique induit une oscillation au niveau du couple électromagnétique de la machine de fréquence  $2gfs$ . Cette oscillation de couple crée inévitablement une oscillation de la vitesse rotorique à la même fréquence. Cette oscillation de vitesse induit une nouvelle composante de fréquence  $(1+2g) fs$  dans le spectre du courant statorique.

## 1.7 Conclusion

Le moteur asynchrone est une machine très robuste par rapport aux autres moteurs sur le terrain et a cause de ça cette machine est la plus utilisée dans tout les domaines d'industrie. N'oublions pas que le coût d'achat de cette machine est équilibrés par rapport au autres machines.

Malgré sa robustesse et sa dureté cette machine peut avoir une variété de défauts au niveau de ses différentes parties, c'est pour cela les chercheurs on trouvait beaucoup de méthodes de diagnostic de ces défauts.

Dans notre deuxième chapitre on va parler de la conception des machines électriques qui va nous aider à simplifier le diagnostic de leurs défauts.

**CHAPITRE 2 :  
CONCEPTION ASSISTEE  
PAR ORDINATEUR**

## 2.1 Introduction

De façon générale, les logiciels et les outils d'étude sur ordinateur des systèmes électriques permettent de déterminer les performances des machines électriques en partant d'une expérience ou d'une conception initiale, cela conduit à un problème de dimensionnement qui doit être traité obligatoirement par un processus itératif.

Dans cette situation, on cherche habituellement à établir une méthodologie de conception la plus efficace possible pour les machines électriques de façon générale.

Dans ce chapitre on va déterminer une définition précise de la conception assistée par ordinateur, présenter ses objectifs et rendre compte des outils et méthodologies utilisés pour la CAO des machines électriques par des apports théoriques et par la mise en œuvre des méthodologies proposées.

## 2.2 Définition de la CAO

Le terme de «Conception assistée par ordinateur» ou bien la CAO est aujourd'hui utilisée de façon très élargie, pour la plupart des utilisateurs, cette appellation couvre l'ensemble des fonctions qu'un ordinateur est apte d'assumer lors du développement de produits techniques.

Un outil de CAO est un moyen de simulation permettant la définition de la structure du dispositif à concevoir, son dimensionnement et la détermination de ces performances à partir de ces spécifications géométriques de construction et des conditions d'utilisations. En partant d'un cahier des charges donné, il permet d'explorer automatiquement l'ensemble des solutions possibles.

### 2.3 CAO des machines électriques

La majorité des activités dans l'industrie électrique de toutes ses filières est le croisement de certaines disciplines supplémentaires.

Ainsi, une machine électrique joue le rôle d'une conversion énergétique de tel sorte qu'elle convertit l'énergie électrique en énergie mécanique et à cause de ça elle est le base des phénomènes électromagnétiques, par exemple les efforts électrodynamiques, les phénomènes mécaniques telle que les vibrations et le couple, et aussi les phénomènes thermiques comme l'échauffement dû aux pertes qui doivent être abordés simultanément lors de la conception de la machine.

Au cours de la conception d'une machine électrique, on peut rencontrer par plusieurs synthèses multidisciplinaires des fonctions principales de la machine, les obligations de cahier des charges et des contraintes liées aux aspects constructifs ou dimensionnels relatifs aux effets induits par la partie électromagnétique.

Dans un milieu industriel l'emplacement d'outils de conception assistée par ordinateur doit tenir compte des aspects particuliers de l'industrie tel que la technologie du matériel et de l'appareillage électrique et pour cela on introduit les notions de la mécanique, de la schématisation et d'outils spécifiques aux machines électriques et à l'électronique de puissance.

Evolution marquante d'une machine ou les nouvelles conceptions représente la matérialisation physique du cahier des charges de l'étude et des différentes dispositions prises.

Les machines électriques ont encore une marge considérable d'amélioration du fait des nouveaux matériaux, de l'utilisation croissante de l'électronique de puissance, et de la montée en puissance de la commande en temps réel.

Ces innovations ont été possibles grâce aux progrès réalisés dans la connaissance des machines et de leur commande mais aussi grâce aux progrès réalisés dans la démarche de conception. La maîtrise des savoirs et savoir-faire par les ingénieurs est la clé de voute.

### 2.4 Implémentation de la CAO

La réalisation de la CAO nécessite en obligation des systèmes informatiques équipé par des moyens bien déterminé pour occuper les tâches qui sont utilisables dans le domaine de la conception.

#### 2.4.1 Le Matériel

Le matériel de base est un ordinateur qui assure une connexion étroite avec des périphériques graphiques, que ce soient des écrans, des traceurs de courbes ou des tables de dessin. Ce matériel doit être capable de traiter des problèmes techniques nécessitant une grande capacité de traitement numérique, mais également de stocker en mémoire un grand nombre d'informations correspondant aux données de description de l'objet en cours de conception. [20.21]

Aujourd'hui, ce concept est remplacé par celui de station de travail qui comprend une capacité mémoire importante, une capacité de traitement souvent très grande et un écran en relation directe avec la mémoire. Une telle station de travail est parfaitement adaptée au travail en mode graphique interactif et devient donc l'outil de base idéal de tout système de CAO.

#### 2.4.2 Le Logiciel

Dans un système de CAO, le logiciel est l'élément fondamental qui va permettre de conférer au système les qualités de fonctionnement, de convivialité, de fiabilité qui en ferant le partenaire efficace du concepteur. Le logiciel d'un système de CAO peut être décomposé en trois éléments essentiels mais dont les fonctions sont bien distinctes : le logiciel de base, le logiciel finalisé et les logiciels d'applications. Ces derniers constituent la couche la plus externe du système et sont spécifiques à chaque famille d'applications (mécanique, électronique, électrotechnique,...etc).

Le logiciel de base est consacré à la gestion et à l'optimisation du fonctionnement interne de l'ordinateur et de ses périphériques. Cette partie du logiciel est le système d'exploitation qui accomplit les tâches qui permettent au programme de l'utilisateur d'être exécuté fidèlement en gérant de manière optimale les ressources de l'ordinateur, de la station de travail ou du réseau.

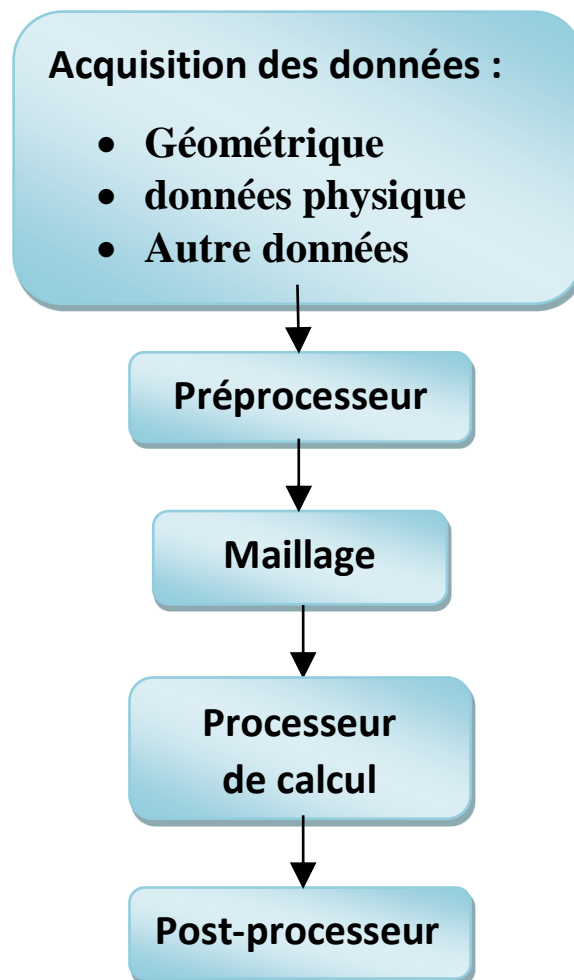
## Chapitre 2 : Conception assistée par ordinateur

Par contre le logiciel finalisé est centré sur les aspects fondamentaux de l'interaction entre le concepteur et son projet et gère les aspects généraux de structuration des informations et de gestion des algorithmes propres à tous les systèmes de CAO. Il est formé de tous les outils qui permettent, à partir du logiciel de base, de traiter toutes les applications relatives à l'objet en cours de conception [20.21].

Dans notre travail on utilise le logiciel FLUX 2D pour la conception du moteur asynchrone.

La simulation d'une machine électrique sur ordinateur en général nécessite le calcul numérique du champ électromagnétique.

La structure globale des logiciels de simulation est représentée sur la *Figure 2.4*. [18].



*Figure 2.1.* La structure globale des logiciels de CAO

## Chapitre 2 : Conception assistée par ordinateur

---

### 2.5 Logiciel FLUX 2D

#### *a Historique du logiciel*

Ce logiciel a été réalisé en 1981 en collaboration entre le laboratoire d'électrotechnique de Grenoble et Laboratoire d'Electrostatique et Matériaux Diélectriques et du Laboratoire de Magnétisme du Navire, et depuis cette date il est commercialisé par la société CEDRAT S.A

Aujourd'hui le flux 2D est utilisé par les principaux constructeurs de matériel électrique [18].

#### *b Présentation du FLUX 2D*

Flux2D est un logiciel de simulation numérique utilisé en conception assistée par ordinateur. Il utilise la méthode des éléments finis et permet le calcul des états magnétiques, électriques ou thermiques des dispositifs en régimes permanents, transitoires et harmoniques, avec des fonctionnalités d'analyse multi-paramétrique étendues, les couplages circuit et cinématique.

Ceci nécessite la résolution d'équations diverses : équations de Maxwell, de la chaleur, loi de comportement des matériaux.

La difficulté de la résolution simultanée de ces équations, le code est découpé en un ensemble de modules chargés de résoudre chacun un type de problème donné.

Ce logiciel développé au départ pour les applications électrostatiques et magnétostatique, en particulier la notion de couplage entre les équations de champ et les équations du circuit extérieur permettant de simuler le fonctionnement d'un moteur alimenté sous une tension donnée au stator et tenir compte de l'effet de fermeture des anneaux de court-circuit au rotor.

La possibilité de simuler le mouvement du rotor et la tension d'alimentation en fonction du temps permettent d'étudier l'effet du couple instantané au delà du couple moyen calculé par les méthodes classiques.

## Chapitre 2 : Conception assistée par ordinateur

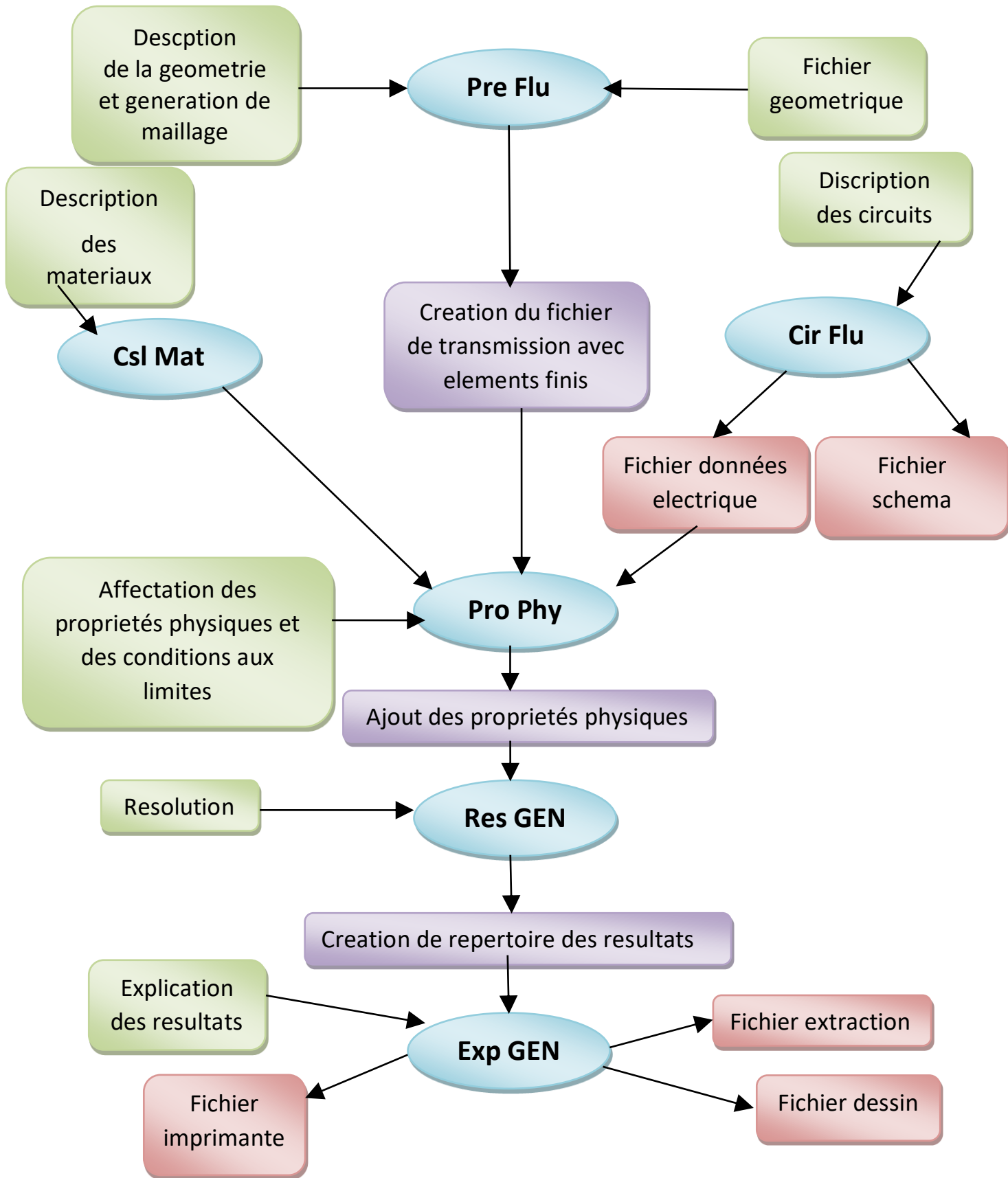


Figure 2.2. Présentation de FLUX 2D



### **2.6 Conclusion**

La CAO est un domaine très élargie qui nous permet de concevoir les machines électriques à base des logiciels spécifiques et avoir un modèle d'étude très proche de la réalité.

Dans ce chapitre on a essayé de représenter une CAO commençant par une définition bien déterminée sur cette technique.

D'une part on a vu surtout les principaux étapes d'étude de conception et de dimensionnement d'une structure donnée des dispositifs électrotechniques de façon générale et les machines électriques de façon spéciale.

D'une autre part on a vu l'implémentation et le matériel utilisé pour faire réussir une CAO, sans oublier la représentation du logiciel FLUX 2D lequel on va utiliser dans notre prochain chapitre.

**CHAPITRE 3 :  
MODÉLISATION PAR LA  
MÉTHODE DES  
ÉLÉMENTS FINIS**

### 3.1 Introduction

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil prennent une grande partie dans des nombreux travaux, que ce soit dans le but de conception, de la commande ou le diagnostic. La variété des objectifs a fait apparaître plusieurs techniques de la modélisation et des outils de la simulation selon le domaine étudié.

Les modèles analytiques de la machine asynchrone, à savoir le modèle de Park, le modèle multi enroulement et le modèle multi-spires sont limités par des hypothèses simplificatrices. Ils prennent en compte tous les comportements des circuits électriques équivalents de la machine asynchrone. Ils ne représentent pas les phénomènes magnétiques ou électriques tels les courants induits, l'effet de la géométrie complexe, la saturation magnétique, ... ces hypothèses conduisent par conséquent à l'omission d'informations approprié sur l'état de la machine.

Pour avoir une modélisation plus précise, plus exacte et plus détailler du moteur, il est obligé de tenir en compte les phénomènes électromagnétiques de la machine. La résolution numérique des équations de Maxwell régissant le fonctionnement du moteur, permet de réduire les simplifications introduites dans les modèles précédents et d'avoir un modèle plus proche de la machine réelle.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons, alors, à l'élaboration d'un modèle qui tient compte de la topologie, les dimensions, les phénomènes magnétiques et électriques ainsi que de la composition et la géométrie complexe de la machine asynchrone a cage d'écureuil, basée sur la méthode des éléments finis.

### **3.2 Méthode Des éléments Finis**

#### **3.2.1 Historique de méthode d'élément finis**

Historiquement les premiers développements de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années 1940, mais ce sont les mécaniciens qui ont développé, popularisé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1940-1960.

En 1970, Silvester et son équipe de l'université MC Gill à Montréal se sont intéressés à l'adaptation de cette méthode de résolution des problèmes elliptiques à l'Electrotechnique [6].

La méthode des éléments finis est généralement utilisée pour modéliser précisément et clairement des systèmes électrotechniques. Cette méthode permet de considérer la géométrie de la machine et permet d'avoir une approche systématique des problèmes magnétiques

De plus, un couplage entre les grandeurs électriques, mécaniques, et magnétiques peut être réalisé. Les éléments finis permettent également une étude tridimensionnelle, ce qui apporte une très grande finesse dans la connaissance du système.

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques.

#### **3.2.2 Présentation de la méthode des éléments finis**

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, l'effet de saturation des matériaux magnétiques, les effets d'harmoniques de l'espace ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé (géométrie, physique, lien avec les équations de circuit...) et que l'on utilise le mode de résolution adéquate

## **Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis**

(magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul (Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation [7]

### **3.2.3 Principe de la méthode des éléments finis**

Le principe élémentaire de cette méthode consiste à découper le circuit magnétique de la machine en éléments de dimension suffisamment faible (appelé élément fini) pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes.

A partir des formes locales des équations de Maxwell, il est possible d'exprimer le problème à résoudre.

Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [39].

• Pour les éléments triangulaires on a :

$$\mathbf{A}_e(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{a} + \mathbf{b}\mathbf{x} + \mathbf{c}\mathbf{y} \quad (\text{Eq 3.14})$$

• Pour les éléments quadrilatéraux on a :

$$\mathbf{A}_e(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{a} + \mathbf{b}\mathbf{x} + \mathbf{c}\mathbf{y} + \mathbf{d}\mathbf{x}\mathbf{y} \quad (\text{Eq 3.15})$$

Les constantes a b c et d sont à déterminer. Le potentiel  $\mathbf{A}_e$  est en générale non nul dans l'élément et nul ailleurs.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

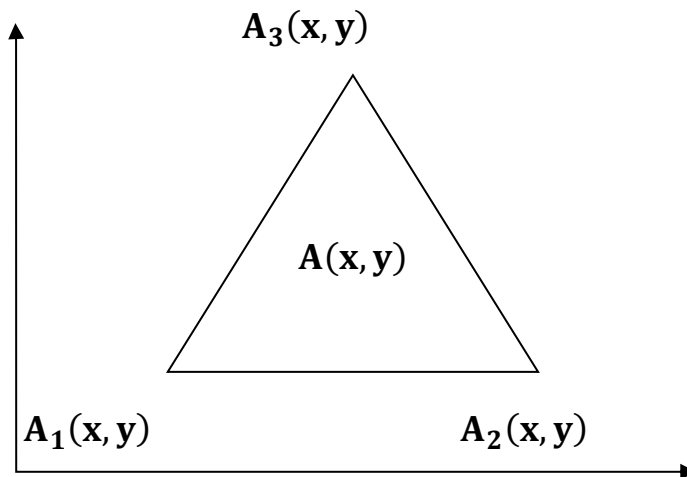
La valeur approchée du potentiel dans un point du domaine de résolution est donnée par :

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{e=1}^{ne} \mathbf{A}_e(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (\text{Eq 3.15})$$

$e$ : Numéro d'élément.

$ne$  : Le nombre totale des éléments du domaine de résolution

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets [39].



**Figure 3.1.** Fonction d'interpolation d'un élément

La résolution analytique est complexe et ne permet de traiter la saturation que de façon approchée.

Les progrès des calculateurs ont permis d'envisager leur résolution numérique. Notant que cette méthode a historiquement été conçue pour déterminer le champ électromagnétique, et dans l'objectif de l'optimisation du dimensionnement.

## **Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis**

---

La méthode des éléments finis, grâce à sa fidélité au comportement électromagnétique de la machine, permet de simuler des dysfonctionnements réels en son sein avec une manifestation tout à fait localisée du défaut. Elle se caractérise essentiellement par:

- \* Prise en compte de la géométrie de la machine.
- \* Prise en compte de l'effet de peau dans les barres rotoriques.
- \* Tenir compte des non linéarités des propriétés physiques dans les matériaux magnétiques.

\* La méthode des éléments finis est capable d'examiner l'effet de saturation et les effets d'harmoniques de l'espace, cet avantage est très important particulièrement pour détecter les défauts en utilisant la technique d'analyse spectrale.

\* De point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en changeant simplement les données du programme de calcul d'où une grande souplesse d'utilisation.

Il s'avère donc que la méthode des éléments finis, en dépit de ses exigences en moyens et en temps de calculs très importants, reste la plus fidèle au comportement électromagnétique de la machine [38].

### **3.2.4 Les équations de Maxwell**

Les équations de Maxwell, aussi appelées équations de Maxwell-Lorentz, sont des lois fondamentales de la physique. Elles constituent l'hypothèse de base de l'électromagnétisme, avec l'expression de la force électromagnétique de Lorentz.

Les équations de Maxwell sont généralement liées de fait que les phénomènes électriques et magnétiques sont couplés. Ces équations sont la formulation mathématique complète qui commande tous les phénomènes électromagnétiques de tous systèmes.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

### *a Equation de Maxwell-Faraday*

Cette équation locale traduit le phénomène fondamental d'induction électromagnétique découvert par Faraday.

Un aimant permanent en rotation qui crée un champ magnétique en mouvement, génère un champ électrique dans un fil à proximité. Un champ électrique peut créer un champ magnétique. Ce champ créé est utilisé dans de nombreux générateurs électriques.

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Eq 3.1})$$

### *b Equation de Maxwell-Ampère*

Les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières: par la variation d'un champ électrique ou par les courants électriques.

Cette équation est récoltée du théorème d'Ampère. Sous forme locale, elle s'écrit en termes de vecteur densité de courant  $\vec{j}$

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Eq 3.2})$$

### *c Equation de Maxwell-Gauss*

Un champ électrique est généré par des charges électriques. Le champ électrique est orienté à partir des charges positives vers les charges négatives. Plus précisément, cette loi relie le flux électrique à travers n'importe quelle surface de Gauss fermée. [9]

Cette équation locale donne la divergence du champ électrique en fonction de la densité de la charge électrique.

$$\overrightarrow{\text{Div}} \vec{D} = \rho \quad (\text{Eq 3.3})$$

### *d Equation de conservation de flux magnétique*

Elle traduit le fait expérimental suivant : il n'existe pas de monopôle magnétique. Un monopôle magnétique serait une source ponctuelle de champ magnétique, analogue de la



## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

charge électrique ponctuelle pour le champ électrique. Or, l'objet de base source d'un champ magnétique est l'aimant, qui se comporte comme un dipôle magnétique : un aimant possède en effet un pôle nord et un pôle sud. L'expérience fondamentale consistant à tenter de couper un aimant en deux donne naissance à deux aimants, et non un pôle nord et un pôle sud séparément

Cette équation locale est au champ magnétique ce que l'équation de Maxwell-Gauss est au champ électrique,

$$\text{Div } \vec{\mathbf{B}} = 0 \quad (\text{Eq 3.4})$$

- $\vec{\mathbf{E}}$  ( $\text{V. m}^{-1}$ ) : Champ électrique ,
- $\vec{\mathbf{B}}$  (T) : Induction magnétique ,
- $\vec{\mathbf{H}}$  ( $\text{A. m}^{-1}$ ) : Champ magnétique,
- $\vec{\mathbf{j}}$  ( $\text{A. m}^{-2}$ ) : Densité de courant,
- $\vec{\mathbf{D}}$  ( $\text{C. m}^{-2}$ ) : Induction électrique,
- $\rho$  ( $\text{C. m}^{-3}$ ) : Charge volumique,
- $\frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t}$  ( $\text{A. m}^{-2}$ ) : Densité de courant de déplacement.

Ce sont des équations locales : elles établissent des relations entre des valeurs locales (ponctuelles) des grandeurs et de leurs dérivées. Ils s'appliquent quel que soit le milieu

Les grandeurs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$  et  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{j}$  et  $\mathbf{E}$  ne sont pas indépendantes entre elles car elles sont reliées par les lois de comportement des milieux, appelées aussi relations constitutives.

Ces lois, de comportement du milieu considéré, expriment la réponse de la matière aux champs électromagnétiques. Elles sont données par l'expérience et ne sont que des approximations.

Des relations supplémentaires s'ajoutent pour compléter les équations de Maxwell en fonction des données des milieux auxquels on les appliquera.

De telles relations sont appelées équations constitutives, qui dans le cas général s'écrivent sous la forme suivante :

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

### 3.2.5 Les lois de comportement de milieux

#### a Le cas du vide

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{Eq 3.5})$$

$\mu_0$  (H. m<sup>-1</sup>) : Perméabilité magnétique du vide.

$$\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$$

#### b Les milieux conducteurs : la loi d'ohm

Un conducteur d'électricité est un corps capable de laisser passer un courant électrique donc possède des charges électriques capables de se déplacer à l'échelle macroscopique

les charges électriques qui sont appelés électrons libres se mettent en mouvement, créant un courant électrique, quand un tel milieu est soumis à un champ électrique,

Dans les milieux homogènes, on admet :

$$\vec{j} = \delta \vec{E} \quad (\text{Eq 3.6})$$

Avec  $\delta$  ( $\Omega^{-1}m^{-1}$ ) : Conductivité électrique,

Un conducteur parfait est un milieu fictif tel que  $\delta \rightarrow \infty$ . Dans un tel conducteur,  $\vec{E}$  est nul. A l'inverse, un isolant parfait est un milieu dans lequel la conductivité électrique est nulle :  $\delta = 0$ .

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

---

### *c Comportement diélectrique des matériaux*

Le déplacement électrique s'exprime par

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{Eq 3.7})$$

Avec

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

$\epsilon$  (F. m<sup>-1</sup>) : Permittivité électrique absolue

$\epsilon_0$  (F. m<sup>-1</sup>) : Permittivité électrique du vide

$\epsilon_r$  : Permittivité électrique relative du milieu

### *d Comportement magnétique des matériaux*

Sous l'effet d'un champ magnétique, la matière s'aimante. Quel que soit le milieu, on écrit par définition :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{Eq 3.5})$$

Avec  $\vec{B}_r$  (T) : Induction rémanente des aimants,

$\mu$  (H.m<sup>-2</sup>) : Perméabilité magnétique,

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

### 3.2.6 Les modèles

#### a *Modèle magnétostatique*

La magnétostatique est l'étude du magnétisme dans les situations où le champ magnétique est indépendant du temps.

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide sans courants induits de la machine car il oblige de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. [39].

$$\text{Donc } \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

les équations du modèle deviennent :

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{E} = 0 \quad (\text{Eq 3.6})$$

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{Eq 3.7})$$

$$\text{Div} \vec{B} = 0 \quad (\text{Eq 3.8})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{Eq 3.9})$$

L'équation (Eq 3.8) permet de définir une fonction en vecteur potentiel A telle que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A} \quad (\text{Eq 3.10})$$

On fixe la valeur de la divergence pour que A soit totalement défini, et on ajoute alors la condition  $\text{div}(\vec{A}) = 0$  appelée jauge de Coulomb. Qui vérifie automatiquement la solution.

En remplaçant les équations (Eq3.10) et (Eq3.9) dans (Eq3.7) nous obtenons l'équation électromagnétique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\overrightarrow{\text{Rot}} (\mathbf{v} \cdot \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A}) = \vec{j} + \overrightarrow{\text{Rot}} (\mathbf{v} \cdot \vec{B}_r) \quad (\text{Eq 3.11})$$

Avec  $\mathbf{v} = \frac{1}{\mu}$  la relativité magnétique.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

### *b* Modèle magnétodynamique

Ce mode pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine et s'applique aux systèmes qui ont des sources de courant ou de la tension variant en fonction du temps, et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simuler en régime permanent. Ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables du courant efficace. [39].

Donc le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  n'est pas nul.

$$\overrightarrow{\text{Rot}}(\mathbf{v} \cdot \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A}) + j \omega \sigma \vec{A} = j \quad (\text{Eq 3.12})$$

Avec

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot F$  (rad.s<sup>-1</sup>) : pulsation électrique     $j$  ( $j^2 = -1$ ) : unité imaginaire

### *c* Modèle magnétique transitoire

Il est le plus complet. Il traduit fidèlement la rotation du moteur. Dans ce cas l'alimentation est en courant transitoire, le traitement du système précédent des équations caractéristiques, nécessite une discrétisation pas à pas dans le temps [39].

Donc le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{\text{Rot}}(\mathbf{v} \cdot \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{B}_r + \sigma \overrightarrow{\text{Grad}} V = 0 \quad (\text{Eq 3.13})$$

## 3.3 Simulation de la machine asynchrone en flux 2D

### 3.3.1 Les paramètres de la machine

Pour simuler une machine électrique sur un logiciel de conception il faut avoir ses paramètres spécifiques et ses caractéristiques.

La machine simulée est sous les paramètres suivants :

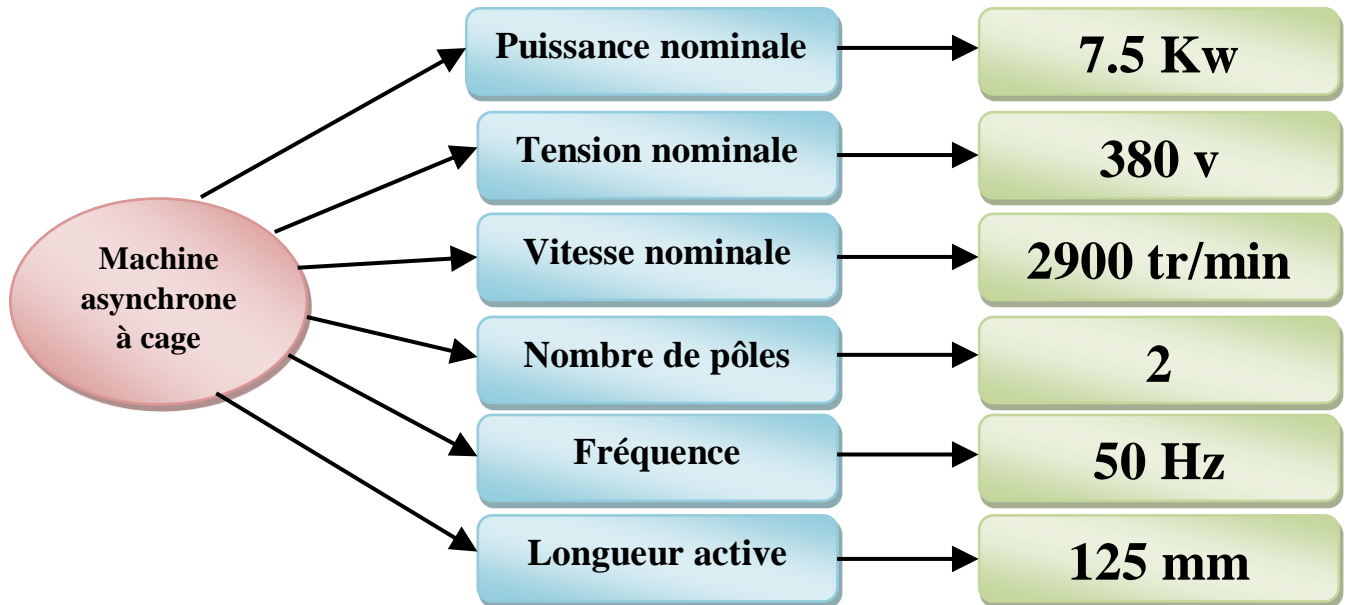


Figure 3.2. Caractéristiques de la machine asynchrone

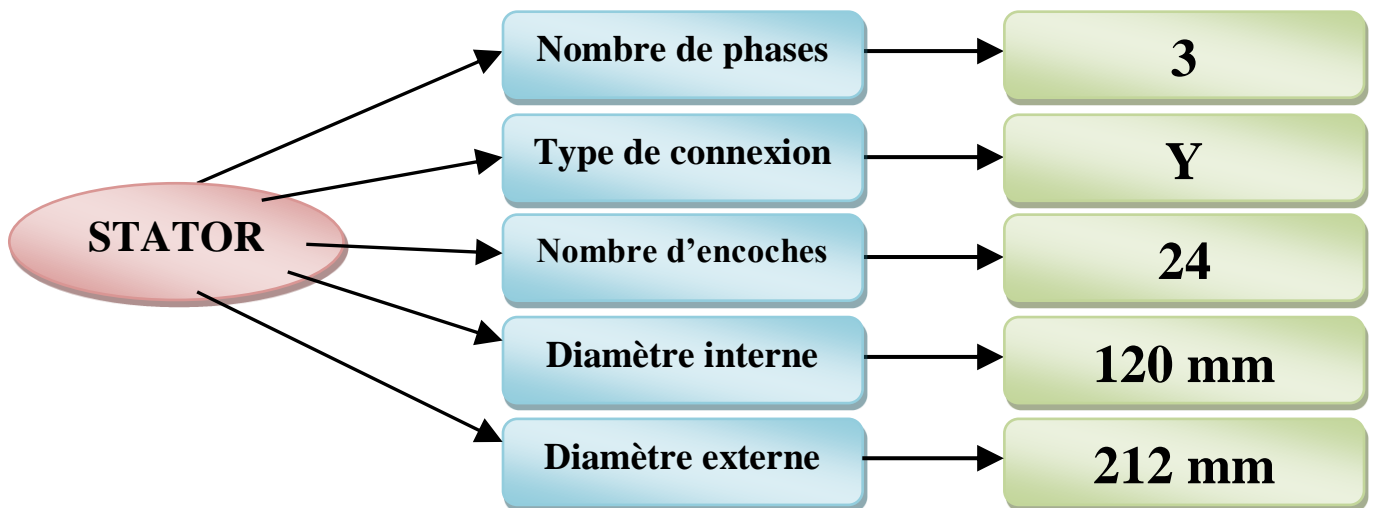


Figure 3.3. Caractéristiques statoriques de la machine asynchrone

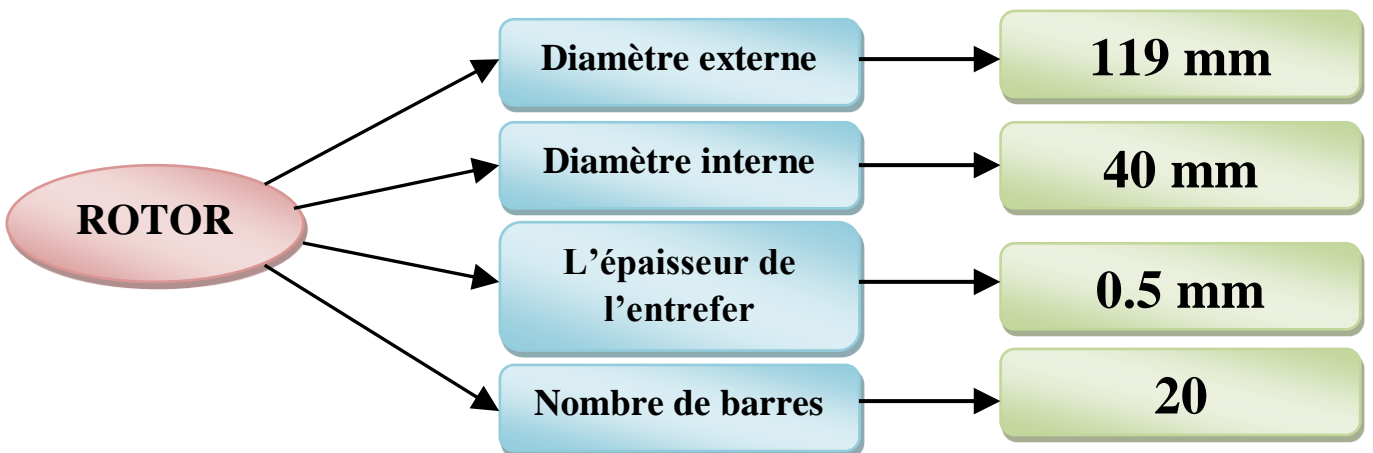


Figure 3.4. Caractéristiques rotoriques de la machine asynchrone

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

### 3.3.2 la géométrie de la machine asynchrone

Dans cette figure on représente la géométrie de la machine asynchrone

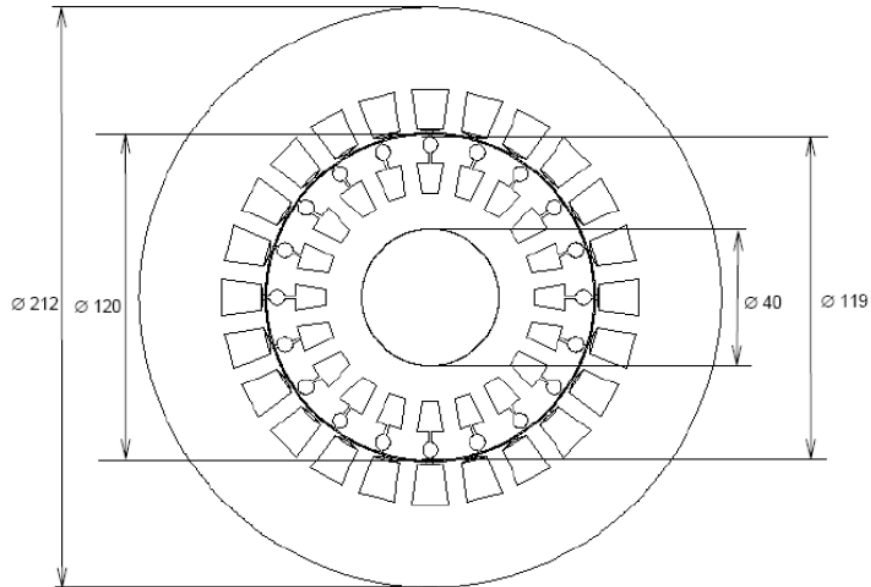


Figure 3.5. La géométrie de la machine asynchrone

La forme et les dimensions des encoches de stator et de rotor sont montrées sur la Figure 3.6.

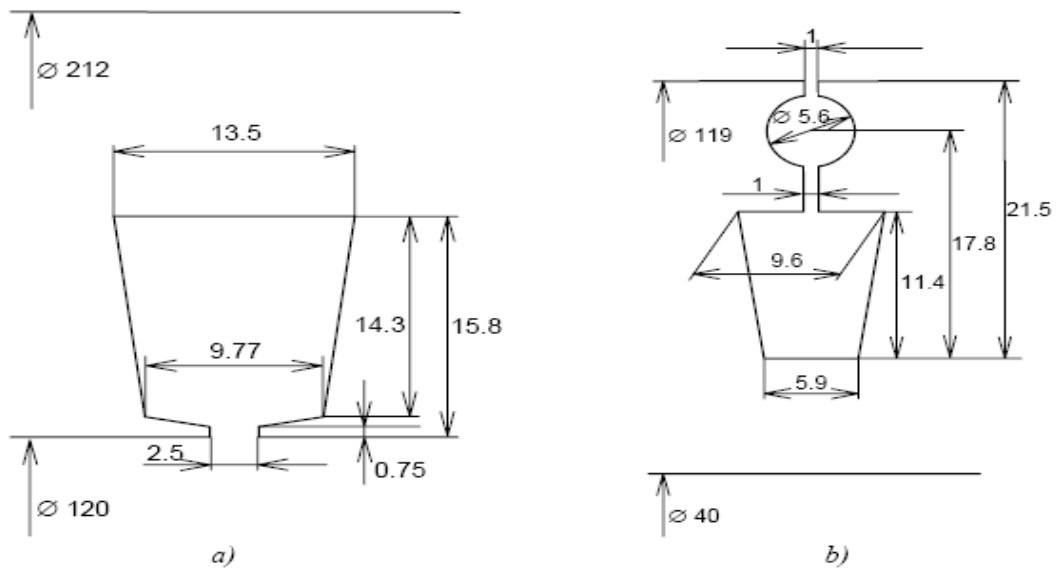
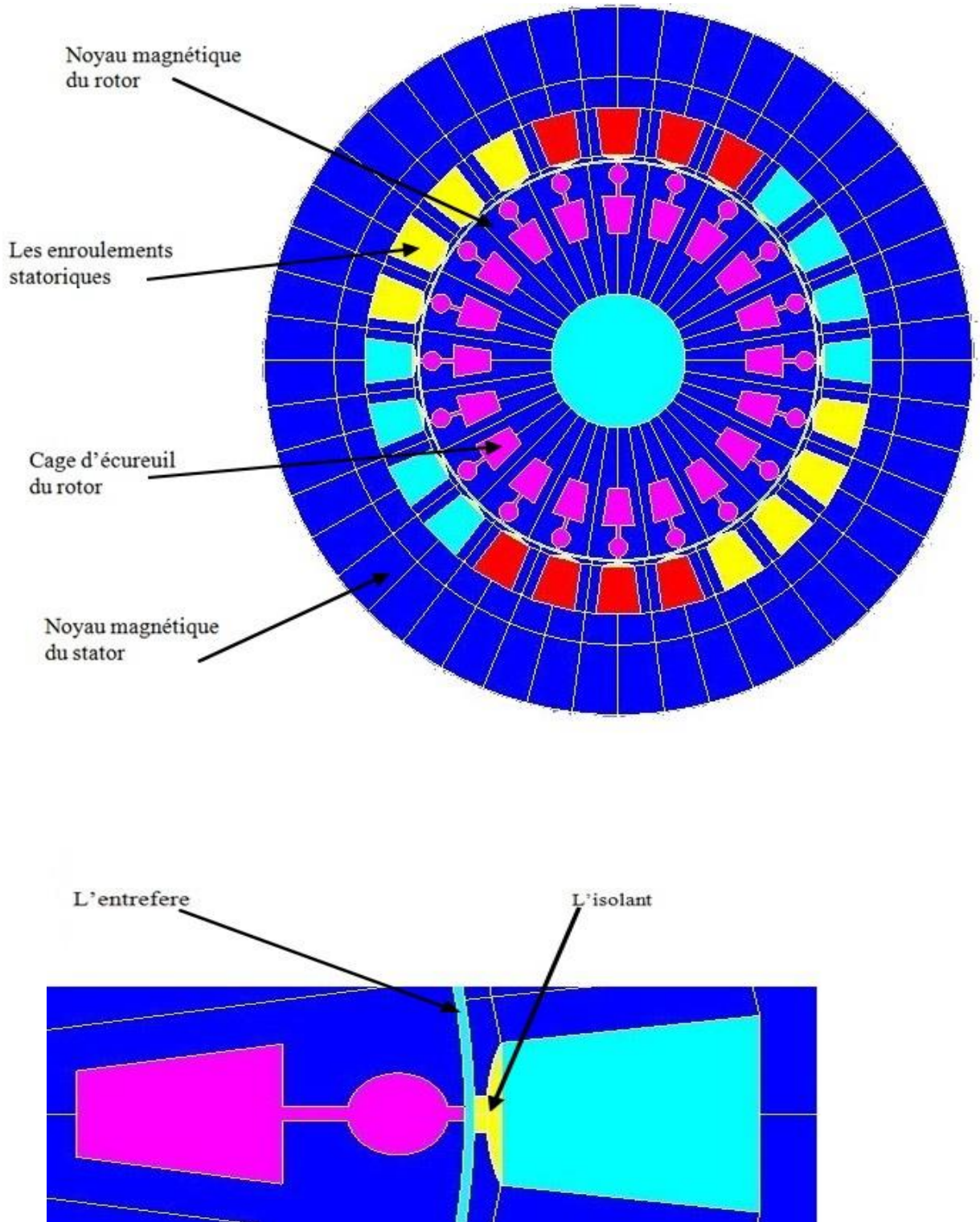


Figure 3.6. Dimension des encoches, a) l'encoche statorique, b) l'encoche rotorique.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

### 3.3.3 Domaine de calcul du champ électromagnétique

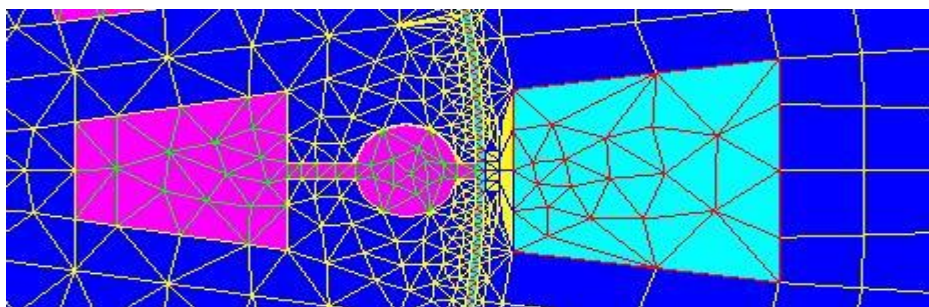
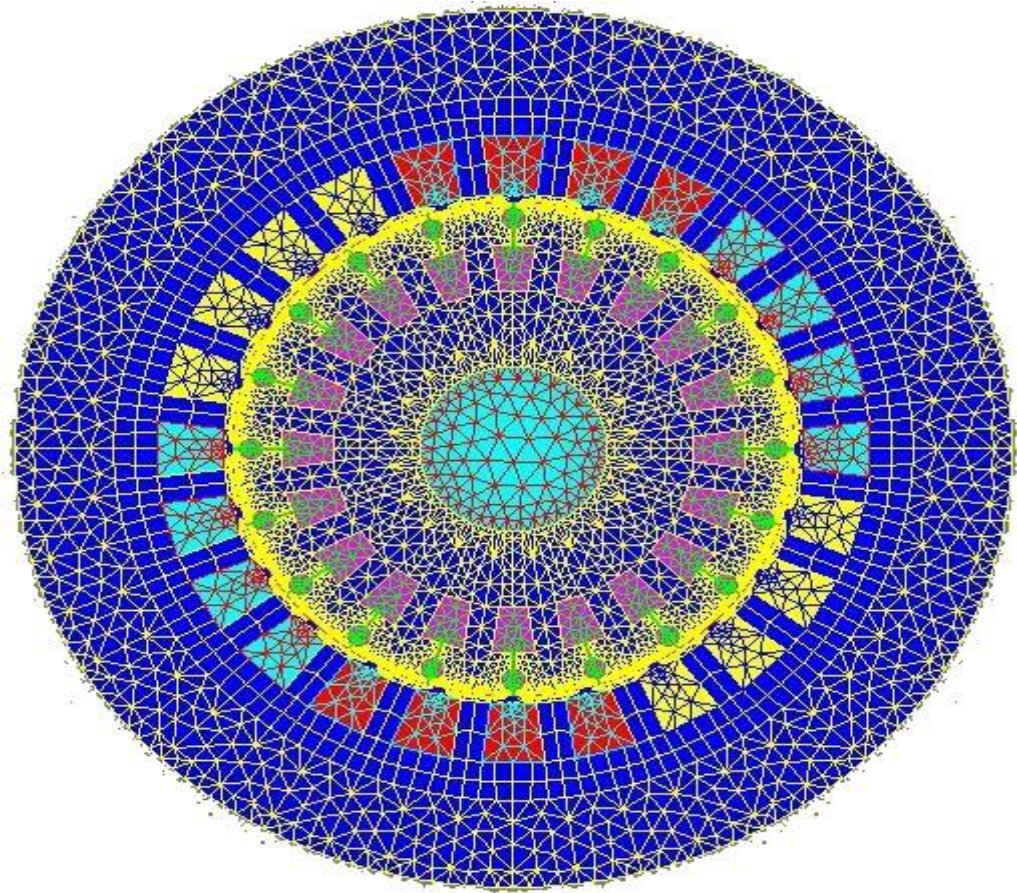
On représente le domaine de calcul du champ électromagnétique dans la machine



**Figure 3.7.** Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.



### 3.3.4 Le Maillage



**Figure 3.8.** Maillage

Le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger les temps de calcul sans perte sensible d'information. Par contre le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique.

La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

### 3.3.5 Matériaux conducteurs

Au niveau de stator on suppose que les conducteurs se repartissent uniformément dans les encoches, on affecte à cette partie e nombre de spires par encoche, le foisonnement et la résistivité du cuivre pour une température donnée des enroulements.

### 3.3.6 Matériaux magnétiques

On représente les caractéristiques B(H) des propriétés magnétiques des matériaux ferreux

H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]
0	0	2000	1.61	7000	1.83	40000	2.14
300	0.66	3000	1.69	8000	1.85	50000	2.16
500	1.09	4000	1.73	10000	1.89	60000	2.18
1000	1.45	5000	1.76	20000	2.04	70000	2.192
1500	1.56	6000	1.79	30000	2.11	-	-

Tableau 3.1. B(H) du matériau magnétique STEEL\_NLIN.

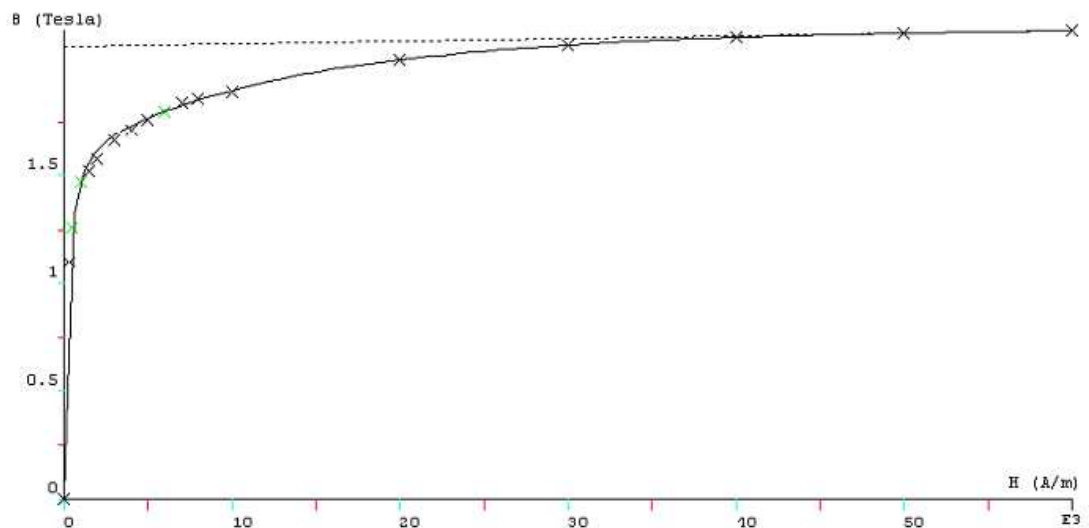


Figure 3.9. Caractéristiques B(H) du matériau magnétique.



## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

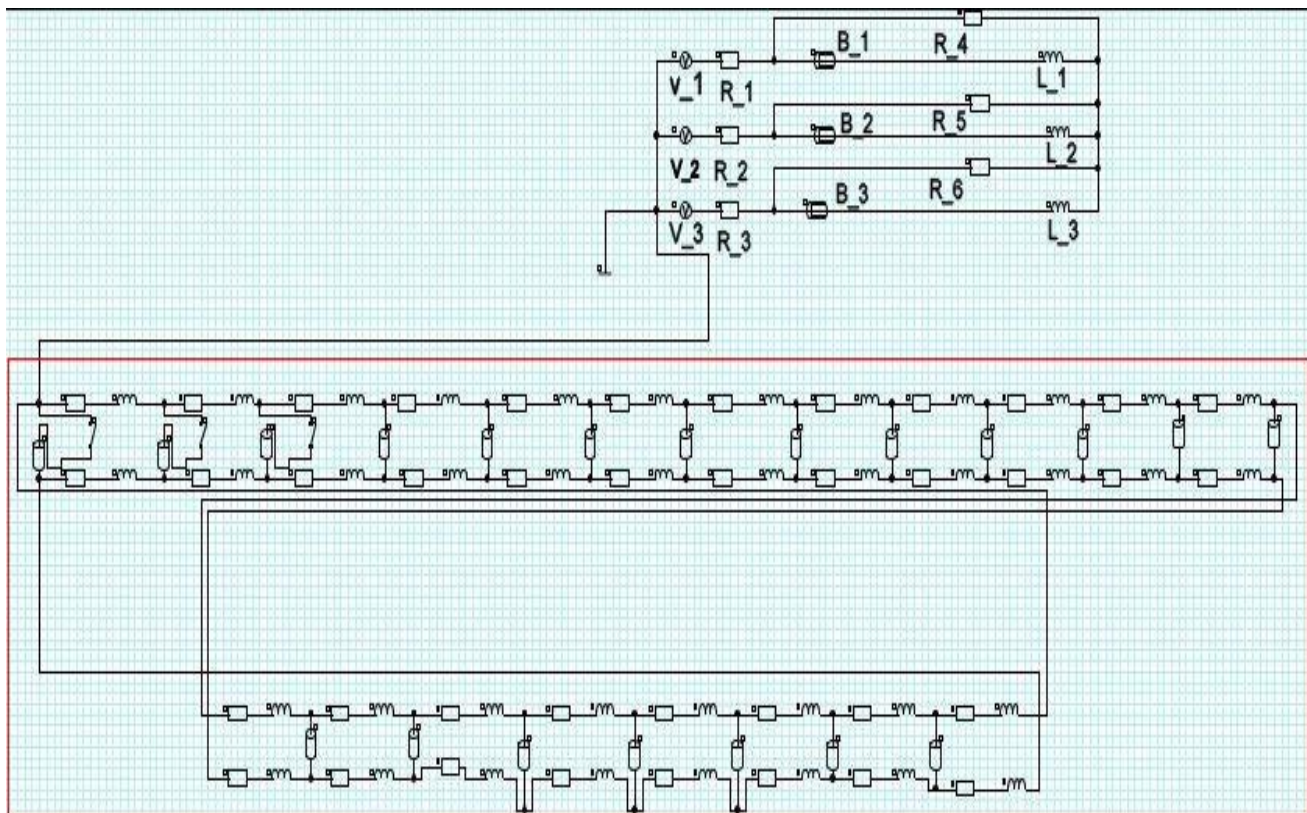
### 3.3.7 Couplage de circuit

Pour concevoir le moteur de manière correct il faut bien vérifier les effets d'extrémités qui sont :

- L'inductance
- La résistance de tête de bobine
- La résistance d'anneau de court circuit

➤ Le circuit électrique du moteur représentant :

- Les sources de tension d'alimentation  $V_1$   $V_2$   $V_3$
- Les bobinages statoriques  $B_1$   $B_2$   $B_3$
- Les Inductances de fuite,  $L_1$   $L_2$   $L_3$
- Les résistances de chute de tension dans le réseaux  $R_1$   $R_2$   $R_3$
- Les résistance des voltmeters pour mesures les tensions  $R_1$   $R_2$   $R_3$



**Figure 3.10.** Circuit électrique de moteur lié à la géométrie.

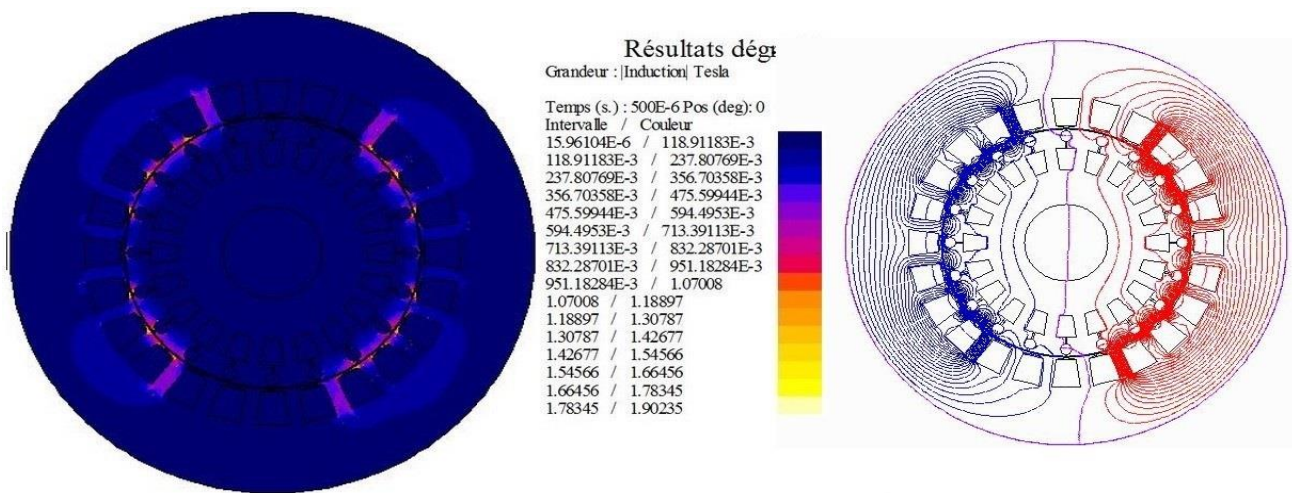
Le circuit encadré en rouge est le circuit qui représente le rotor qui est composé de 20 conducteurs massifs qui représentent les barres rotoriques et des résistances et des inductances qui représentent l'anneau de court circuit entre chaque 2 barres.

## 3.4 Résultats de simulation du moteur asynchrone :

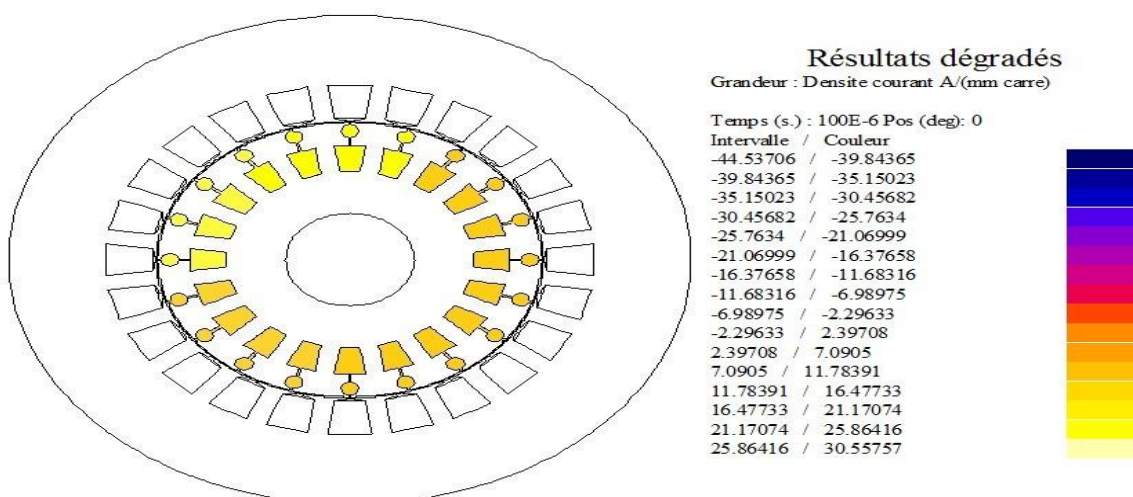
### 3.4.1 Fonctionnement à vide à l'état sain

A vide, sous la tension nominale de 380 V, nous avons présenté dans cette partie, l'évolution des grandeurs locales qui sont les lignes de champ magnétique et l'induction magnétique aussi, les courants statoriques et rotoriques, le couple électromagnétique et la vitesse.

Les résultats de simulation ci-dessous représentent : la répartition des lignes du champ magnétique et l'induction dans le circuit magnétique



**Figure 3.11.** Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique à vide

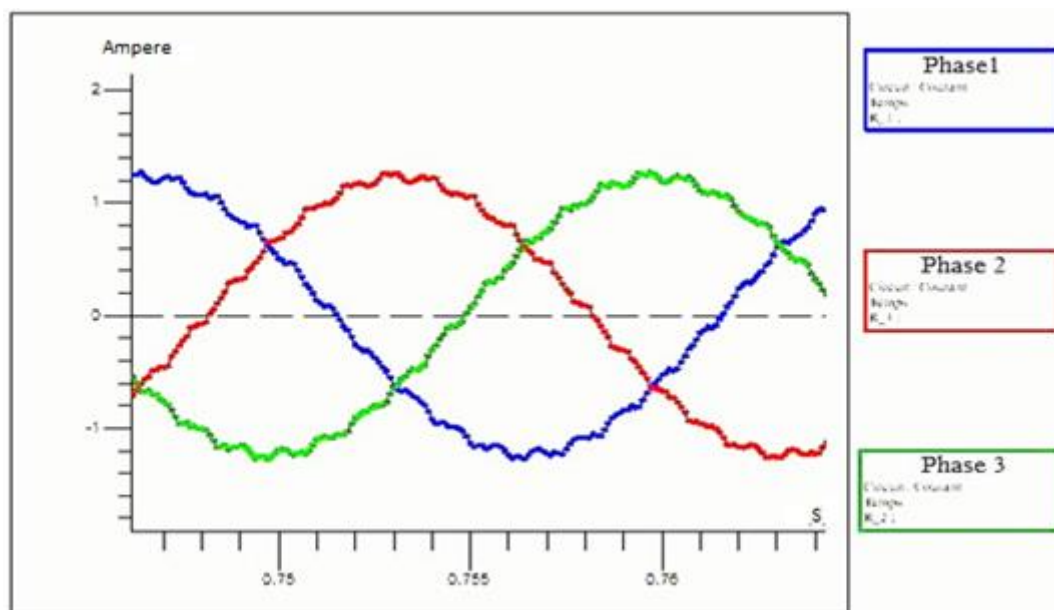
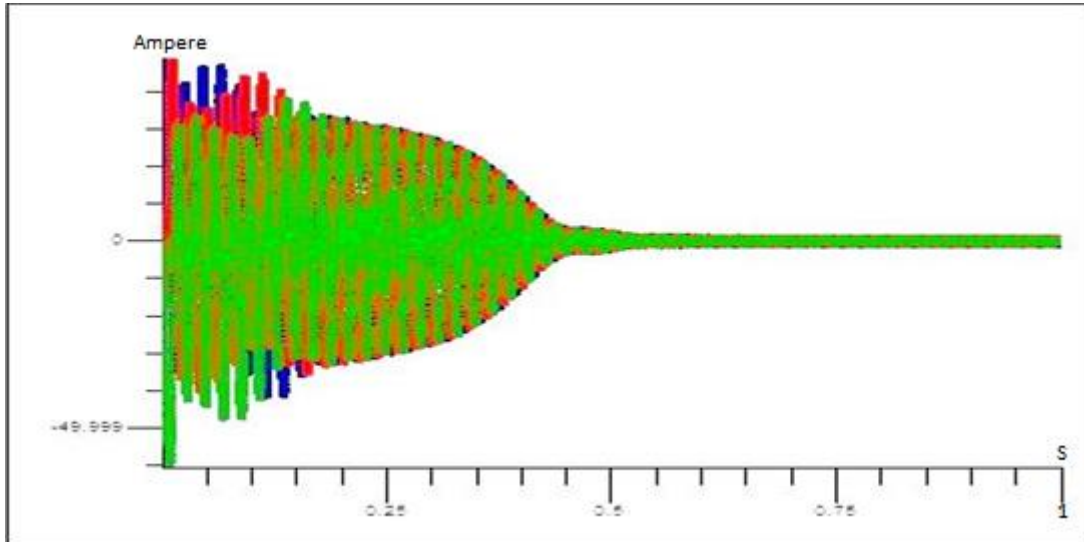


**Figure 3.12.** Densité du courant dans les barres rotoriques à vide

La densité de courant à l'état sain se répartie uniformément sur les barres rotoriques avec une grande valeur au démarrage.

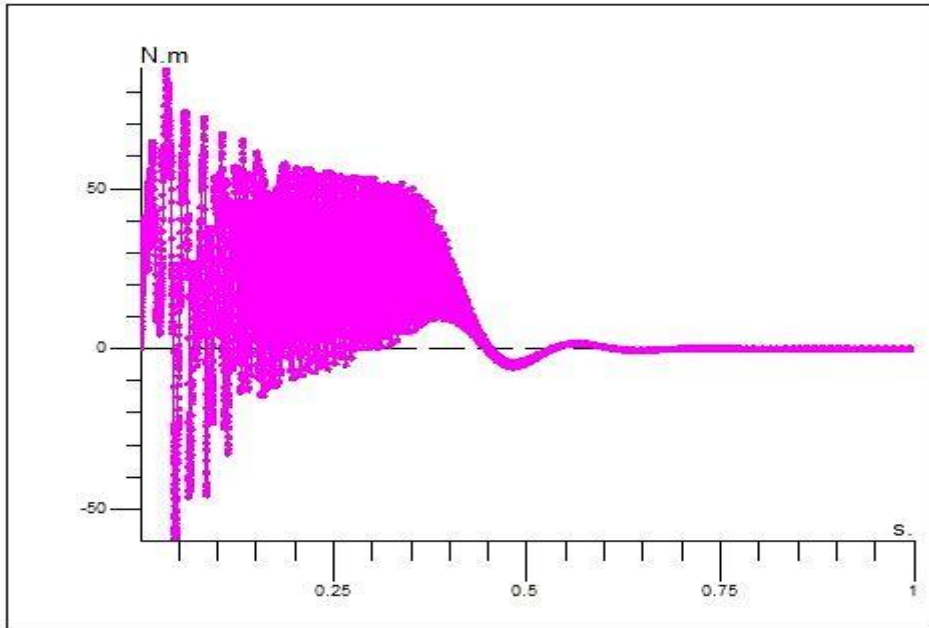
## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

La **Figure 3.12**. Représente respectivement la densité de courant dans les barres de rotor lors de l'essai à vide,



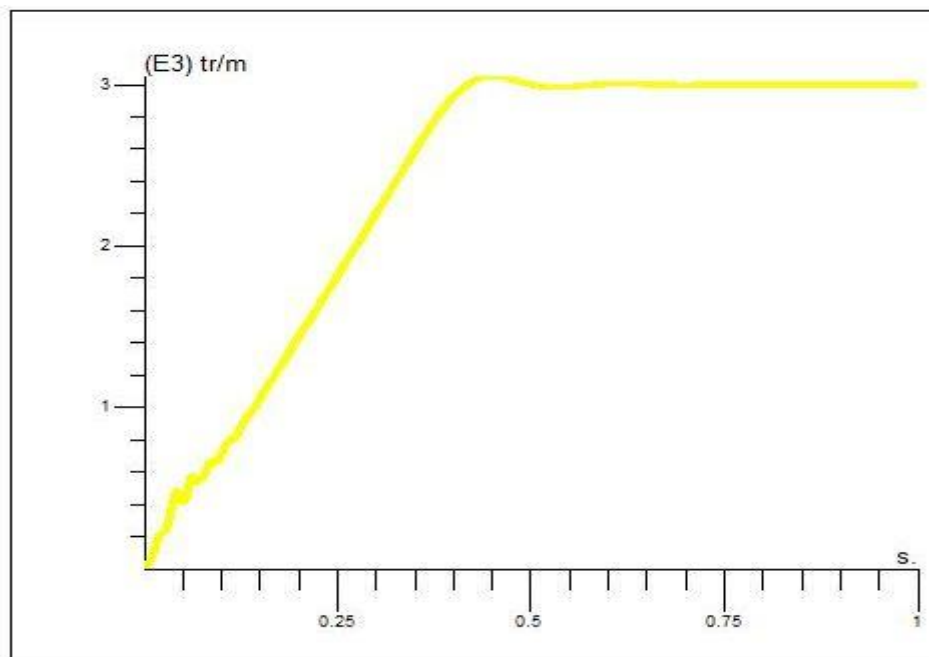
**Figure 3.13.** Courants statoriques à vide.

Après le régime transitoire, la machine atteint le régime permanent à  $t=0.6$  s, et les courants au stator se stabilisent avec une valeur maximale de **1.3A** et les trois courants sont bien déphasés entre eux de **120°**.



**Figure 3.14.** Couple électromagnétique à vide.

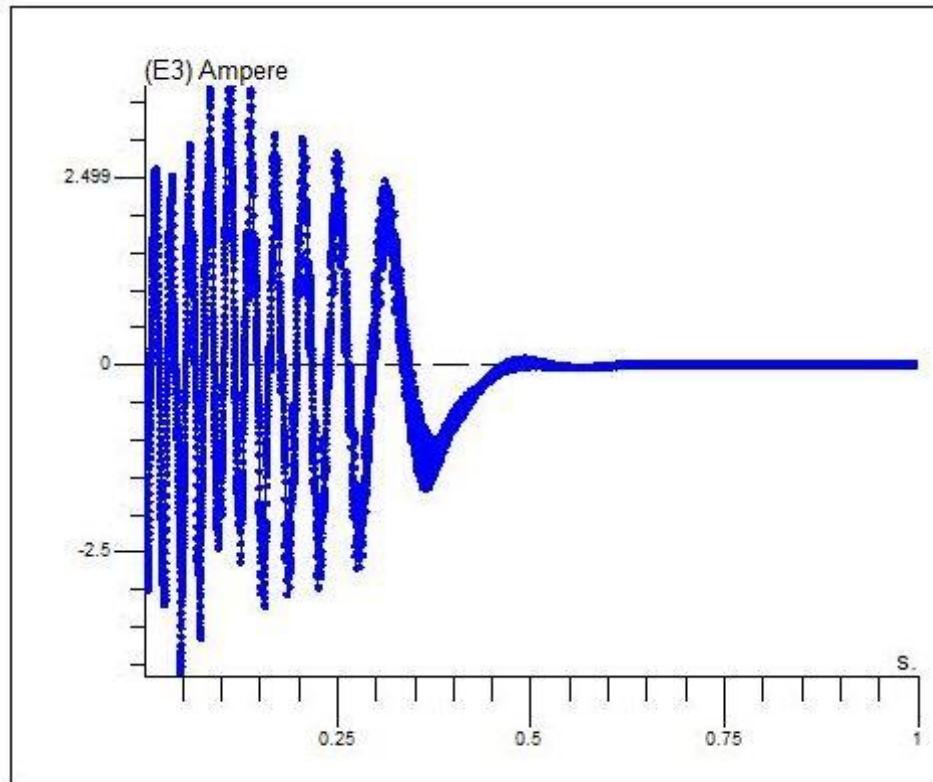
Le couple électromagnétique, est pratiquement nul en régime permanent.



**Figure 3.15.** Vitesse de rotation à vide.

La vitesse de rotation à vide se stabilise à **2970tr/min** après des petites oscillations en régime transitoire.





**Figure 3.16.** Courant rotorique dans une barre à vide

Les courants à vide au niveau des barres rotoriques atteignent une valeur maximale de 90 A en régime permanent.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

### 3.4.2 Fonctionnement en charge a l'état sain

On applique un couple résistant  $C_r = 6 \text{ N.m}$  et sous la même tension (380v), on représente le même graphe des caractéristiques de la machine que l'essai à vide

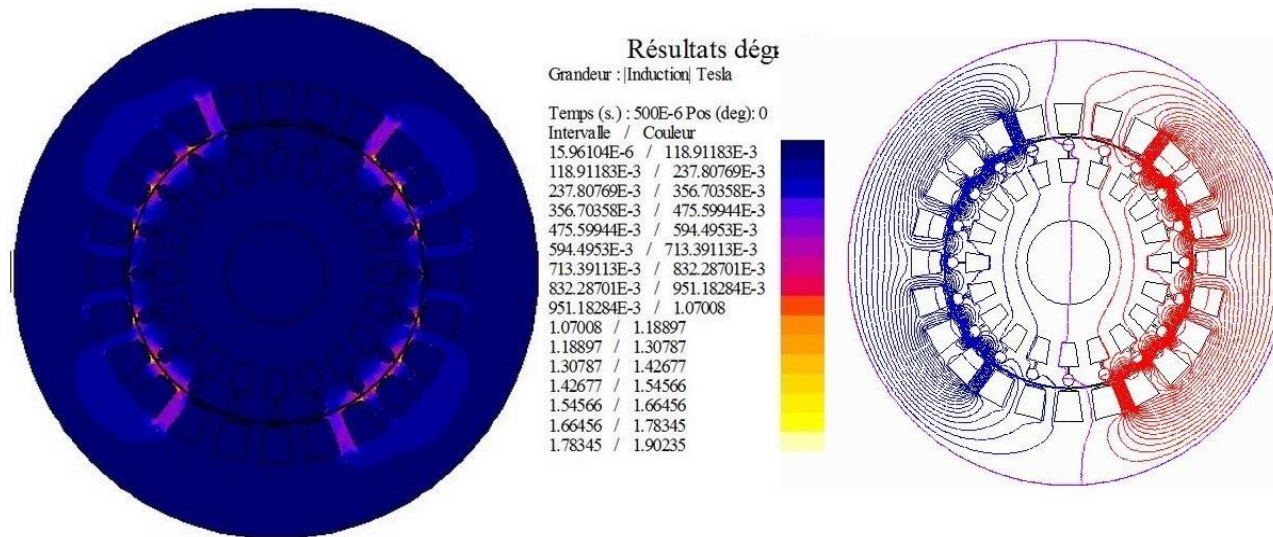


Figure 3.17. Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique en charge

Les lignes du champ dans le cas sain en charge sont réparties uniformément et représentent les deux pôles de la machine.

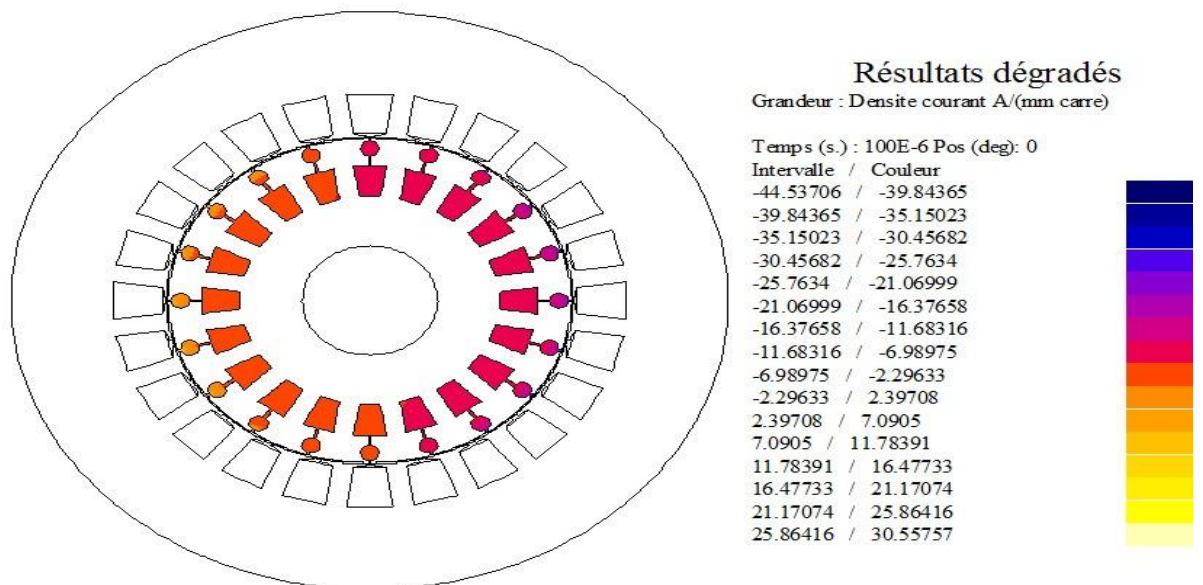
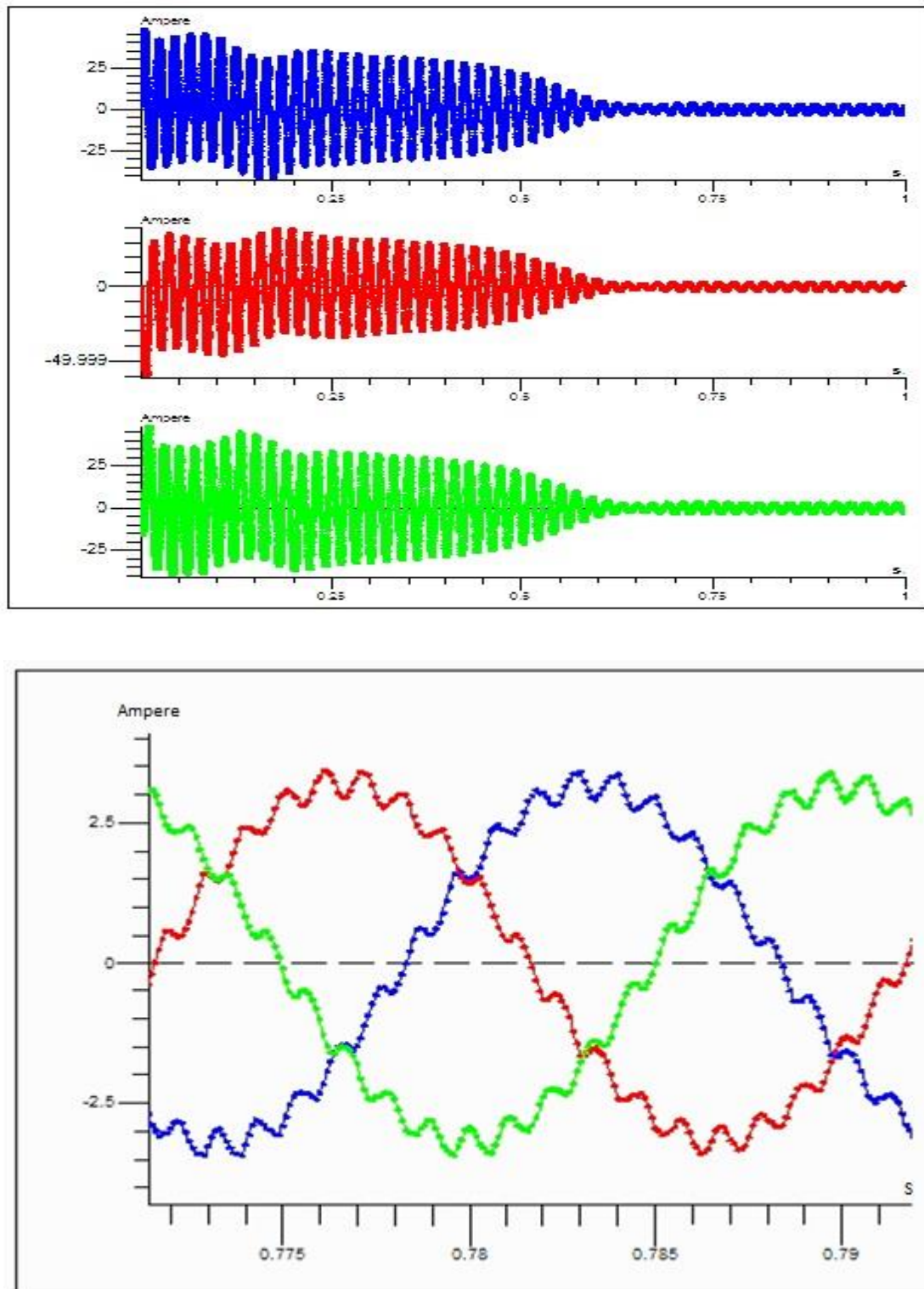


Figure 3.18. Densité de courant dans les barres rotoriques en charge

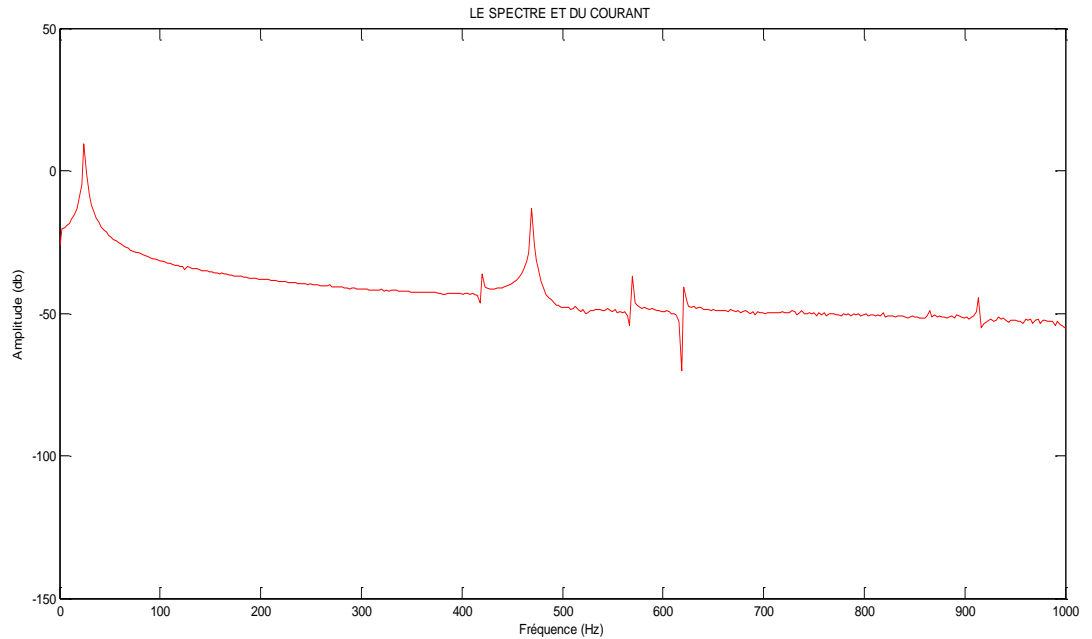




*Figure 3.19.* Courants statoriques en charge.

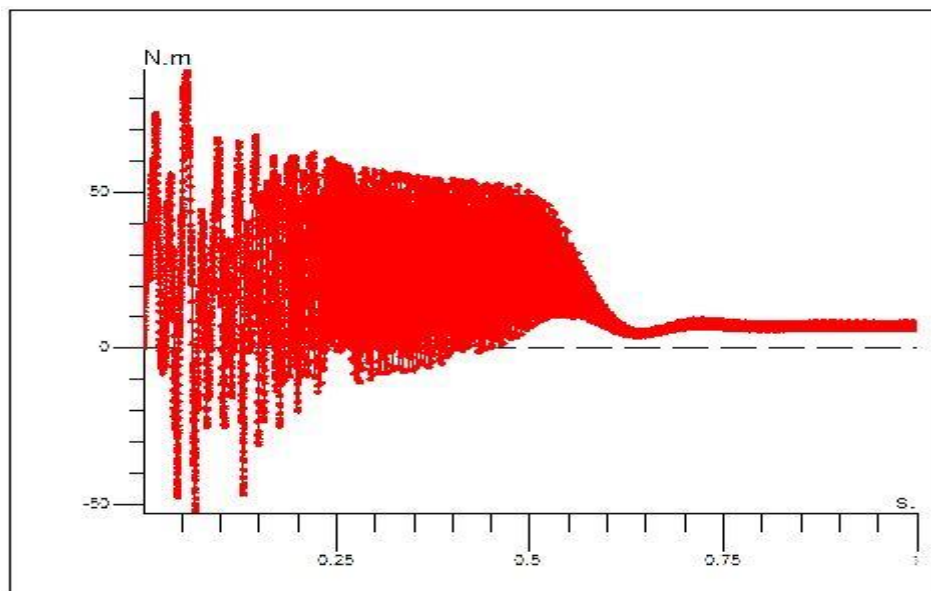
Les courants statoriques en charge ont dépassé une valeur maximale de **3.2 A** en régime permanent.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis



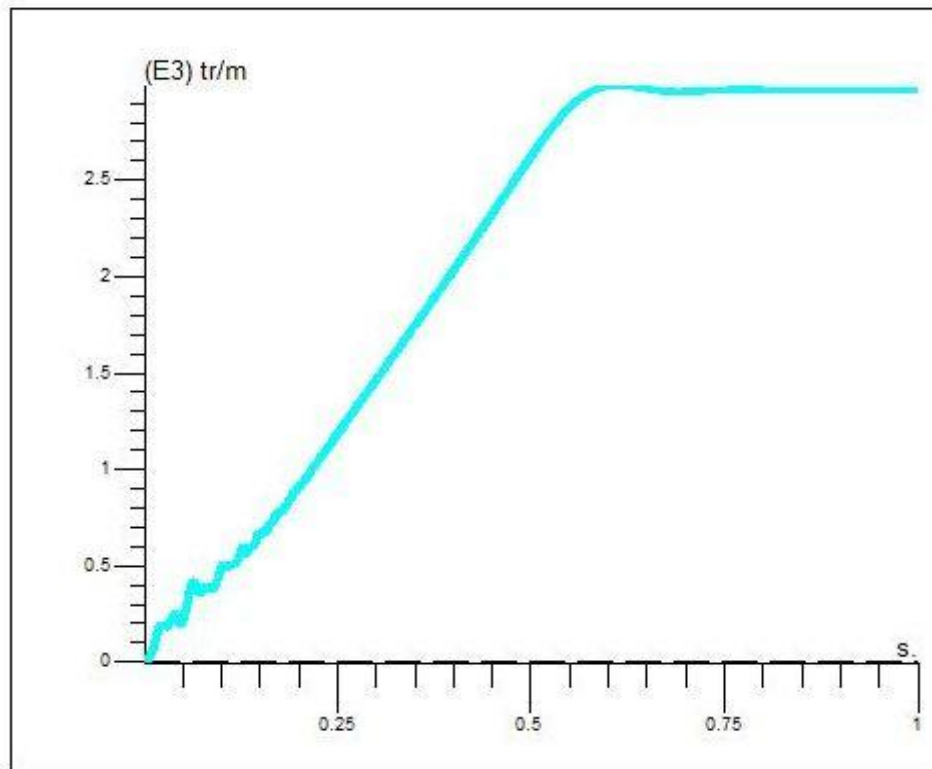
**Figure 3.20.** Les harmoniques des courants statoriques en charge

Au niveau des harmoniques on ne voit que la composante fondamentale sans la présence des interharmoniques .



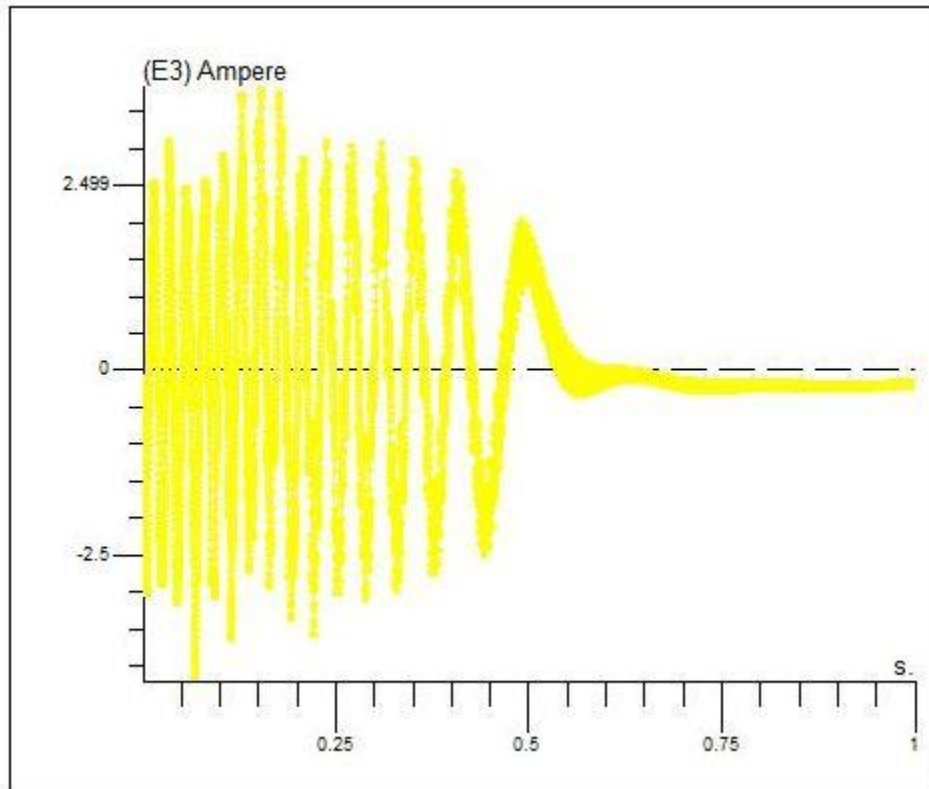
**Figure 3.21.** Couple électromagnétique en charge.

Le couple électromagnétique prend un peu plus de temps au régime transitoire pour atteindre le régime permanent et il se stabilise à une valeur entre **6** et **8 Nm** à cause du couple résistant.

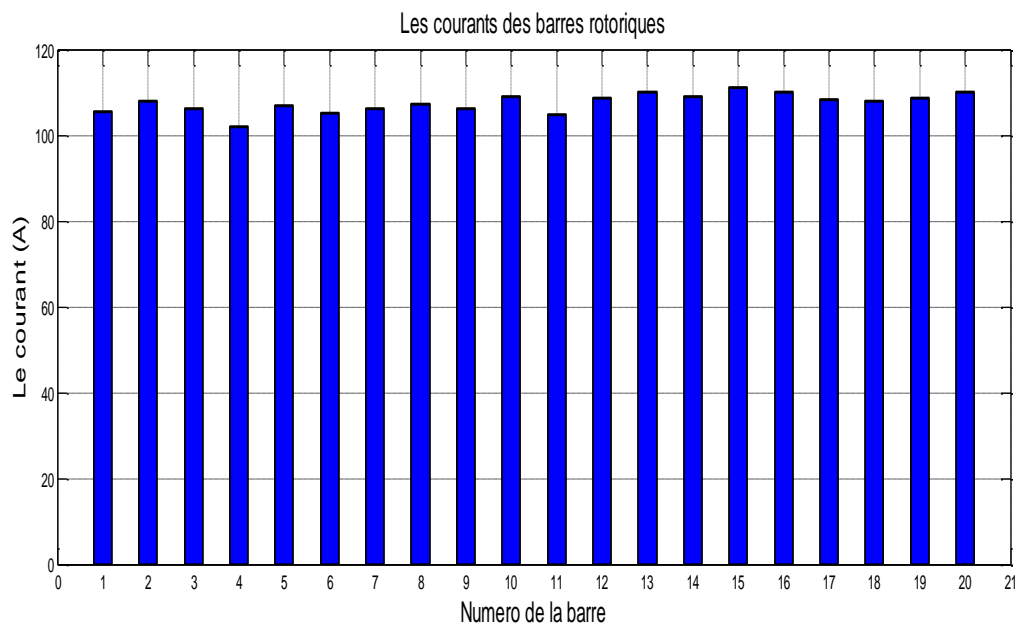


**Figure 3.22.** Vitesse de rotation en charge

La vitesse se stabilise à une valeur inferieur à la valeur en essai a vide et elle atteint **2950 tr/min.**



**Figure 3.23.** Courant rotorique d'une barre en charge



**Figure 3.24.** Les valeurs des Courants des barres rotoriques a l'état sain en charge

Les courants en charge au niveau des barres rotoriques atteignent des valeurs importantes au régime transitoire et prennent des valeurs un peu plus supérieures que les courants rotoriques à vide au régime permanent.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

### 3.4.3 Fonctionnement en charge avec une barre cassée

Avec une tension de (380v) et un couple résistant  $C_r = 6 \text{ N.m}$  on impose un défaut de cassure d'une barre et on visualise les résultats et les graphes

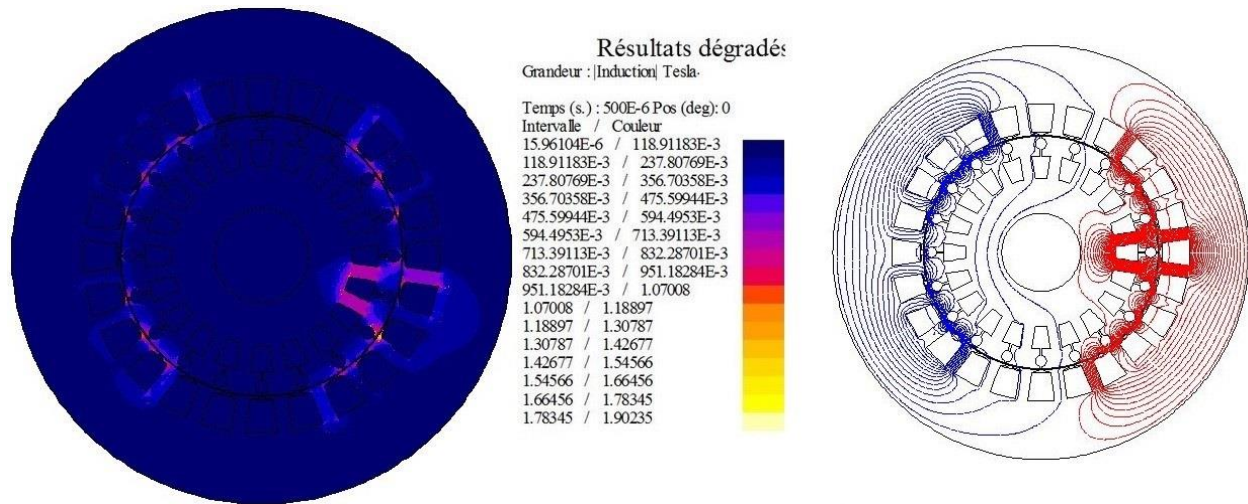


Figure 3.25. Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique avec (IBC)

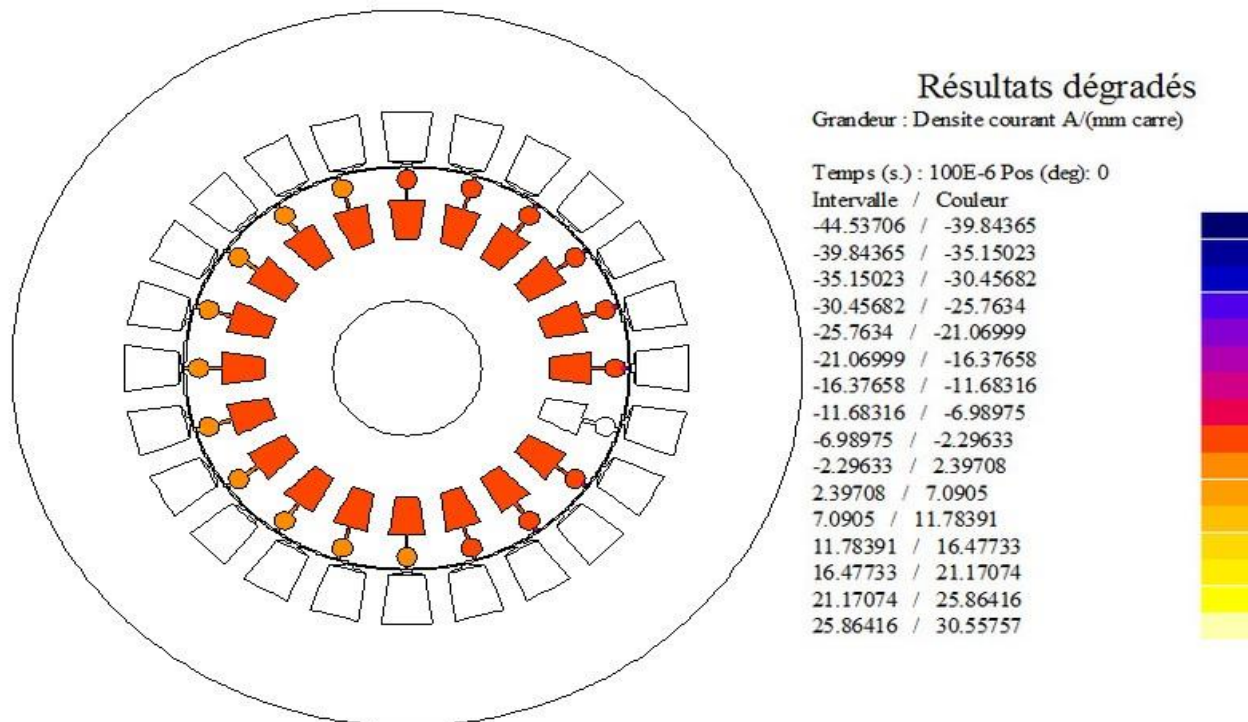
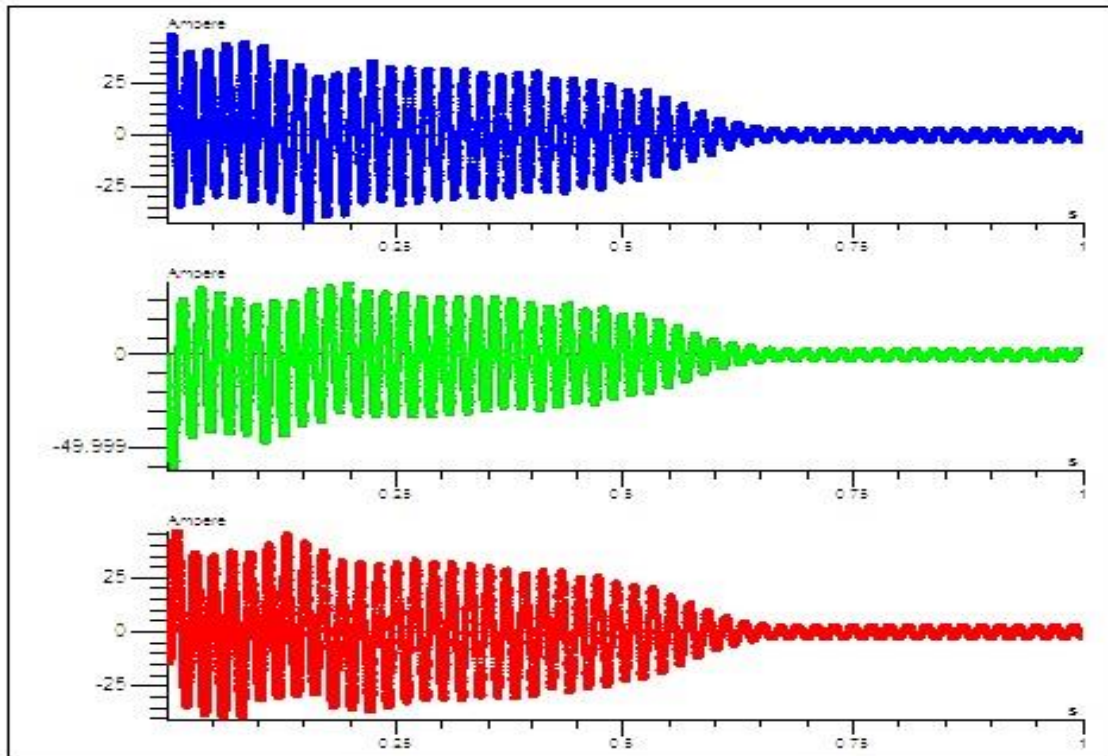


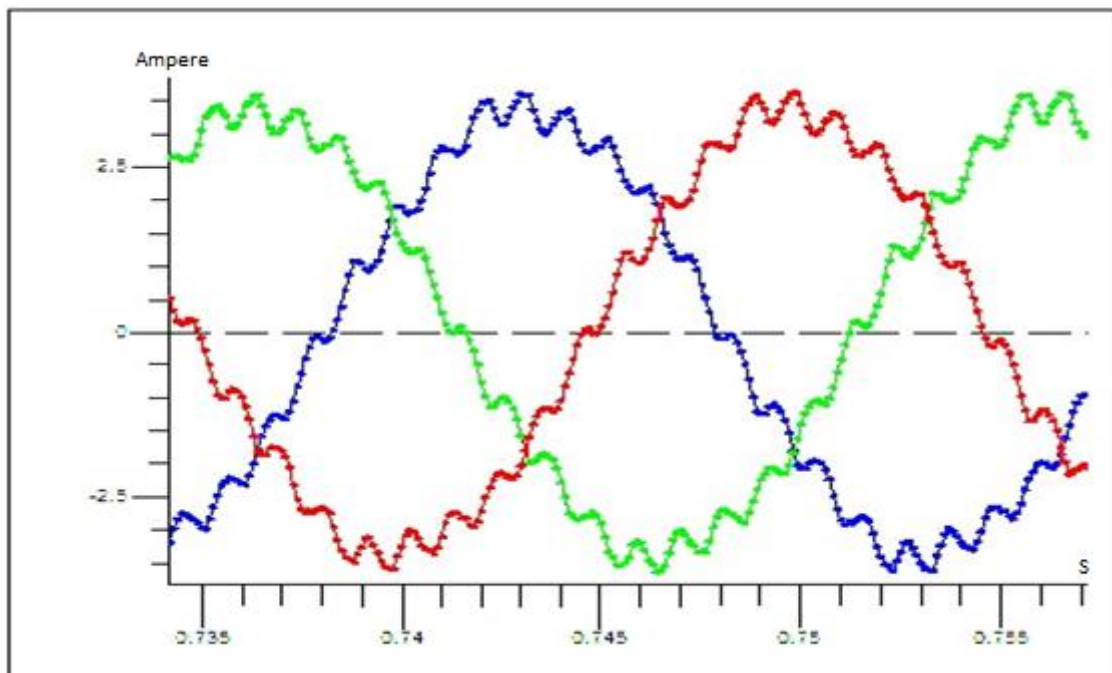
Figure 3.26. Densité de courant dans les barres rotoriques avec (IBC)

Les lignes du champ font apparaitre l'effet du défaut de cassure de la première barre car elles sont mal réparties et elles sont regroupées au voisinage de la barre cassée.



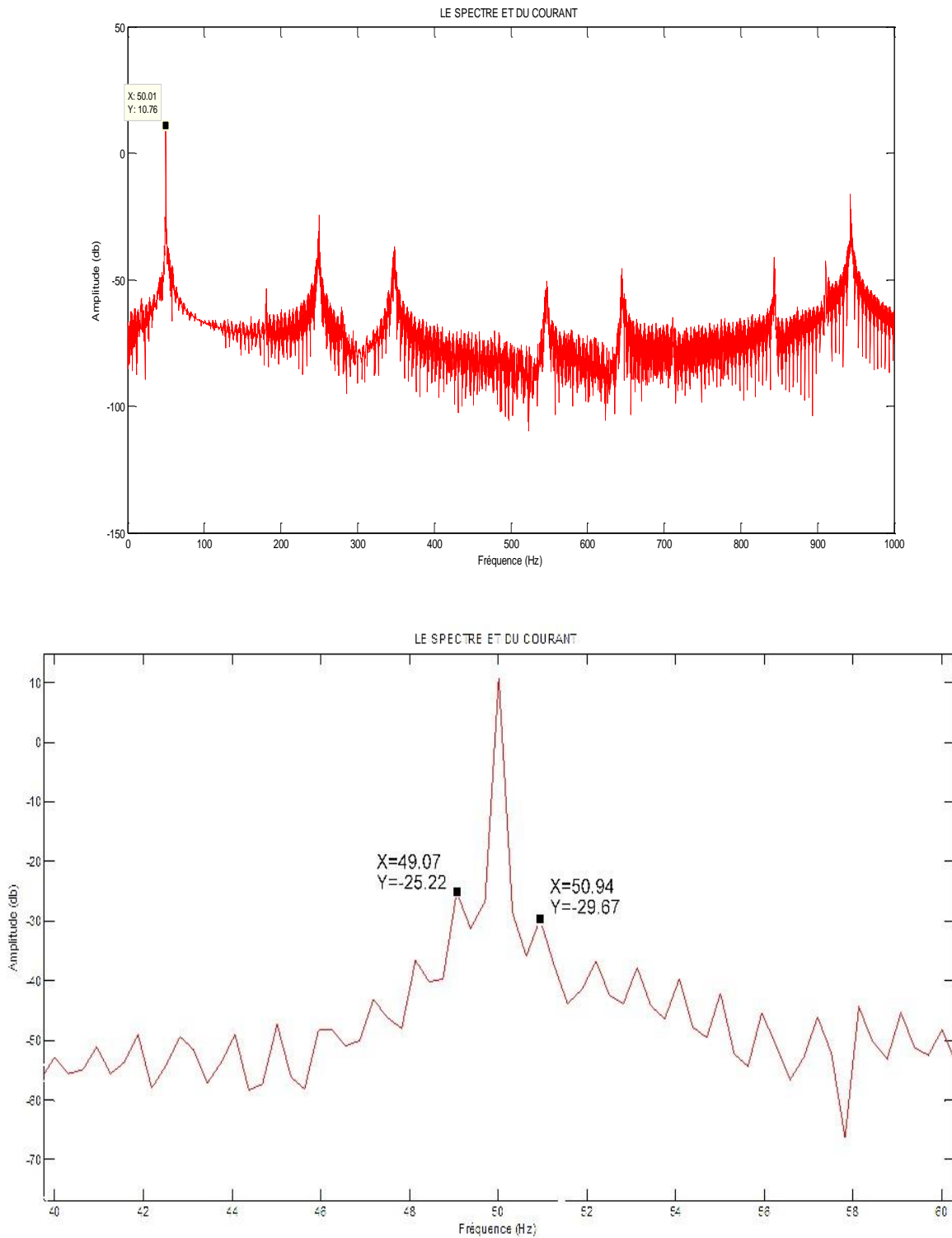


**Figure 3.27.** Les courants statoriques en charge avec une barre cassée (1BC)



On remarque une petite perturbation au niveau des courants statoriques en charge par rapport au courants statoriques en charge à l'état sain.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis



**Figure 3.28.** Spectre d'harmonique en charge avec une barre cassée (1BC)

Pour les harmoniques on remarque l'apparition des nouvelles harmoniques au voisinage de la fondamentale de l'ordre  $(1 \pm 2g)fs$  qui sont des interharmoniques spécifiques au défaut de cassure des barres rotoriques.

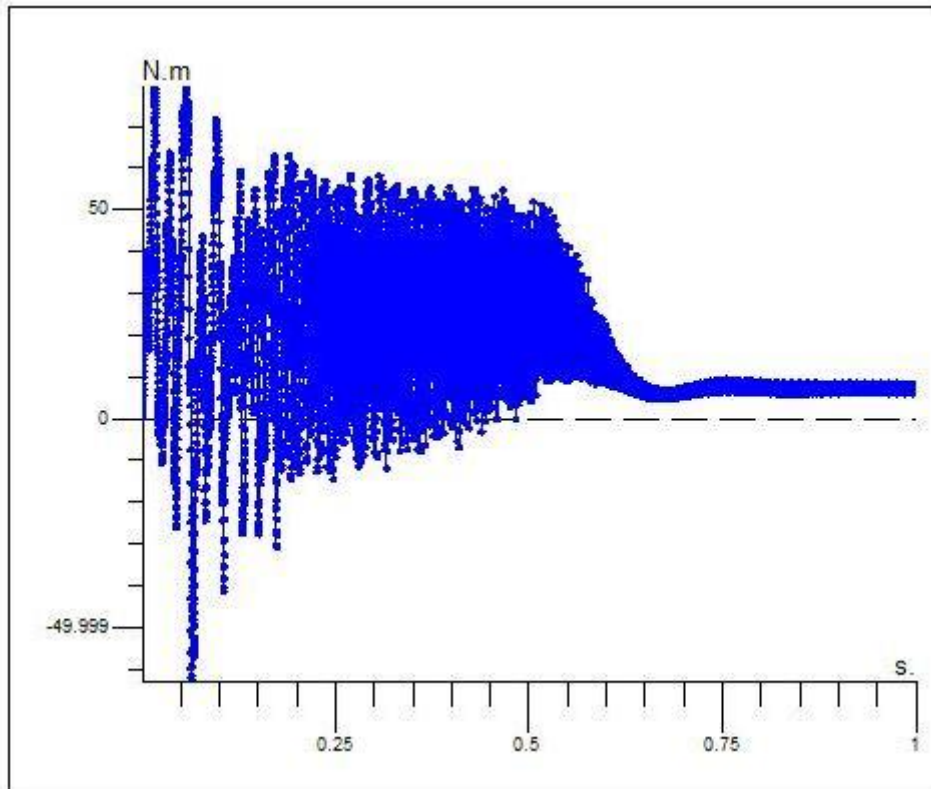


Figure 3.29. Couple électromagnétiques en charge (1BC).

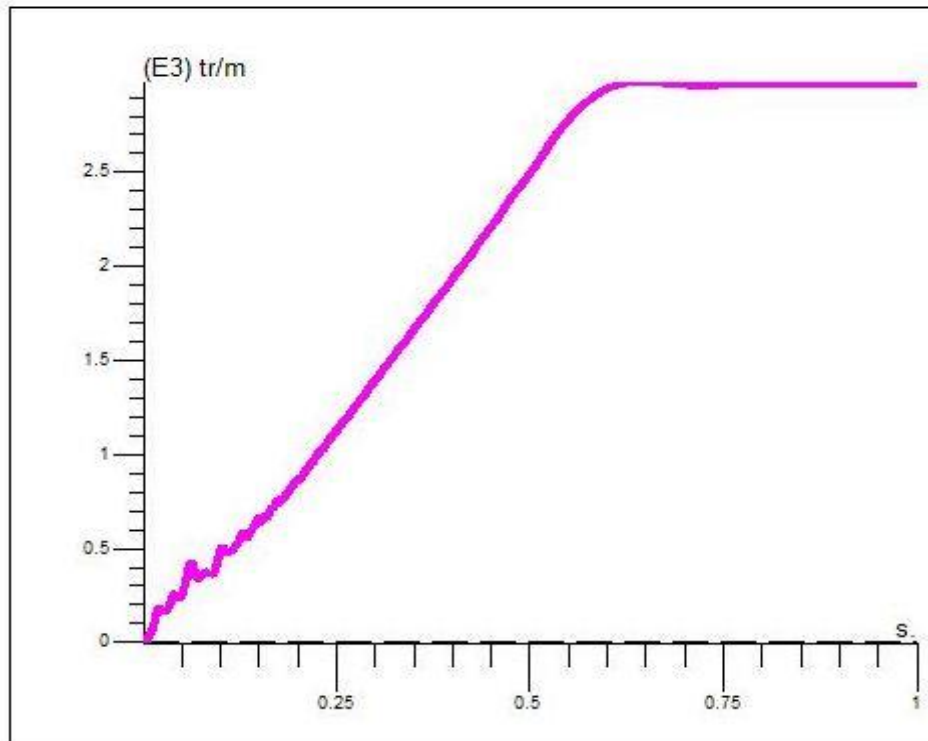
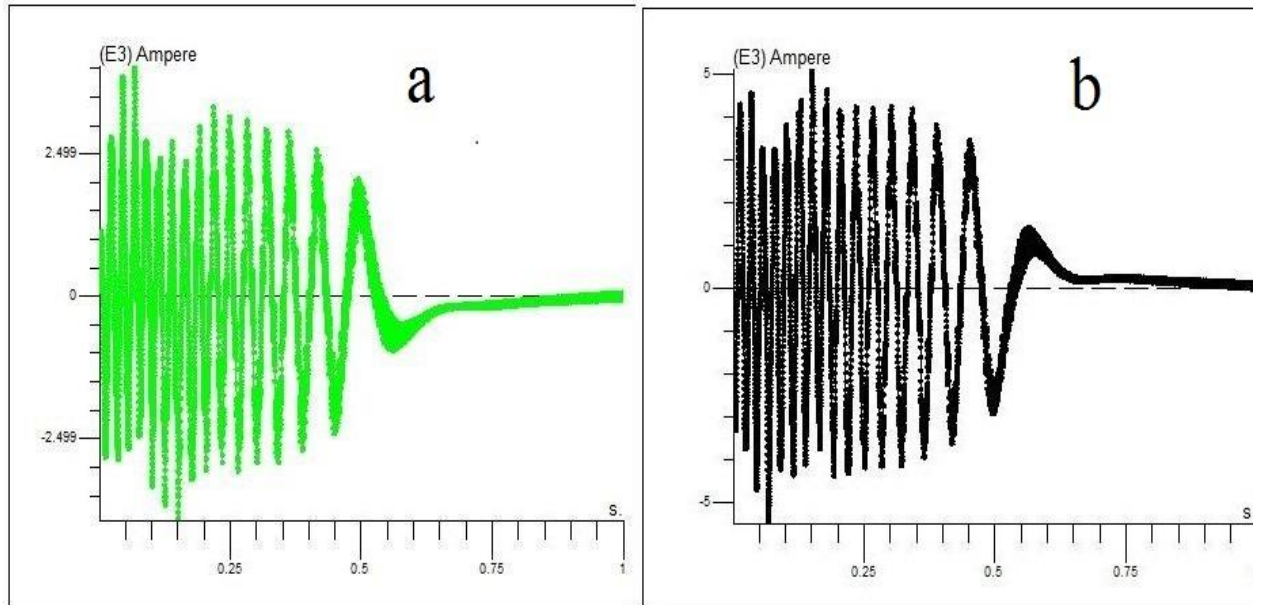


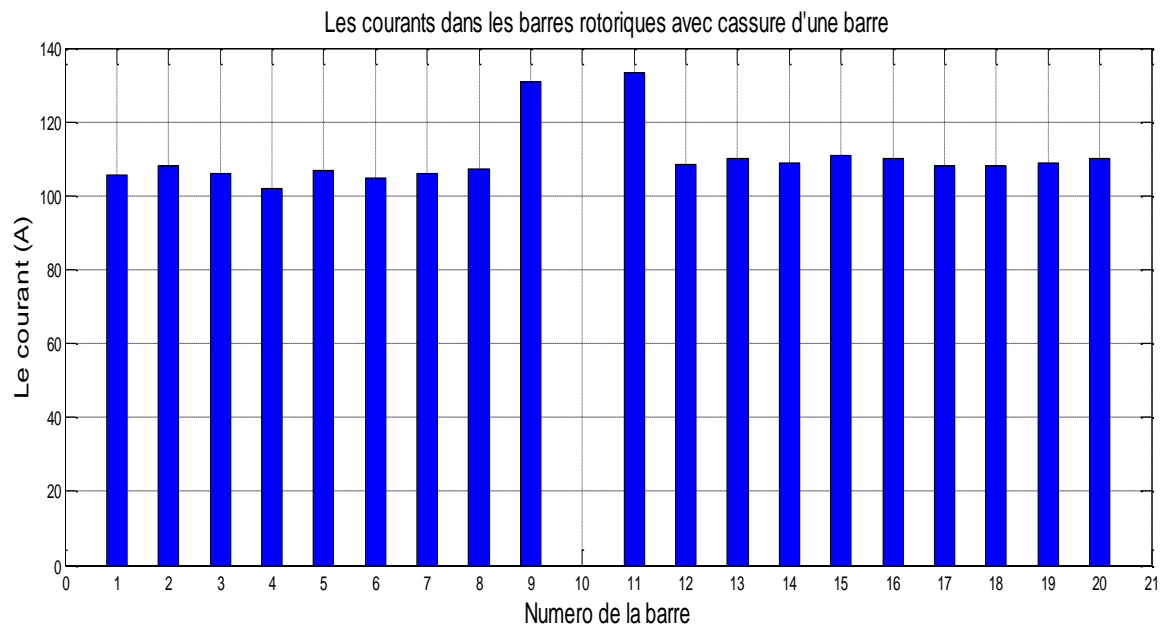
Figure 3.30. Vitesse de rotation en charge (1BC).





**Figure 3.31.** Courants rotoriques en charge avec (1BC)

(a : Courant d'une barre non adjacente à la barre cassée, b): Courant d'une barre adjacente à la barre cassée



**Figure 3.32.** Les valeurs des Courants des barres rotoriques avec (1BC) en charge

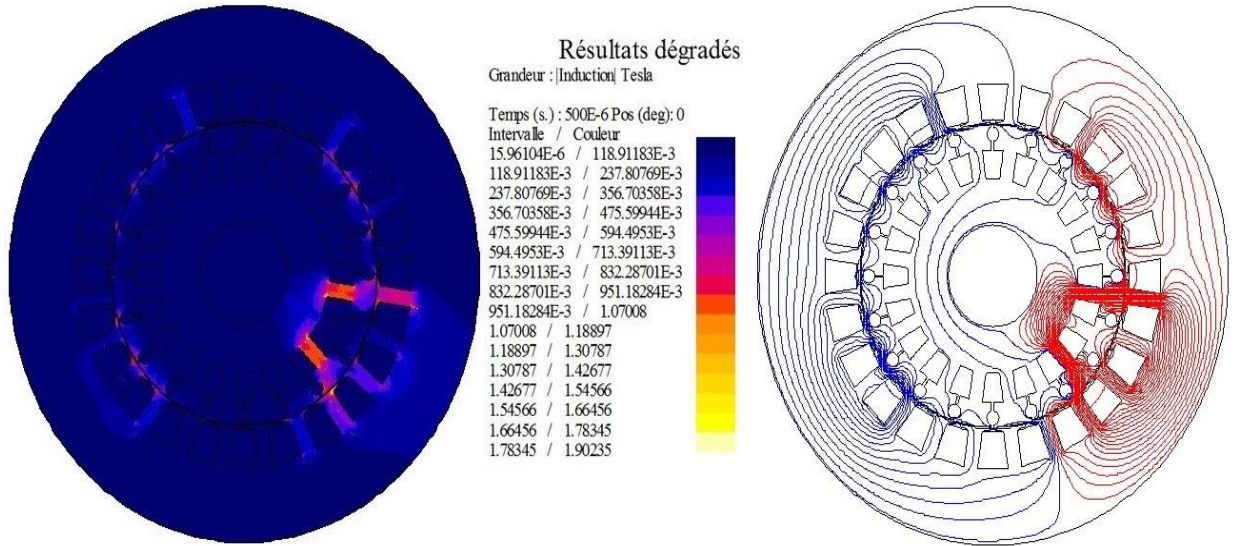
Le courant de la barre cassée est pratiquement nul.

Les courants au niveau des barres adjacentes à la barre cassée ont pris des grandes valeurs par rapport aux courants des barres à l'état sain.

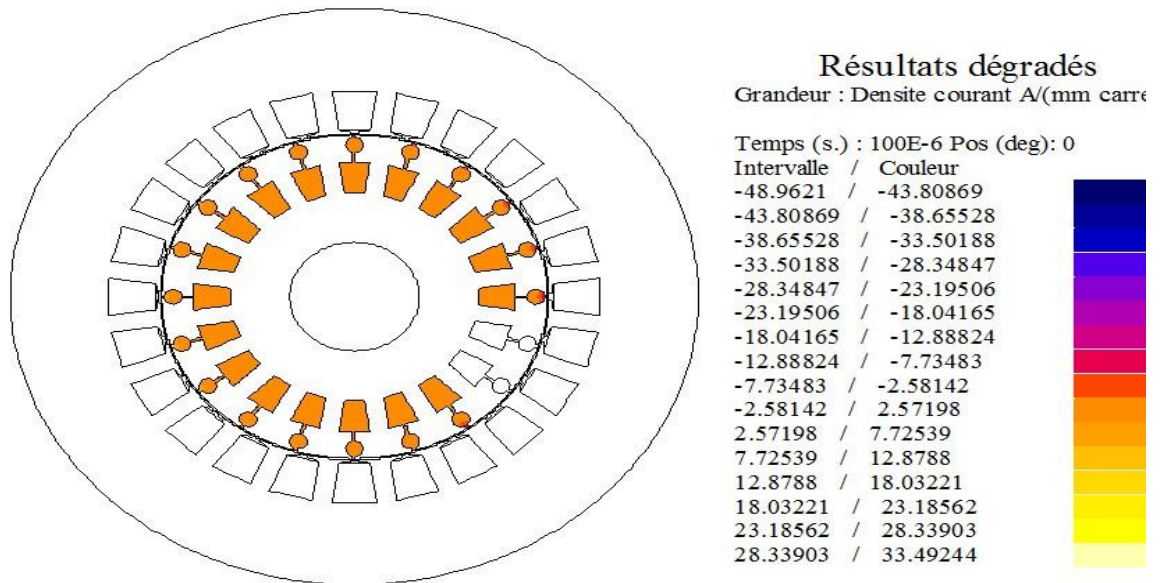
# Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

## 3.4.4 Fonctionnement avec deux barres cassées

Avec une même tension de (380v) et un couple résistant  $C_r = 6 \text{ N.m}$  on élimine une deuxième barre et on visualise le résultat de simulation

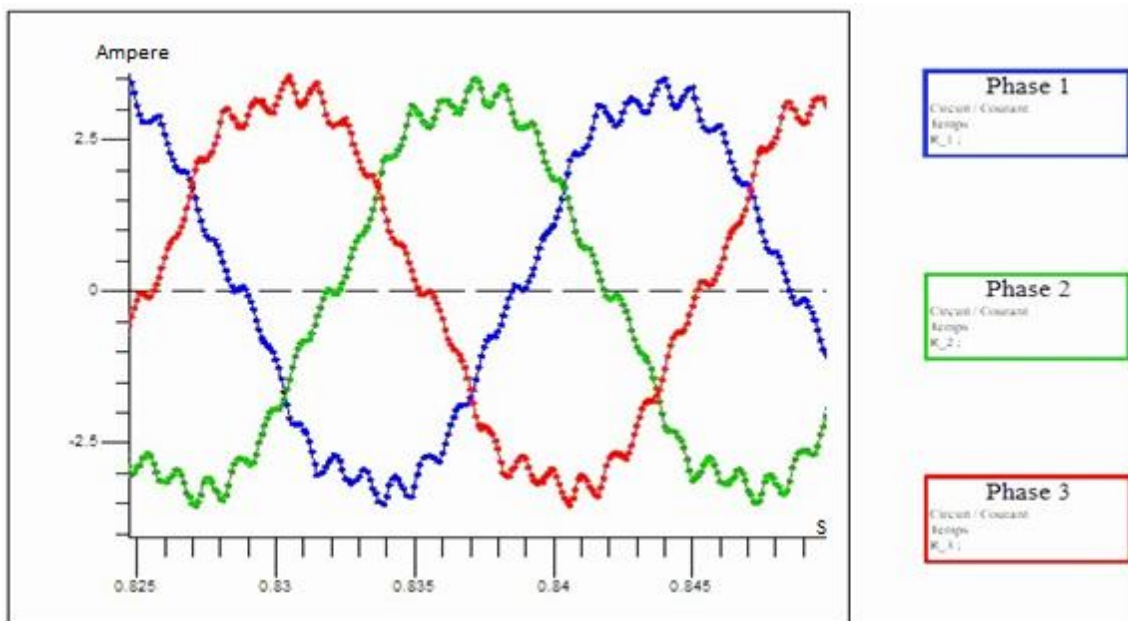
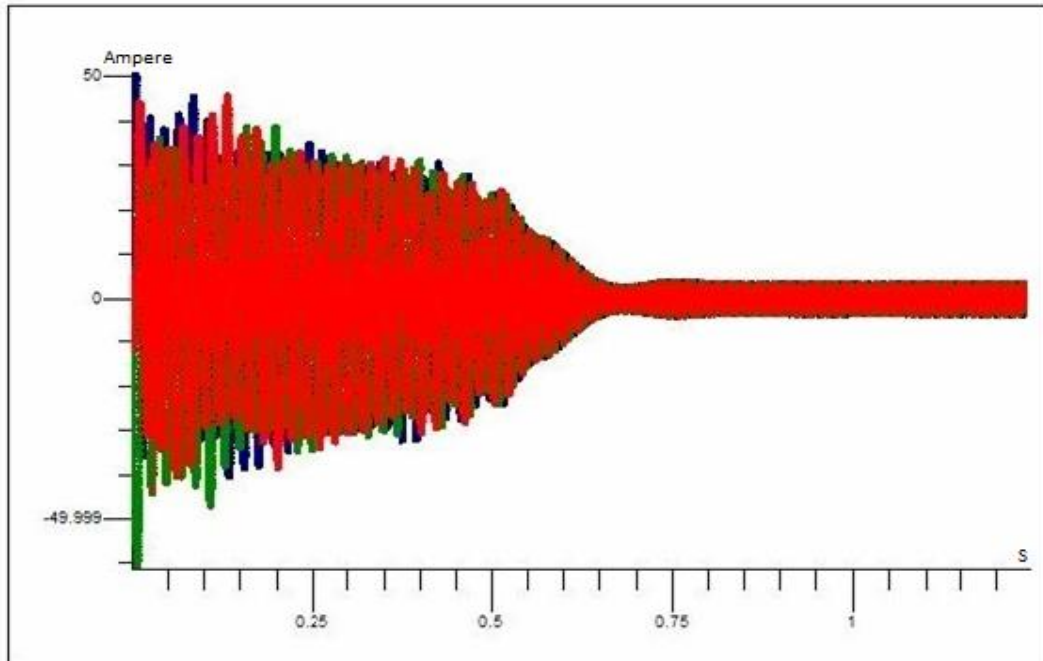


**Figure 3.33.** Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique avec (2BC)



**Figure 3.34.** Densité de courant dans les barres rotoriques avec (2BC)

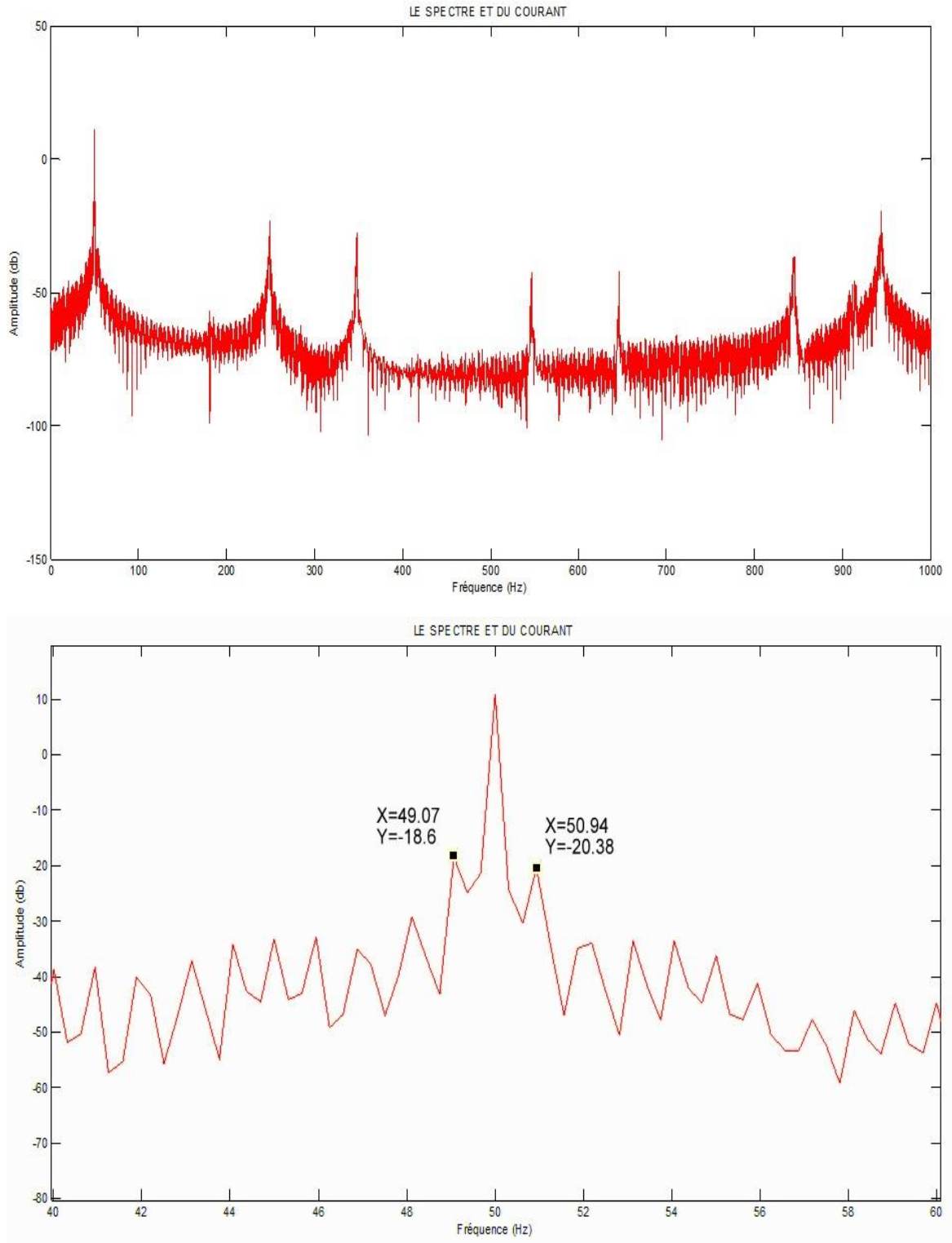
La densité de courant devient nulle lors de cassure des barres dans ces dernières et elle devient un peu plus importante dans les autres barres surtout les barres adjacentes.



**Figure 3.35.** Les courants statoriques en charge avec (2BC)

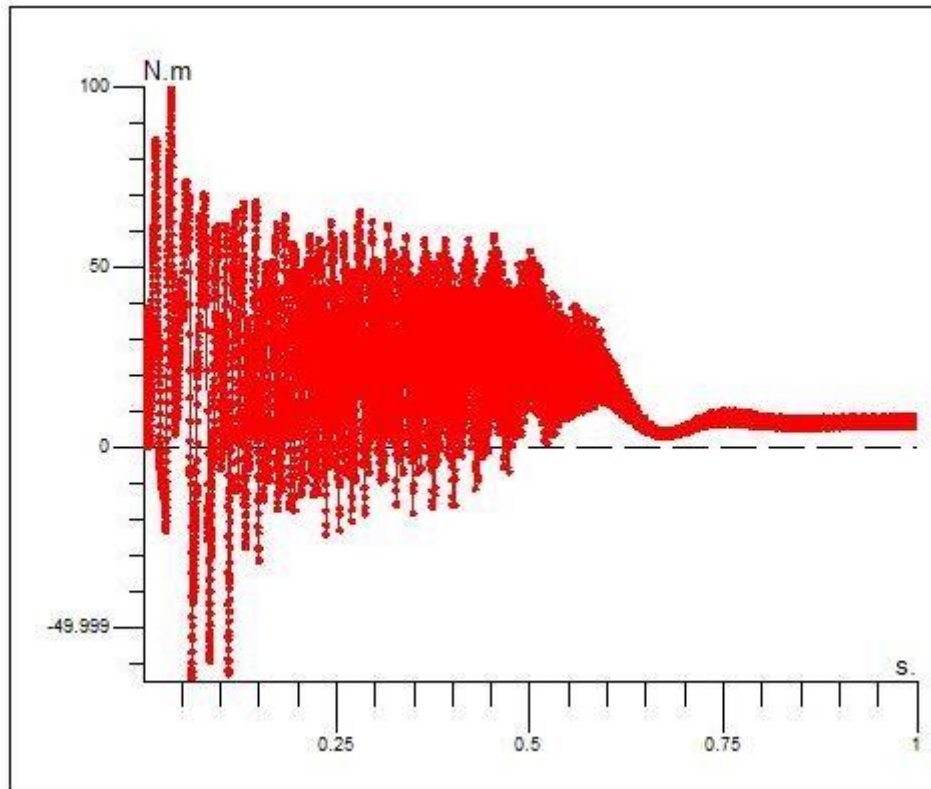
On remarque une petite perturbation au niveau des courants statoriques en charge par rapport au courants statoriques en charge avec une barre cassée et à l'état sain comme on remarque qu'ils ont pris un temps un peu plus que les cas précédents pour atteindre le régime permanent (presque **0.80s**).

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

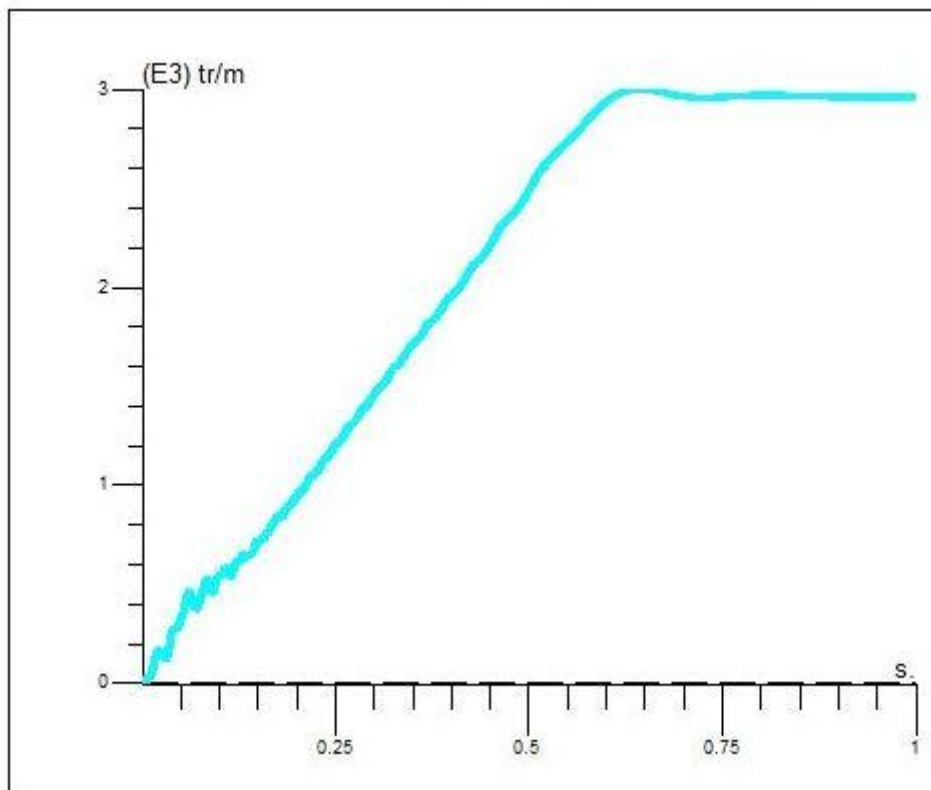


**Figure 3.36.** Spectre d'harmoniques en charge avec (2BC)

Les harmoniques au voisinage de la fondamentale ont augmenté en amplitude par rapport à l'état sain et le cas d'une seule barre cassée.

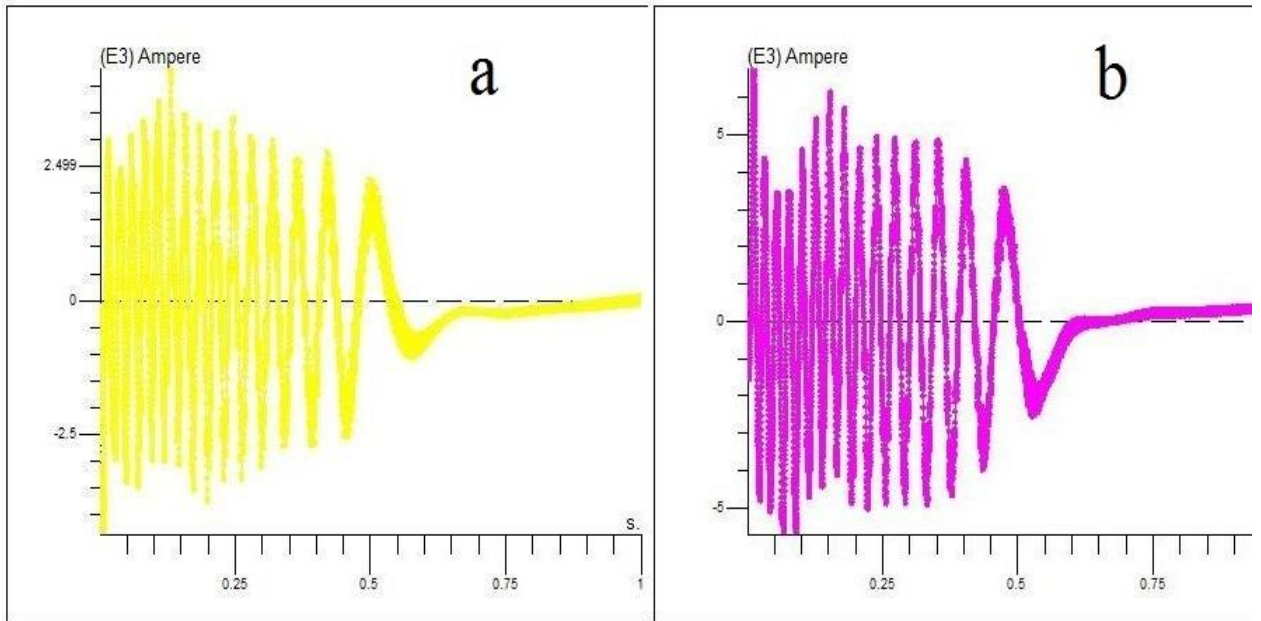


**Figure 3.37.** Couple électromagnétique en charge (2BC).



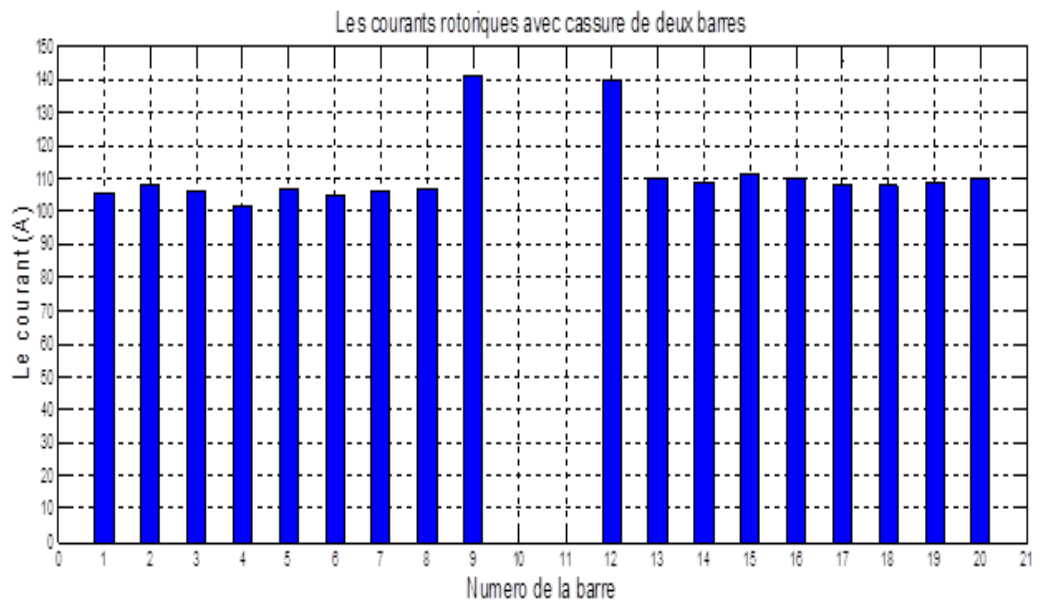
**Figure 3.38.** Vitesse de rotation en charge (2BC).





**Figure 3.39.** Courants rotoriques en charge avec (2BC)

(a : Courant d'une barre non adjacente à la barre cassée, b) : Courant d'une barre adjacente à la barre cassée



**Figure 3.40.** Les valeurs des Courants des barres rotoriques avec (2BC) en charge

Les courants des deux barres cassées tendent vers zéro

Les courants au niveau des barres adjacentes aux barres cassées ont augmenté par rapport aux cas précédents par contre au niveau des barres non adjacentes, il n'y a pas une grande variation.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

### 3.4.5 Fonctionnement avec trois barres cassées

Avec la même tension de (380v) et un couple résistant  $C_r = 6 \text{ N.m}$  on élimine une troisième barre et on visualise les résultats de simulation

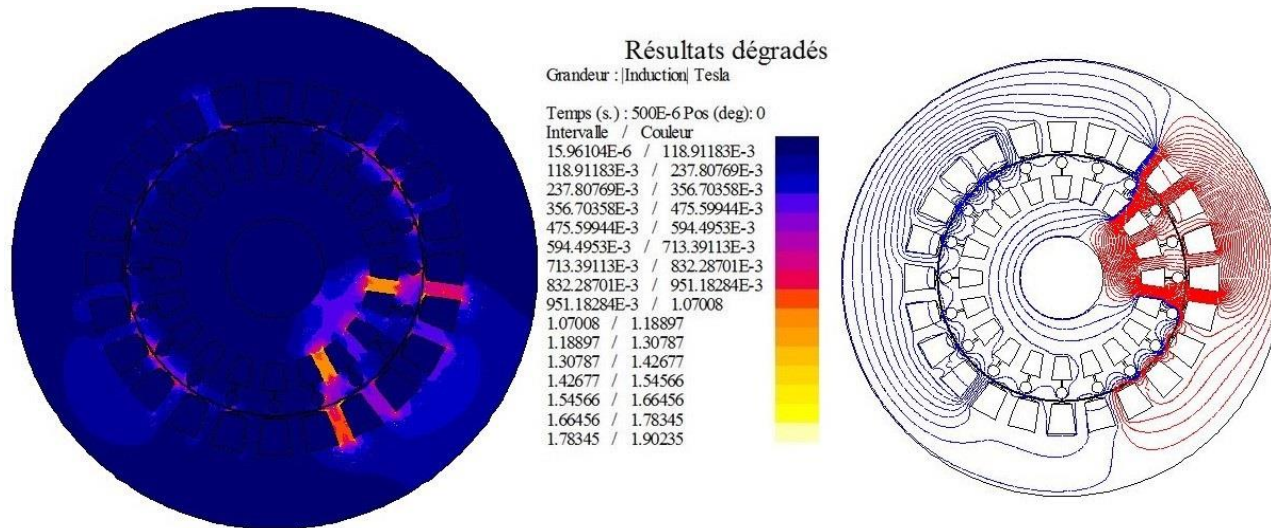


Figure 3.41. Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique avec (3BC)

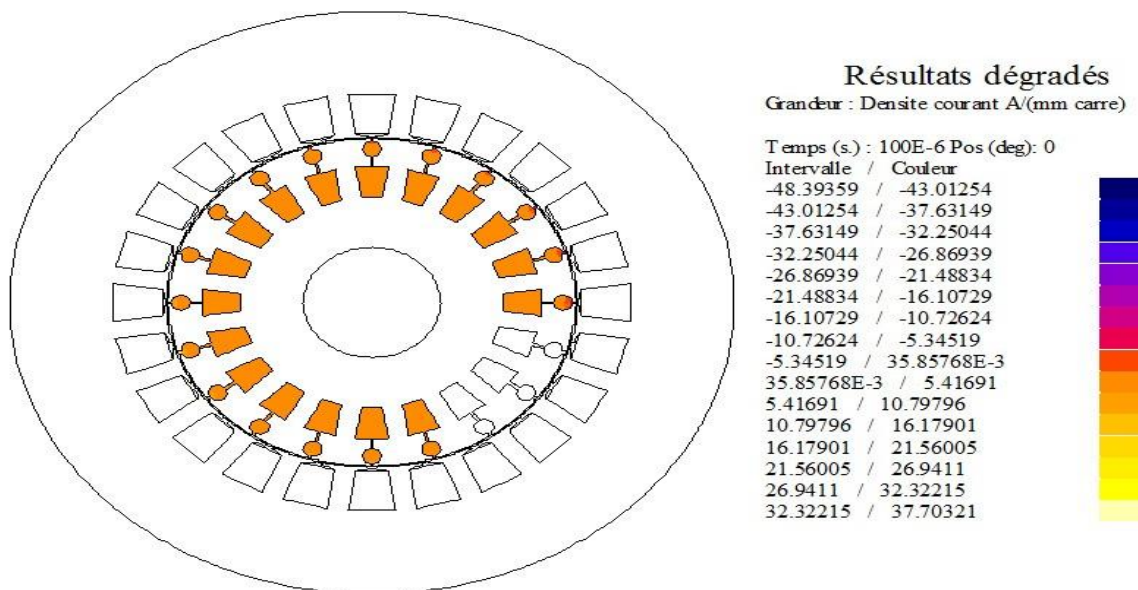
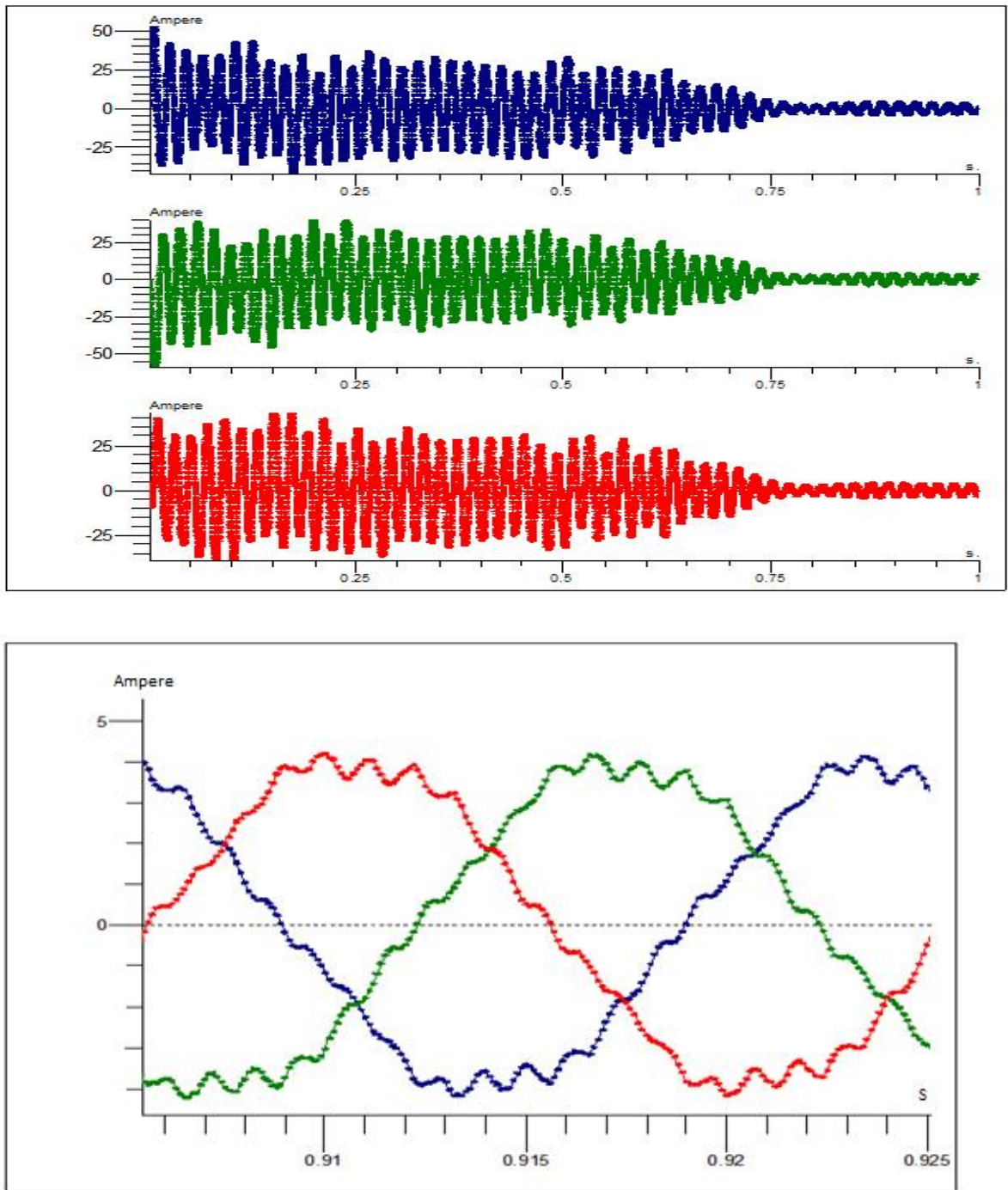


Figure 3.42. Densité de courant dans les barres rotatives avec (3BC)

On remarque que les lignes du champ deviennent plus perturbées lors de la cassure de la troisième barre et elles se regroupent autour des barres cassées.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis



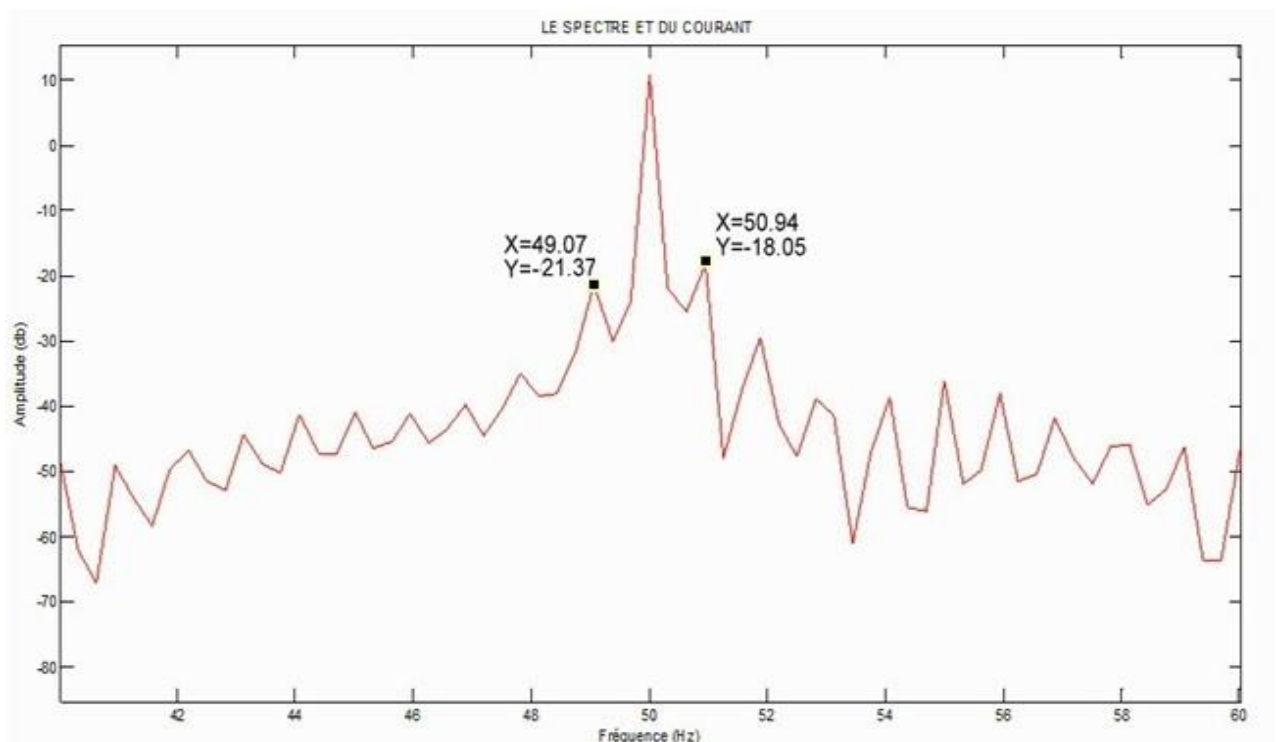
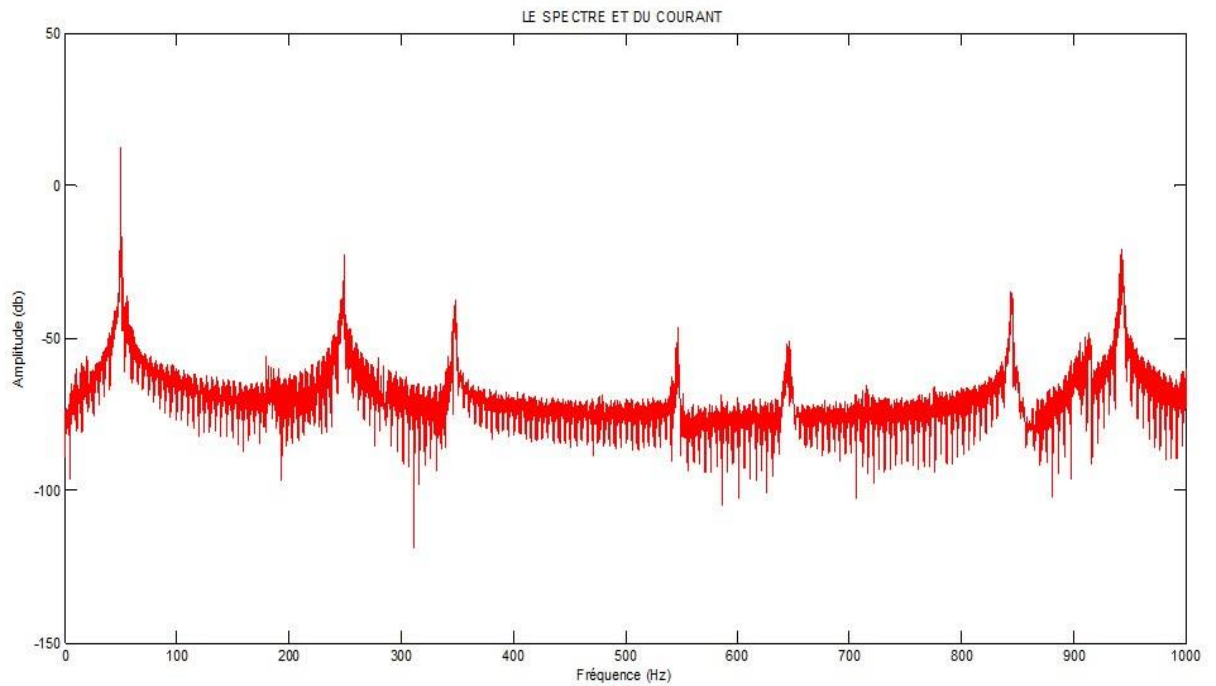
**Figure 3.43.** Courants statoriques en charge avec (3BC)

On voit que l'oscillation des courants statoriques augmente de façon remarquable par rapport aux courants statoriques en cas de deux barres cassées ou une seule barre ou en cas de l'état sain.

L'allure de la courbe des courants statoriques n'est pas parfaitement sinusoïdale et les valeurs des courants statoriques atteignent une valeur de 4.5A.

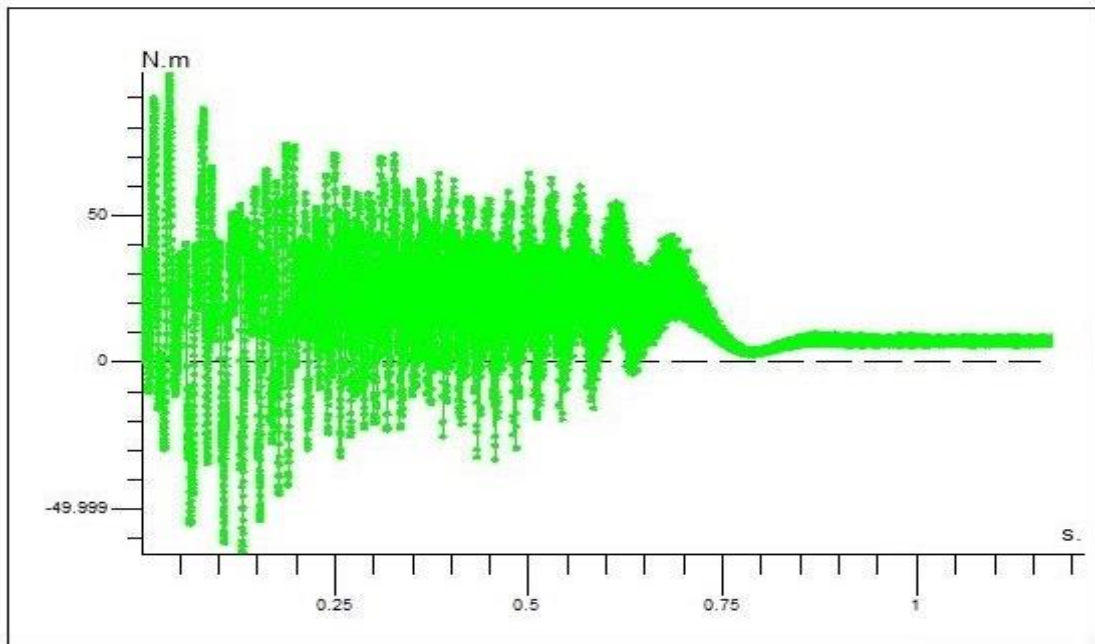


## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

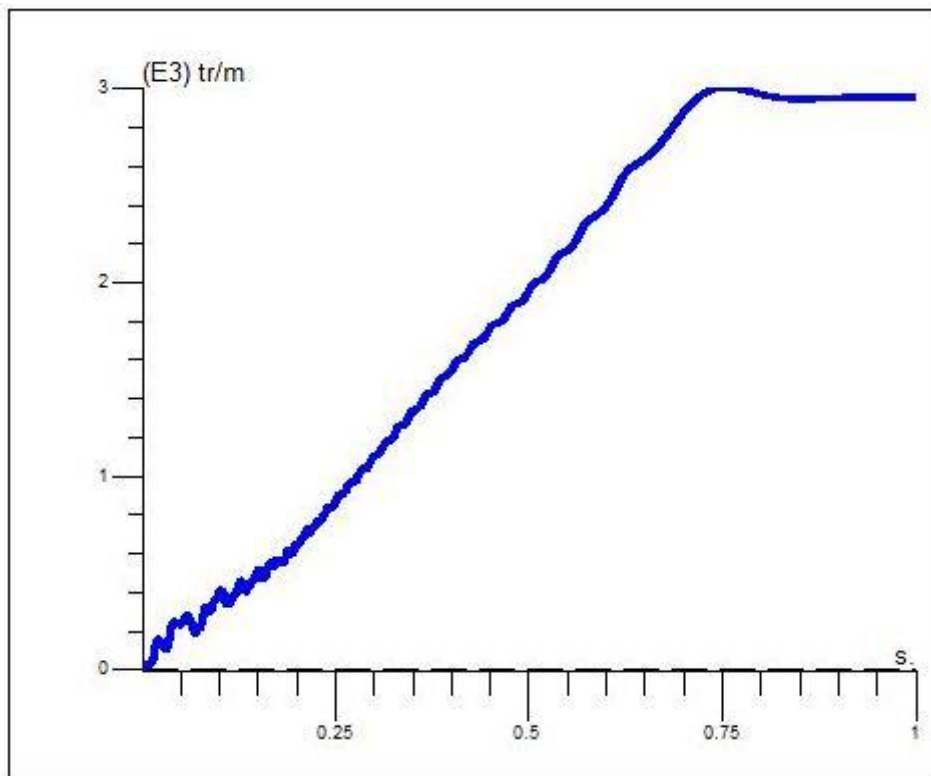


**Figure 3.44.** Spectre d'harmonique en charge avec (3BC)

Les harmonique au voisinage de la fondamentale augmentent aussi en amplitude et deviennent plus remarquables par rapport aux cas précédents.

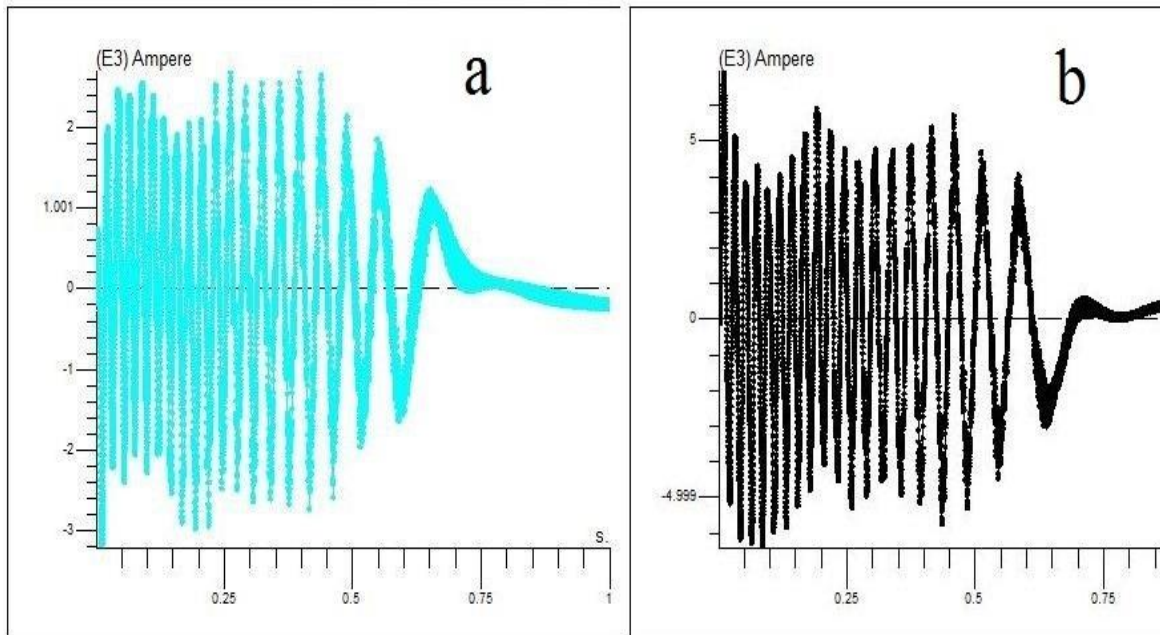


**Figure 3.45.** Couple électromagnétiques en charge (3BC).



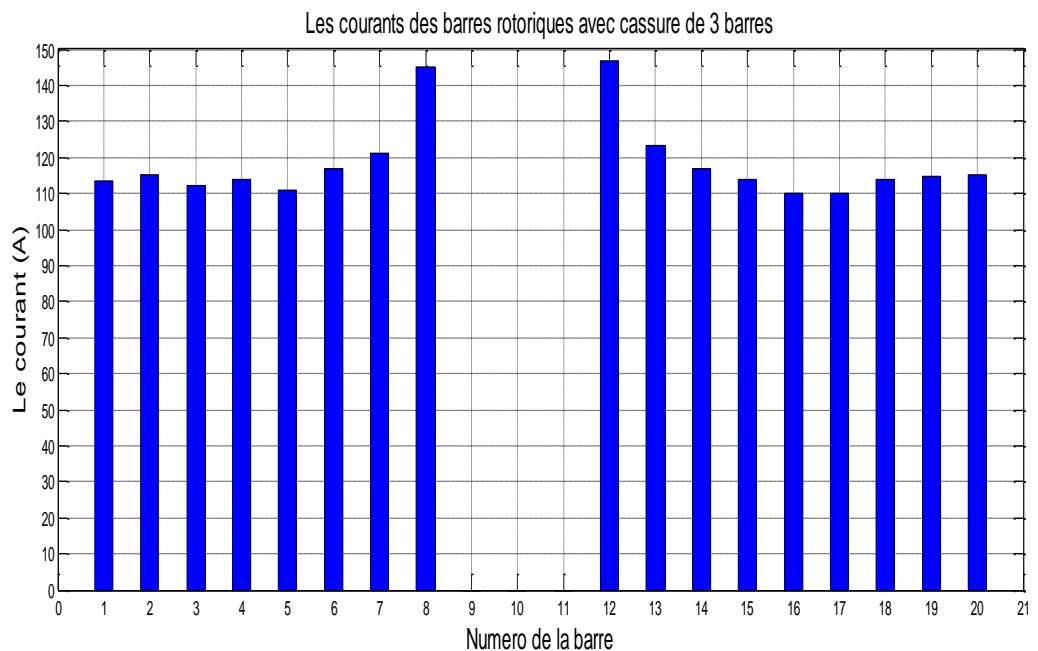
**Figure 3.46.** Vitesse de rotation en charge (3BC).

le couple prend un temps plus long que les cas précédents pour atteindre le régime permanent qui influe à son rôle sur la vitesse de rotation et elle aussi prend le même temps pour se stabiliser.



**Figure 3.47.** Courants rotoriques en charge avec (3BC)

(a : Courant d'une barre non adjacente aux barres cassées, b : Courant d'une barre adjacente aux barres cassées)



**Figure 3.48.** Les valeurs des Courants des barres rotoriques avec (3BC) en charge

les courant des trois barres cassées aussi tendent vers zéro et les courant des barres adjacent aux trois barres cassées augmente à des valeurs importantes.

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis

### 3.4.6 Simulation de cassure de trois barres l'une après l'autre

Pour observer et mieux voir le comportement des grandeurs mécaniques et électromagnétiques (Le couple et la vitesse) on réalise une deuxième simulation qui regroupe tous les défauts l'un après l'autre chaque une seconde

La machine est saine jusqu'à  $t=1s$  ou on fait casser la première barre, la deuxième barre à  $t=2s$  et la troisième barre à  $t=3s$ .

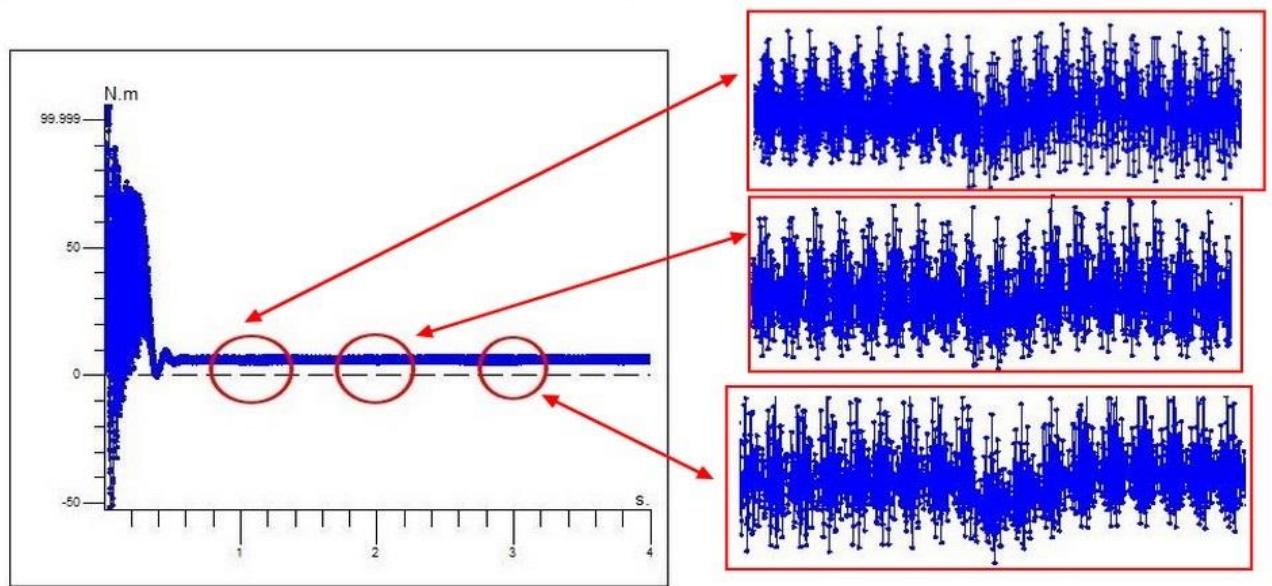


Figure 3.49. Comportement du couple

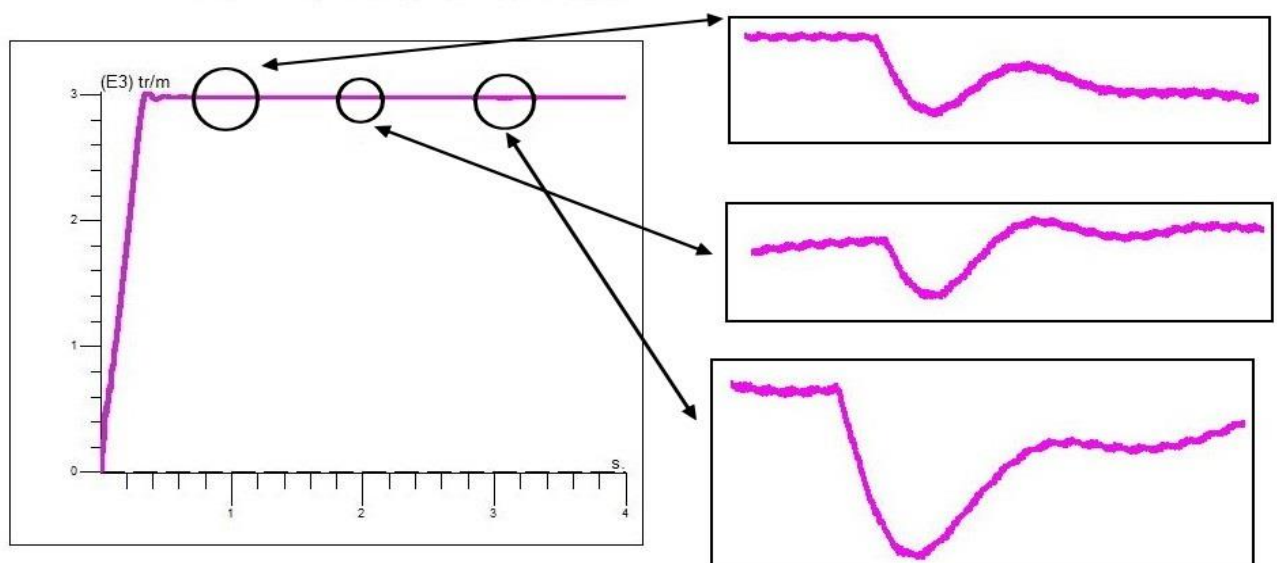
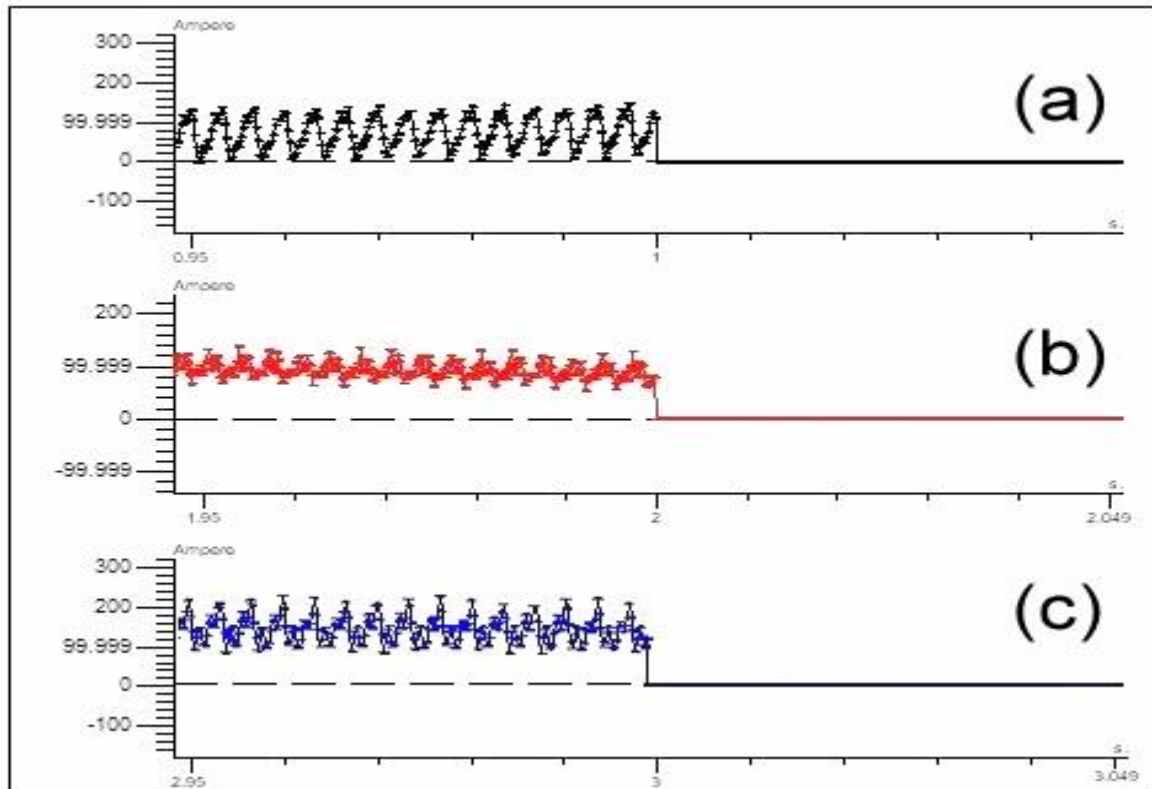


Figure 3.50. Comportement de la vitesse

## Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis



**Figure 3.51.** Comportement des courants dans les barres rotorique. a) : première barre cassée, b) : deuxième barre cassée, c) : troisième barre cassée

Dans cette simulation nous avons simulé les trois cassures des barres une après l'autre pour mieux voir le comportement du couple et de la vitesse le temps de la présence du défaut.

Au premier temps on a démarré le moteur à l'état sain jusqu'à la première seconde ou on a cassé le première barre on a remarqué que le couple et la vitesse ont subis une petite perturbation car la valeur de la vitesse a diminuée et le couple s'est perturbé ce qui a provoqué des vibrations dans le moteur.

Par la suite on a remarqué que après la cassure de la deuxième et la troisième barres à la deuxième et la troisième secondes le niveau de perturbation a augmenté par rapport au premier défaut se qui a conduit à des oscillations remarquables dans la vitesse et le couple.

Le courant dans la barre (a) a varié entre zéro et presque 100 A jusqu'a la première seconde le temps de cassure de cette barre ou il est devenu nul.

## **Chapitre 3 : Modélisation par la méthode des éléments finis**

---

Au niveau de la barre (b) qui est adjacente à la barre (a) on remarque une augmentation du courant jusqu'à 130A ce qui a provoqué l'échauffement de cette dernière et qui a conduit à sa cassure à la deuxième seconde.

Même remarque pour la barre (c) le courant a augmenté jusqu'à 200 A et plus donc la barre s'est échauffée rapidement et qui a provoqué la cassure de cette dernière à la troisième seconde.

### **3.5 Conclusion**

On a vu dans ce chapitre la méthode de modélisation la plus utilisée dans le domaine de conception et de diagnostic qui est la modélisation par la méthode des éléments finis.

Puis on a essayé d'établir les étapes de conception d'une machine asynchrone à cage pour visualiser ses comportements en cas d'une machine saine et on le compare avec le cas où il y a un défaut de cassure des barres rotoriques.

On a remarqué des changements au niveau de comportement du moteur et au niveau des allures des courbes des caractéristiques du moteur.

Dans le chapitre suivant on va essayer de travailler sur une machine réelle et appliquer des essais pratiques sans et avec défauts de cassure des barres rotoriques.

**CHAPITRE 4 :**  
**ETUDE EXPERIMENTALE**

### 4.1 Introduction

Les domaines électriques utilisent de plus en plus les moteurs asynchrones à cause de leur puissance massique, de leur robustesse et de leur coût.

La maintenance et le diagnostic deviennent donc une affaire économique. Il est important de détecter de manière précoce les défauts qui peuvent apparaître dans ces machines et donc de développer des techniques de diagnostic préventive afin d'éviter la défaillance totale de la machine.

Notre objectif est la détection des défauts rotoriques par l'emploi de l'analyse spectrale. Les simulations théoriques du moteur avec défaut dans le chapitre précédent, ont permis de mettre en évidence les phénomènes de la présence d'harmoniques caractéristiques pour chaque type de défaut dans le spectre ou la forme des signaux obtenus et de déceler la présence des défauts.

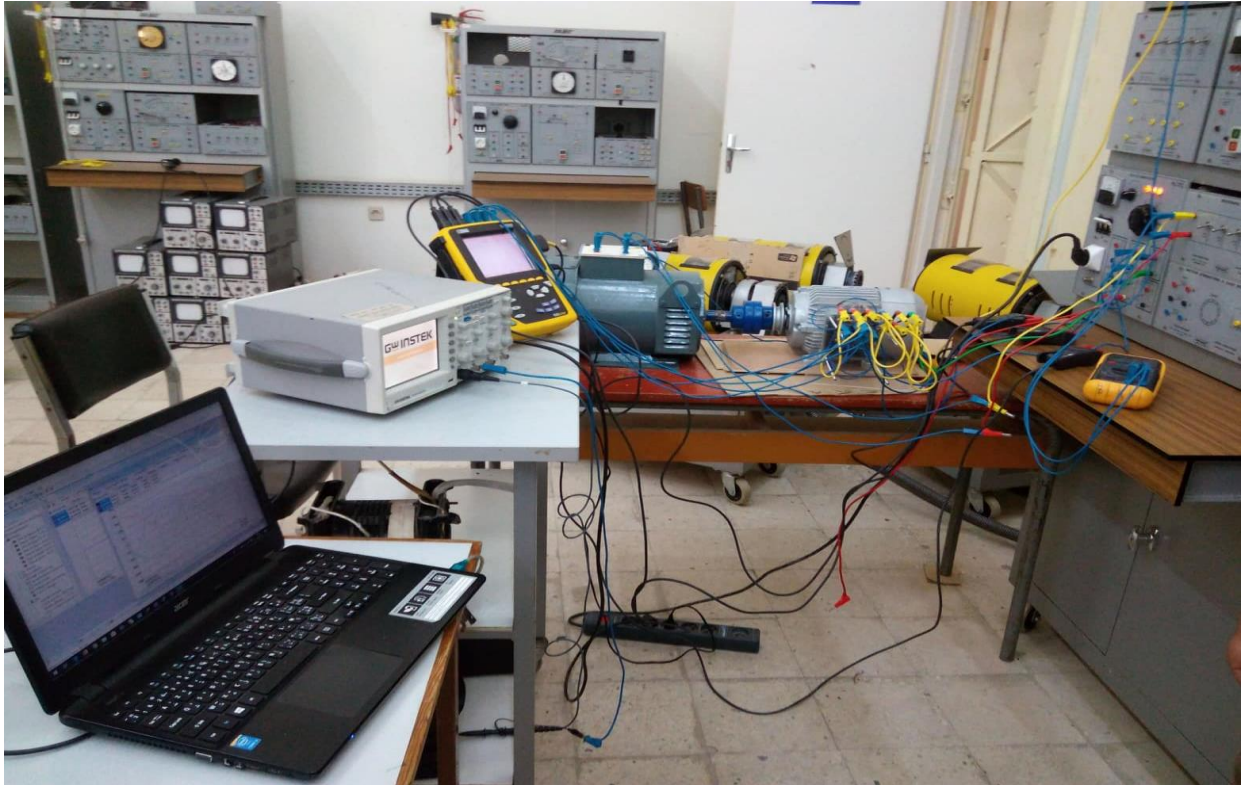
En réservant ce chapitre au travail pratique en travaillant sur une machine asynchrone réelle en faisant un diagnostic total et relevant les signaux des courants et des tensions statoriques dans le cas de machine saine et après dans le cas de la machine en défaut des barres cassées en analysant les résultats graphiques et ayant une idée pratique sur la différence de comportement de la machine en cas sain et en cas de défaut rotorique.

### 4.2 Réalisation pratique

Les essais pratiques qu'on va présenter ci-dessous sont effectués au laboratoire du département de l'aéronautique, le moteur qu'on va utiliser dans ces essais pratiques pour l'étude des défauts de cassures de barres rotoriques est un moteur triphasé de type ENEL, 50 Hz, 2 Poles de puissance de 2.2 KW avec une vitesse de 2860 tr/min, son rotor est un rotor à cage d'écureuil qui contient 20 barres, ce moteur est accouplé avec une génératrice à courant continu d'une puissance de 1.5 kW à un courant d'excitation  $I_{exc}=3.8A$ , cette dernière est reliée à une charge électrique résistive variable qui est représentée par des résistances en parallèles.



Le banc d'essais contient aussi un analyseur de spectre, un ordinateur et une paillasse contenant une alimentation triphasé variables, des charges électriques resistives et des ampèremètres



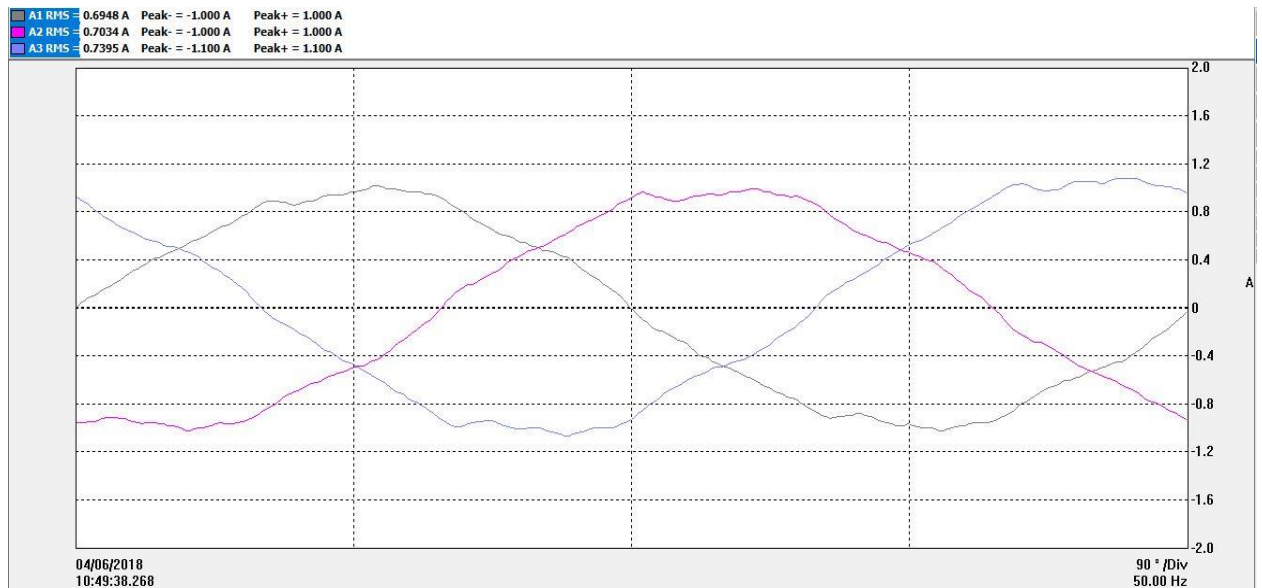
**Figure 4.1.** Banc d'essai utilisé pour le diagnostic du défaut de cassure de barres

### 4.3 Resultats pratiques

#### 4.3.1 Moteur en état sain

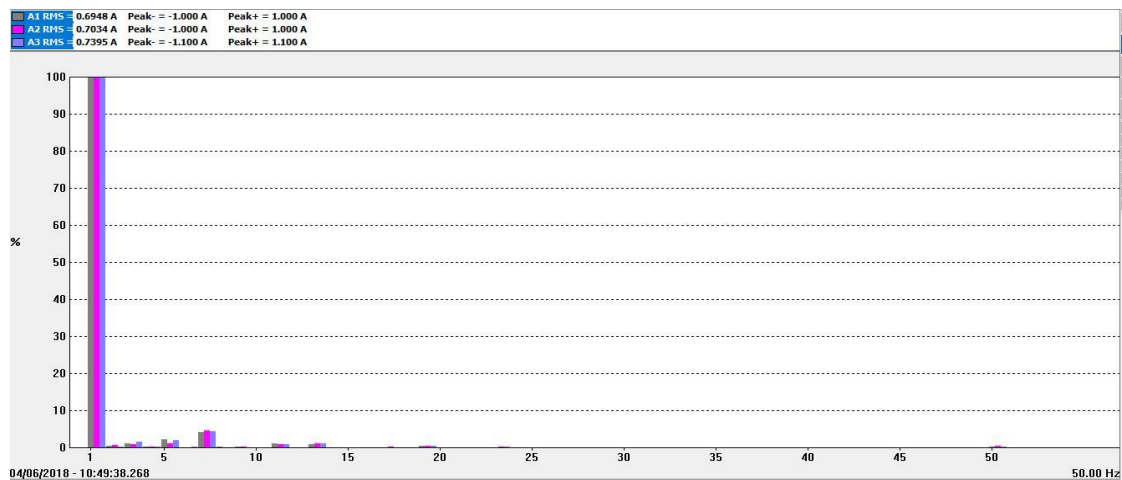
##### *a Essai à vide:*

Dans cet essai on a pris le moteur en état sain sans des barres cassées dans le rotor et à vide, on a pris des résultats à partir de l'analyseur de spectre qui sont représentés comme suit:



**Figure 4.2.** Les courants statoriques au régime permanent à vide

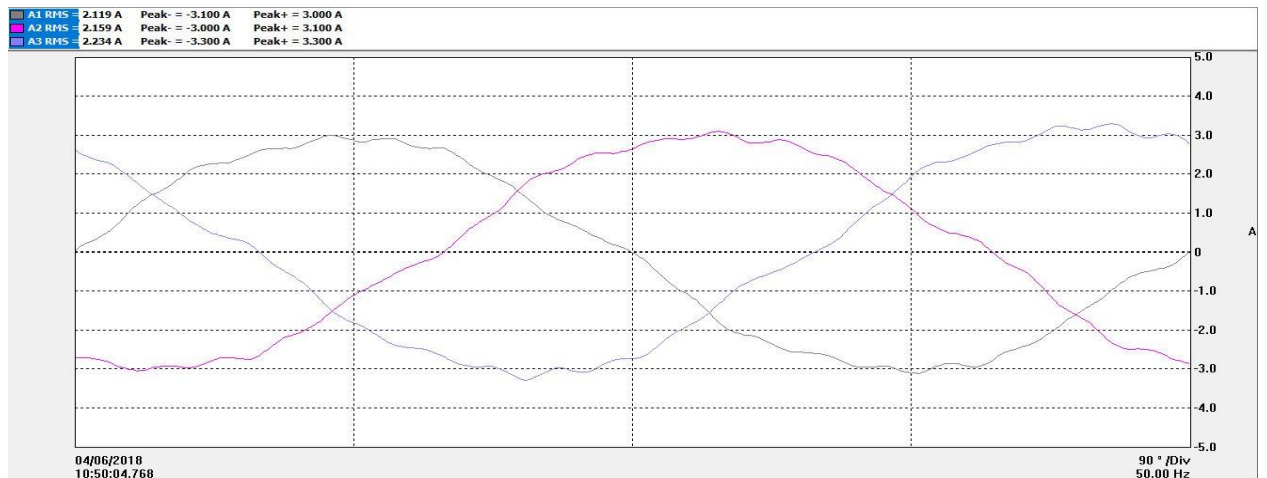
On remarque qu'à l'état sain à vide les courants statoriques se stabilisent à une valeur logique de  $I=1A$  au régime permanent avec un déphasage de 120 degrés



**Figure 4.3.** Le spectre d'harmonique donné par l'analyseur pour l'état sain à vide

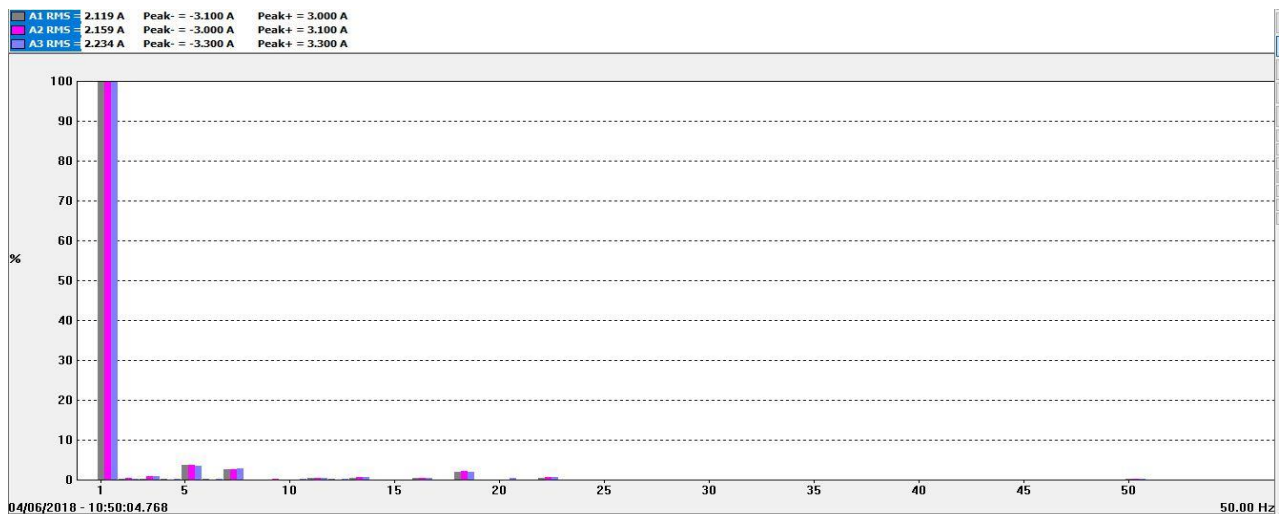
le spectre des courants statoriques à l'état sain à vide montre bien la composante fondamentale à  $K=1$  ou  $f=50$  Hz fonctionnant avec un glissement ( $g=0.045$ ) et on remarque la présence de quelques harmoniques du déséquilibre et d'asymétrie dues aux conditions de rebobinage du moteur.

**b Essai en charge :** Dans cet essai on a appliqué une charge resistive equivalente de  $R=49\Omega$  avec une tension simple  $v=220V$ .



**Figure 4.4.** Les courants statoriques au regime permanent en charge

On remarque ici que l'amplitude des courants statoriques est devenue un peu plus importante à cause de la charge électrique resistive.



**Figure 4.5.** Le spectre d'harmonique donné par l'analyseur pour l'état sain en charge

le spectre des courants statoriques à l'état sain en charge montre bien la composante fondamentale à  $K=1$  ou  $f=50$  Hz fonctionnant avec un glissement ( $g=0.045$ ) et on remarque la l'augmentation en amplitude des harmoniques du déséquilibre et d'asymétrie dues aux conditions de rebobinage du moteur.

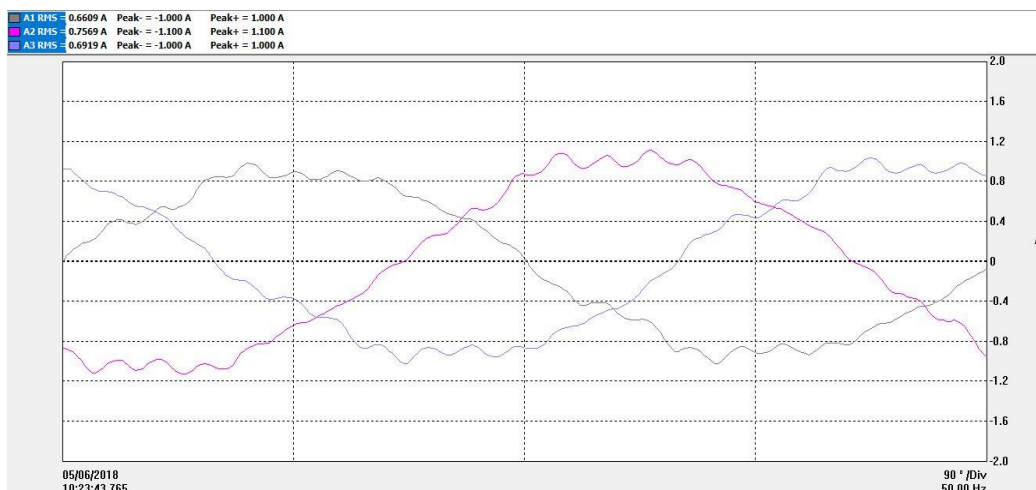
### 4.3.2 Moteur avec défaut (1 barre cassée)

#### a Essai à vide

Dans cet essai le défaut rotorique a été provoqué par le perçage d'un trou suffisant pour assurer la cassure complète de la barre et on l'a essayé à vide ou on obtenu les résultats suivants.

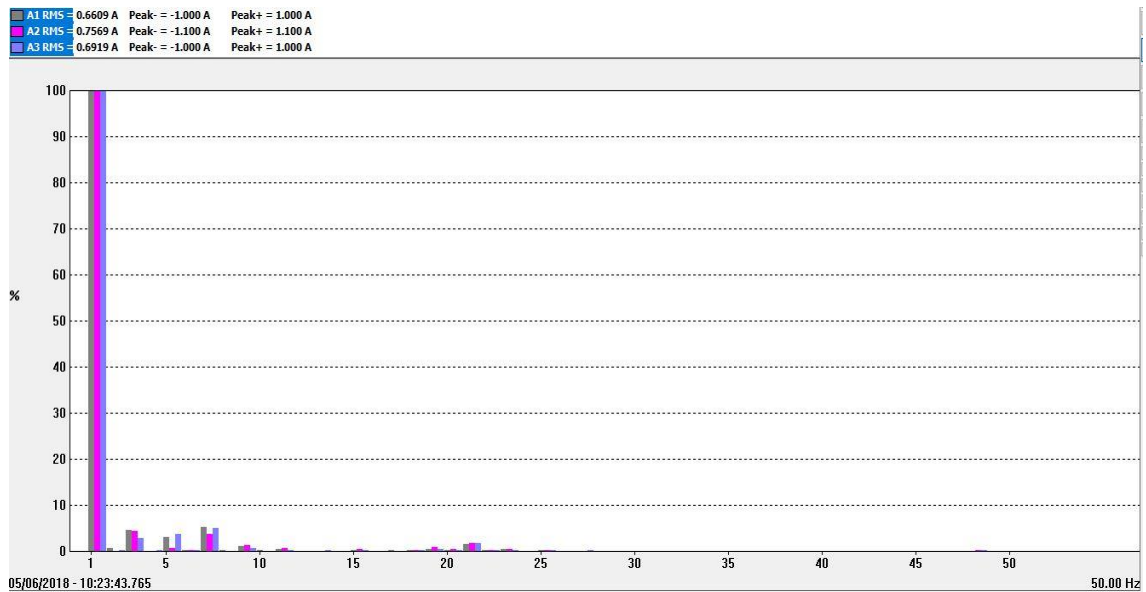


**Figure 4.6.** Rotor à cage avec une barre cassée.



**Figure 4.7.** Les courants statorique à vide au régime permanent avec une barre cassée.

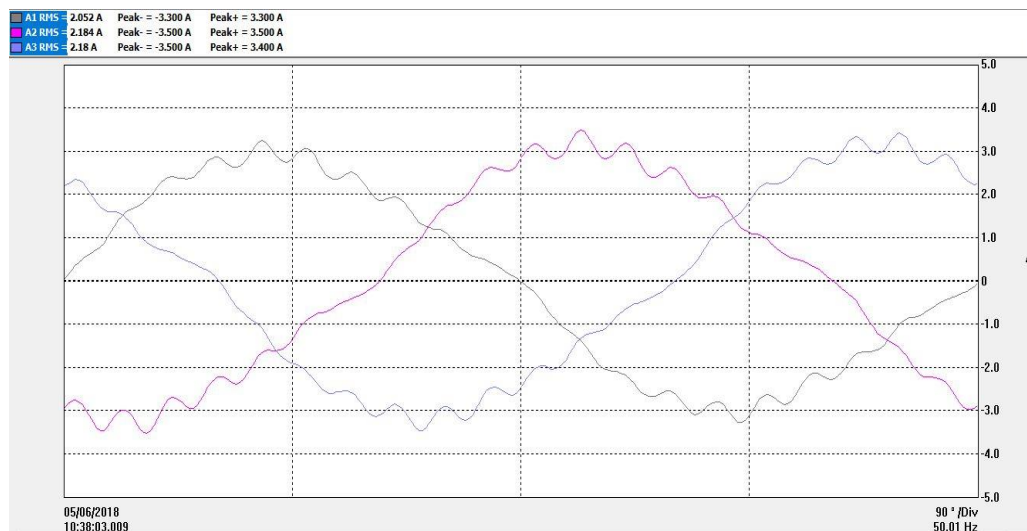
On remarque dans la figure (4.7) une petite perturbation au niveau des courants statoriques qui est due à la cassure de la barre rotorique



**Figure 4.8.** Le spectre d'harmonique à vide avec une barre cassée.

Ce défaut a provoqué l'augmentation des harmoniques de déséquilibre et quelques harmoniques d'espace.

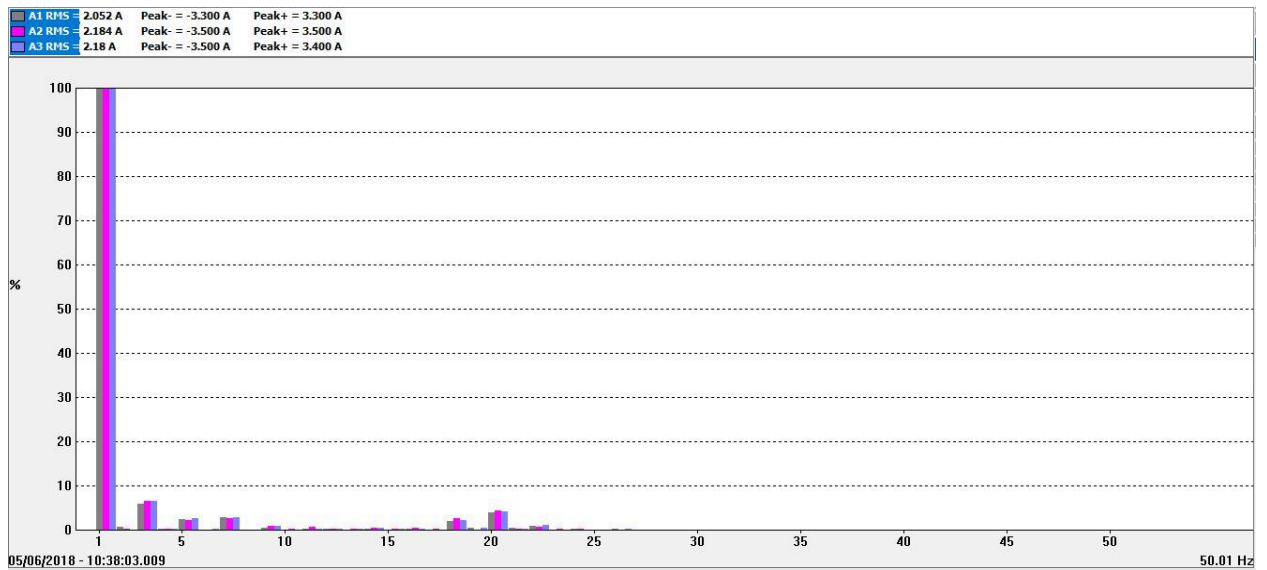
**b Essai en charge :** Dans cet essai on a appliqué une charge résistive équivalente de  $R=49\Omega$  avec une tension simple  $v=220V$



**Figure 4.9.** Les courants statorique en charge au regime permanent avec une barre cassée.

On remarque dans la figure (4.9) une perturbation au niveau des courants statoriques qui est due à la cassure de la barre rotorique qui a augmenté à cet essai par rapport à l'essai à vide.





**Figure 4.10.** Le spectre d'harmonique en charge avec une barre cassée.

Ce défaut a provoqué l'augmentation des harmoniques de déséquilibre et quelques harmoniques d'espace.

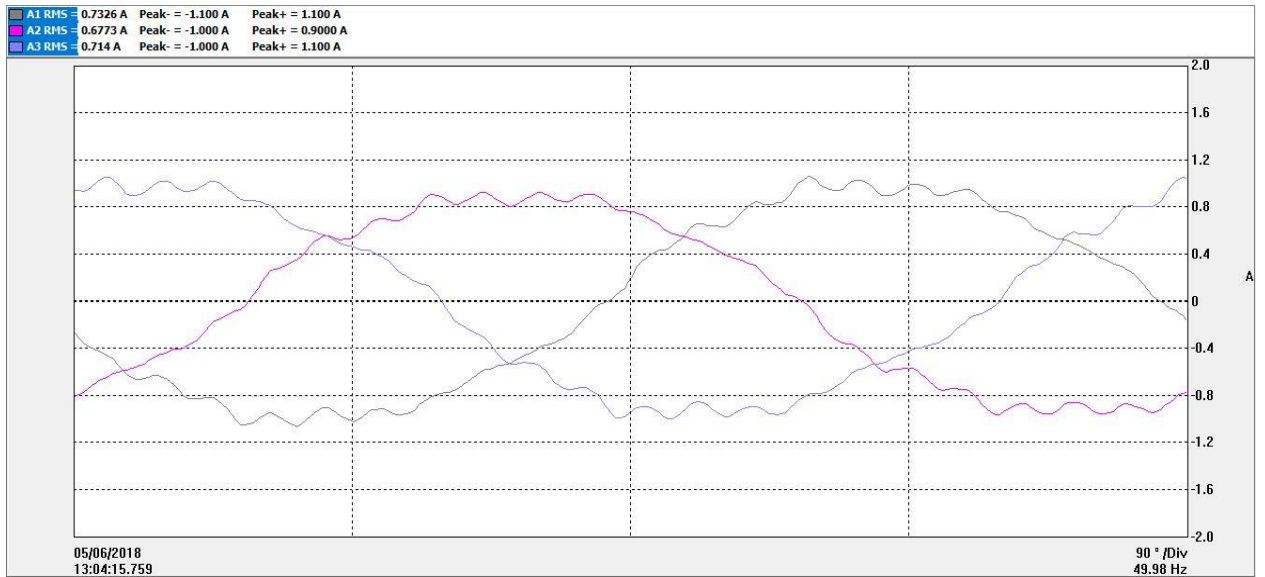
### 4.3.3 Moteur avec défaut (2 barre cassée)

#### *a Essai à vide*

Dans cet essai on va casser une deuxième barre en faisant un deuxième perçage dans le rotor et on va prendre les résultats depuis l'analyseur de spectre.

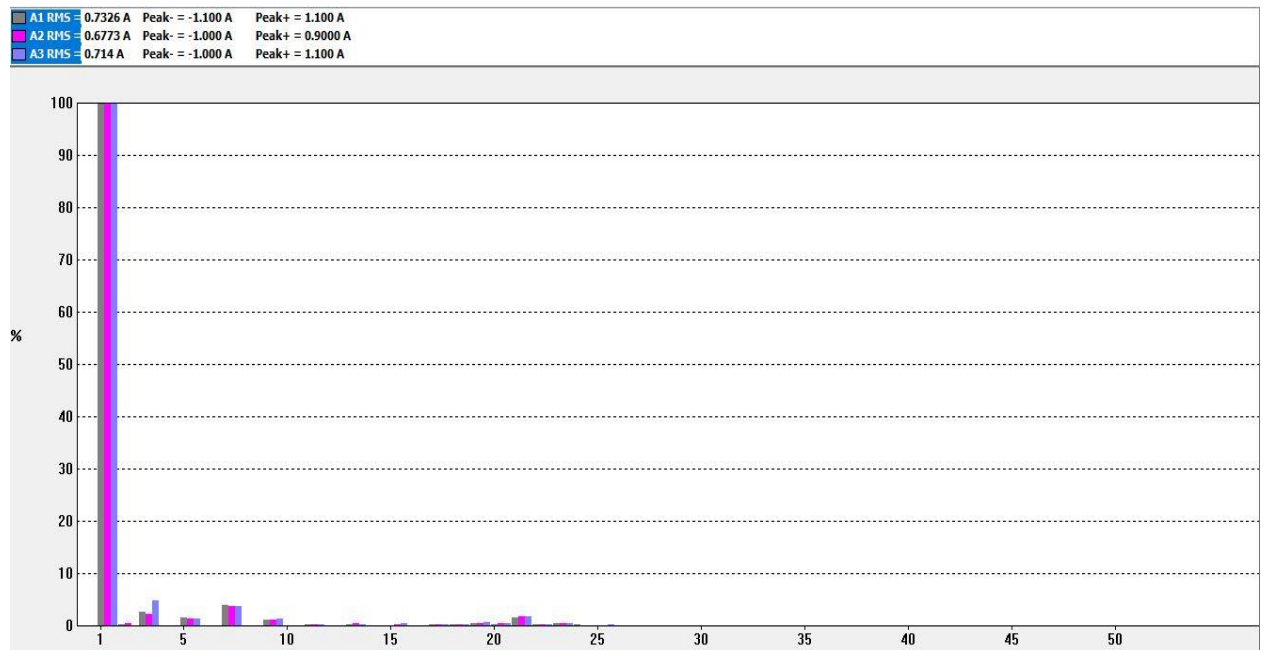


**Figure 4.11.** Rotor à cage avec deux barres cassées.



**Figure 4.12.** Les courants statorique à vide au regime permanent avec deux barres cassées

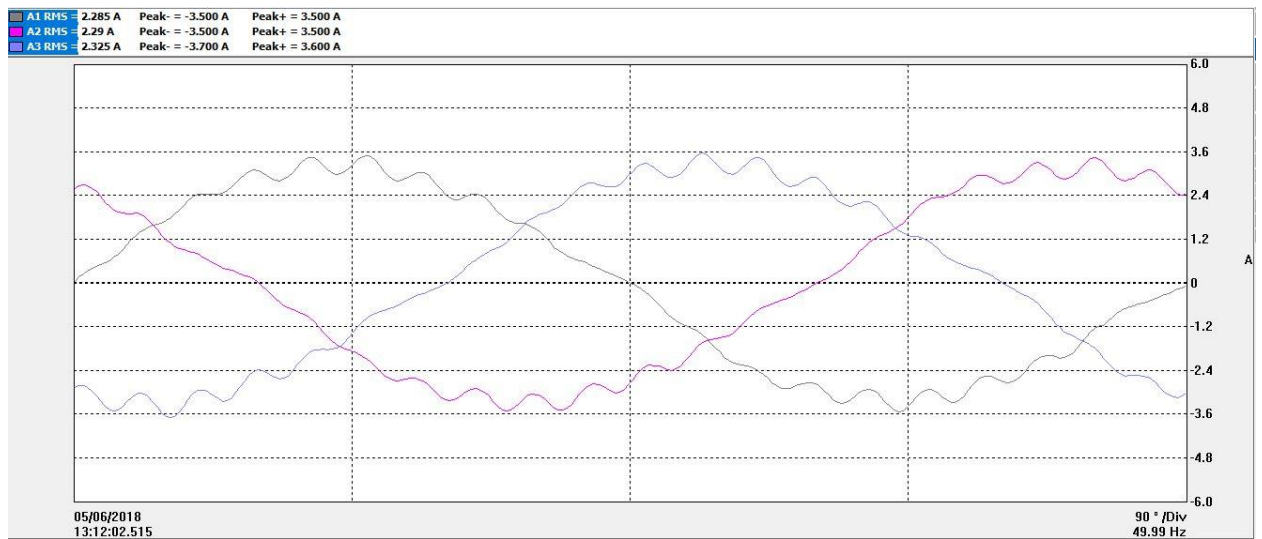
On remarque dans la figure (4.12) une petite perturbation au niveau des courants statoriques qui est due à la cassure de la deuxième barre rotorique.



**Figure 4.13.** Le spectre d'harmonique à vide avec deux barres cassées

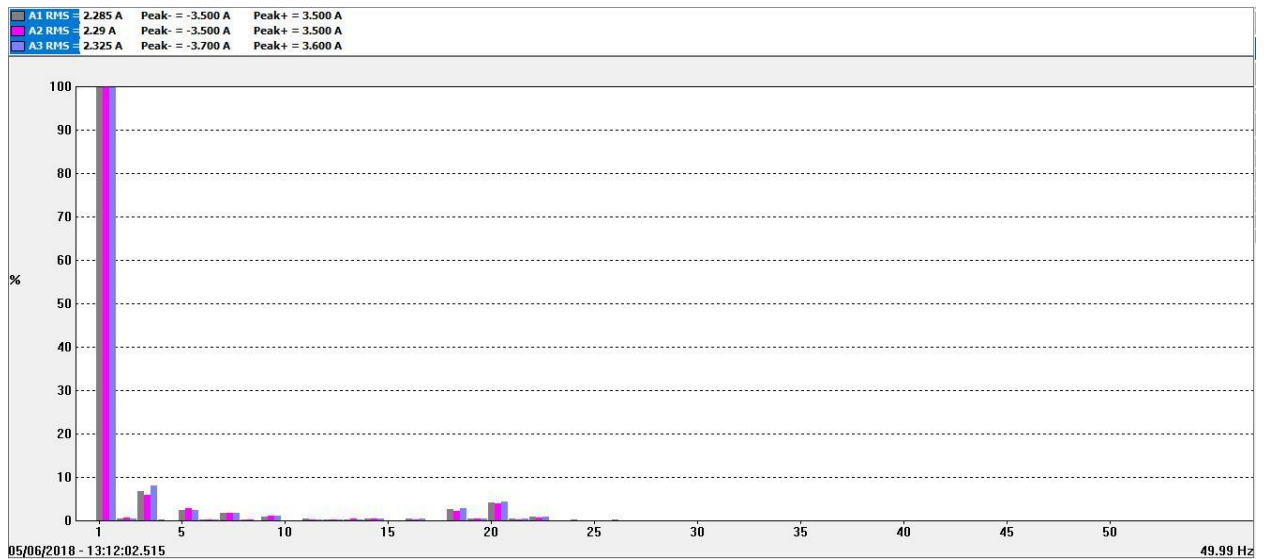
Ce défaut a provoqué l'augmentation des harmoniques de desequilibre et quelques harmoniques d'espace

**a Essai en charge :** Dans cet essai on a appliqué une charge resistive equivalente de  $R=49\Omega$  avec une tension simple  $v=220V$



**Figure 4.14.** Les courants statorique en charge au regime permanent avec deux barres cassées

On remarque dans la figure (4.14) une perturbation au niveau des courants statoriques qui est due à la cassure de la deuxième barre rotorique qui a augmenté à cet essai par rapport à l'essai à vide.



**Figure 4.15.** Le spectre d'harmonique en charge avec deux barres cassées

Ce défaut a provoqué l'augmentation des harmoniques de desequilibre et quelques harmoniques d'espace



4.3.4 Moteur avec défaut (3 barre cassée)

b Essai à vide

Dans cet essai on va casser une troisième barre par un troisième perçage dans le rotor et on va prendre les résultats depuis l'analyseur de spectre.



Figure 4.16. Rotor à cage avec trois barres cassées.

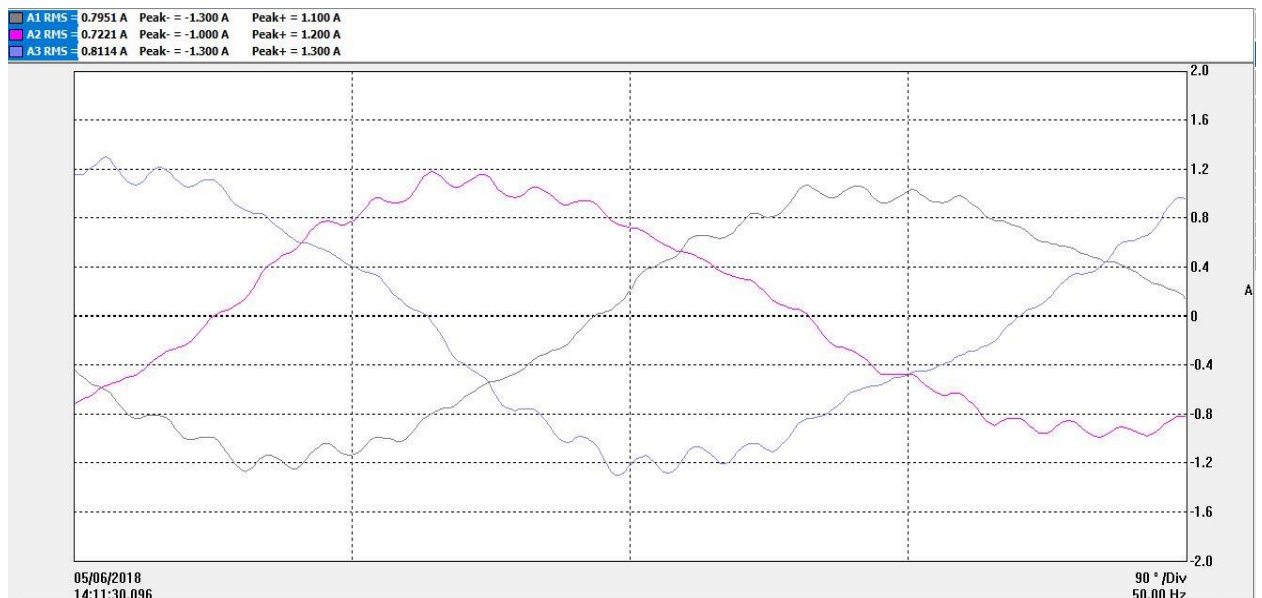
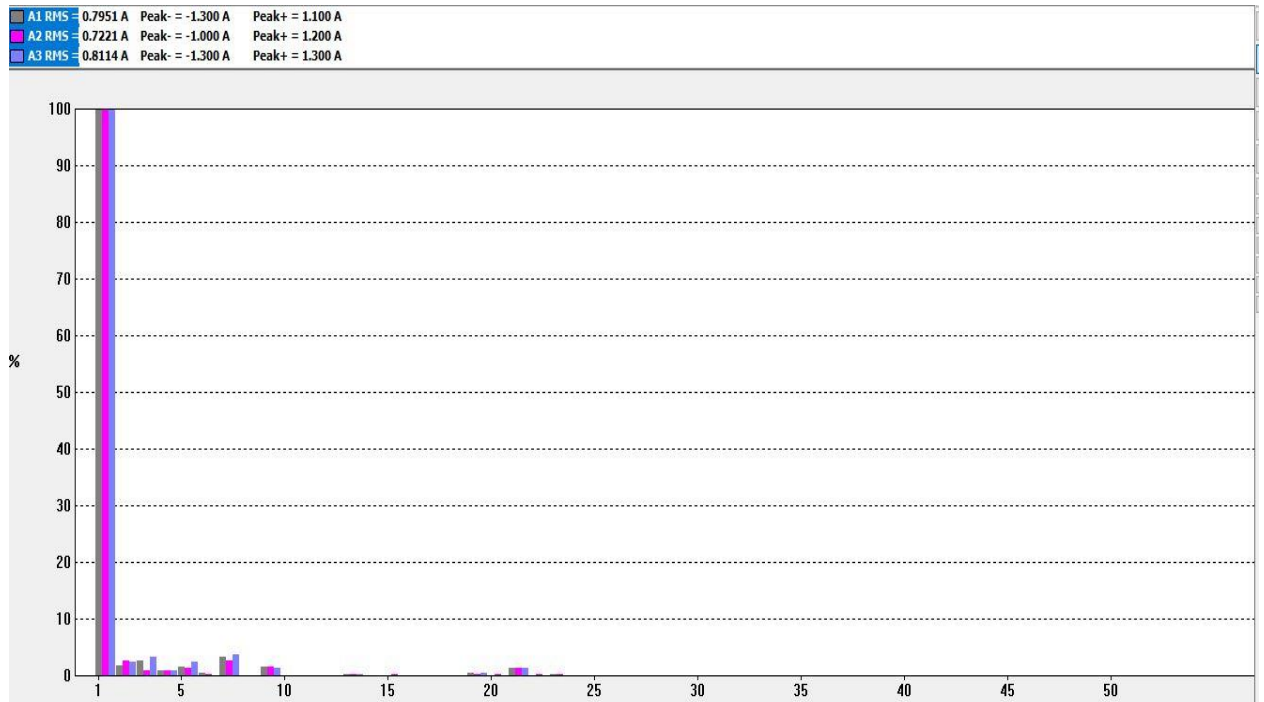
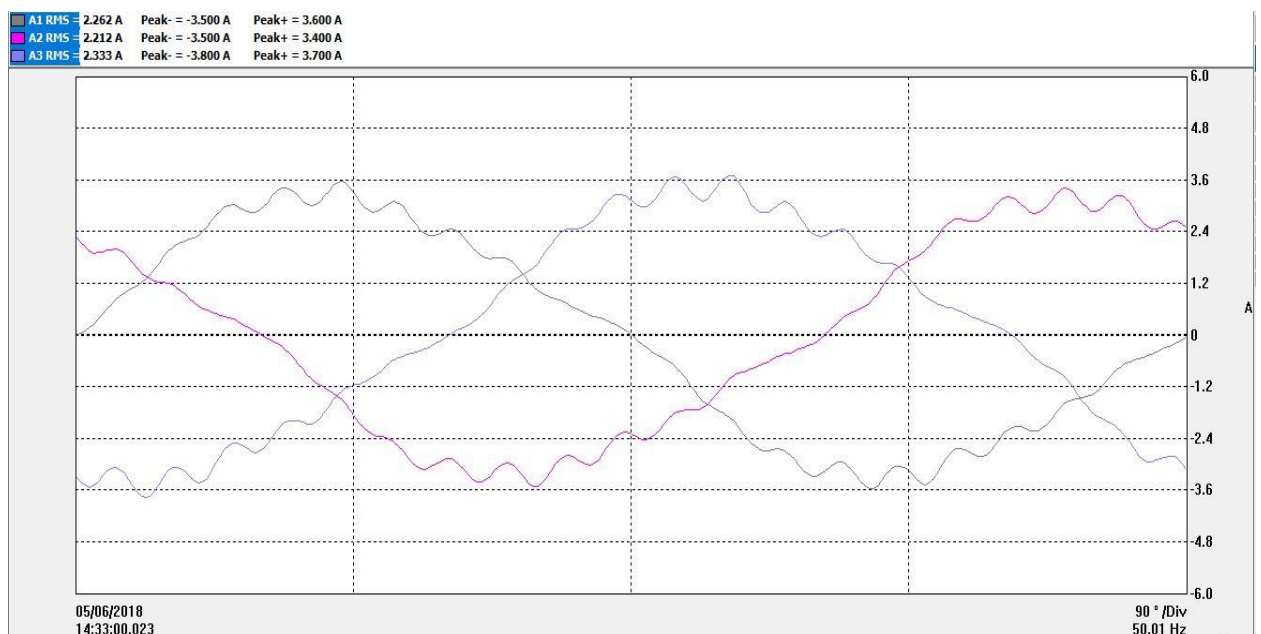


Figure 4.17. Les courants statorique à vide au regime permanent avec trois barres cassées

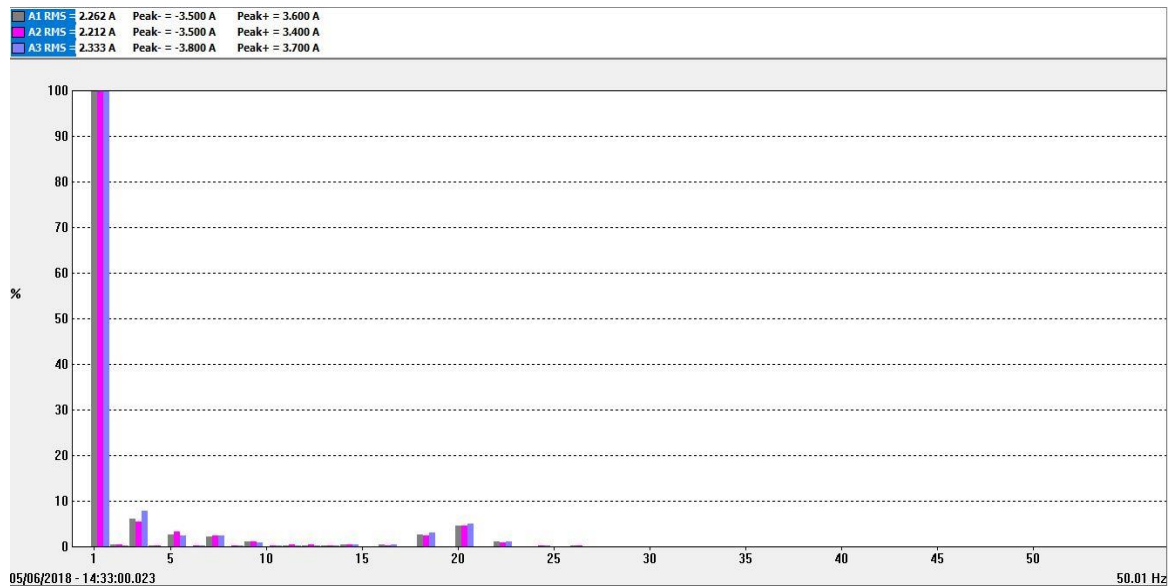


**Figure 4.18.** Le spectre d'harmonique à vide avec trois barres cassées

**B Essai en charge:** Dans cet essai on a appliqué une charge resistive equivalente de  $R=49\Omega$  avec une tension simple  $v=220V$ .



**Figure 4.19.** Les courants statorique en charge au regime permanent avec trois barres cassées



**Figure 4.20.** Le spectre d’harmonique en charge avec trois barres cassées

On remarque dans les figures (4.17) et (4.19) une perturbation au niveau des courants statoriques qui est due à la cassure de la troisième barre rotorique avec un decalage d’amplitude

Ce qui a provoqué l’apparition des harmoniques dues à l’asymetrie et au desequilibre des courants statoriques.

### 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé un essai pratique à l’aide d’un moteur asynchrone et une generatrice pour definir l’effet du defaut de cassure des barres rotoriques sur les grandeurs electriques et mecaniques du moteur.

Ces essais nous ont montré que la presence de ces defauts provoque une perturbation dans les courants statoriques, le couple et la vitesse et qui crée à son role des vibrations dans le moteur surtout au demarrage par contre on a pas pu observer la variation des harmoniques de l’ordre  $(1 \pm 2g)$ fs car l’analyseur qu’on a utilisé ne contient pas l’option d’observation du régime transitoire et il ne donne que les harmonique d’ordre Kfs avec  $K=1,2,3,\dots,50$ .

# *Conclusion générale*

Le travail établi dans ce mémoire nous a permis d'étudier et comparer le comportement de la machine asynchrone triphasé lors de la présence du défaut de cassure des barres rotoriques par des études théoriques et expérimentales et la réalisation du diagnostic de ce défaut par la méthode de l'analyse spectrale.

Dans ce contexte l'étude contient quatre parties :

Dans la première partie nous avons cité les différents défauts de la machine asynchrone triphasée en basant sur le défaut de cassure des barres et les méthodes de diagnostic les plus utilisées en basant aussi sur la méthode de l'analyse spectrale des courants statoriques.

Dans la deuxième partie nous avons entamé la conception assistée par ordinateur qui nous permet de concevoir la machine asynchrone à base des logiciels spécifiques spécialement le logiciel FLUX 2D lequel on a utilisé pour concevoir et simuler notre machine.

Dans le troisième chapitre nous avons décrit la méthode des éléments finis qui est à son rôle la base de calcul du logiciel FLUX 2D et on a fait la simulation et la modélisation d'une machine asynchrone réelle en tenant compte l'état sain et le défaut de cassure des barres rotoriques en fonction du temps qui donne le comportement des grandeurs électriques et mécaniques en citant les courants statoriques, le couple et la vitesse.

Le diagnostic de ces défauts s'est fait par la méthode de l'analyse spectrale des courants statoriques ou on a vu apparaître des variations dans les harmoniques adjacentes à la fondamentale de l'ordre  $(1 \pm 2g)fs$ .

Dans la quatrième partie on a fait l'étude expérimentale sur une machine asynchrone triphasée en produisant des défauts de cassure des barres l'une après l'autre jusqu'à atteindre 3 barres cassées ou on a pu visualiser les allures des courants statoriques et ses spectres d'harmoniques qui n'étaient pas très utiles car l'analyseur de spectre qu'on a avait et lequel on a utilisé ne donne que les harmoniques d'ordre  $(K.fs)$  avec  $K=1, 2, 3, \dots, 50$ .

En conclusion, ce travail nous a aidés bien de comprendre et connaître la méthode de l'analyse spectrale des courants statoriques dans le diagnostic du défaut de cassure des barres rotoriques dans la machine asynchrone à cage d'écureuil.

## *Bibliographie*

- [1] O. Sahraoui, "calcul des schemas equivalents de la machine asynchrone par la methode des elements finis", these de doctorat, institut national polytechnique de grenoble, france, 1994.
- [2] J. Niard, "machines electriques", edition fernand nathan, 1976.
- [3] A. Bouguerne, "diagnostic automatique des defauts des moteurs asynchrones", memoire magister, universite de constantine, 2009.
- [4] B. Mimi "Etude Des Machines Electriques Par Cao " Thèse de Doctorat, Universite Mentouri Constantine 2009
- [5] B. Vaseghi, "contribution a l'etude des machines electriques en presence de defaut entre-spires," these de doctorat, green - groupe de recherche en electrotechnique et electronique de nancy, nancy universite - institut national polytechnique de lorraine, 2009.
- [6] P. Tavner, I. ran, j. penman, and h. sedding, condition monitoring of rotating electrical machines, 2 ed. london, united kingdom: institution of engineering and technology, 2008.
- [7] A. Assam, « identification des machines asynchrones en vue de leurs diagnostics », these de magister de l'universite de setif, soutenue 2010.
- [8] D. Thailly, "etude du champ de dispersion des machines a courant alternatif : application au diagnostic," these de doctorat, laboratoire systemes electrotechniques et environnement (Isee), universite d'artois, bethune, france, 2007.
- [9] C. Sabonnadière, I. coulomb, «calcul des champs electromagnetiques», technique de l'ingenieur d 3020
- [10] P Blain "cao et méthodologie de conception article" école national superieure du petrole et des moteurs
- [11] Histoire de la cao en anglais sur [www.cadazz.com](http://www.cadazz.com) article creative commons attribution-share alike 3.0 unported//[creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)
- [12] A. H. Bonnett and c. yung, "increased efficiency versus increased reliability," *industry applications magazine, ieee*, vol. 14, pp. 29-36, 2008.
- [13] F. Wurtz, " une nouvelle approche pour la conception sous contraintes de machines electriques ", these de doctorat, institut national polytechnique de grenoble, france, 1996.
- [14] W. T. Thomson, "a review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrelcage induction motors—past, present and future," in *2nd ieee international symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives - sdemped '99*, gijon, spain, 1999, pp. 3-17.

- [15] O. V. Thorsen and M. Dalva, "failure identification and analysis for high-voltage induction motors in the petrochemical industry," *industry applications, ieee transactions on*, vol. 35, pp. 810-818, 1999.
- [16] S. Nandi, H. A. Toliyat, and L. Xiaodong, "condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review," *ieee transactions on energy conversion*, vol. 20, pp. 719-729, december 2005.
- [17] C. Espanet, " modelisation et conception optimale de moteurs sans balais a structure inversee: application au moteur roue " , these de doctorat en sciences de l'ingenieur, universite franchecomte, france, 1999
- [18] Mr R Hachlaf " introduction sur la cao des machines electrique" cours master 2 specialite machine electrique, universite blida 1 , 2017/2018
- [19] S. Bazine, "conception et implementation d'un meta-modele de machines asynchrones en defaut," these de doctorat, laboratoire d'automatique et d'informatique industrielle (l'aii) - ea 1219, universite de poitiers, 2009.
- [20] J. C. Sabonnadière, " conception assistee par ordinateur (cao) en genie electrique " , techniques de l'ingenieur, traite genie electrique, d 3 585, pp. 1-22.
- [21] P. Blain, " CAO et methodologie de conception " , techniques de l'ingenieur, b 2 810, pp.1-19.
- [22] M r H Miloud "etude des defauts dans la machine asynchrone a cage d'ecureuil par l'emploi de la fonction d'enroulement modifiee" ,these de magister ,faculte de genie electrique ,universite des sciences et de la technologie d' oran mohamed boudiaf, 2009
- [23] P.J. Travner, B.G. Gaydon and D.M. ward, "monitoring generator and large motors", i ee proceeeding may 1986
- [24] H. Razik, "le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de defaillance, un etat de l'art," *la revue 3ei*, vol. 29, pp. 48-52, juin 2002.
- [25] A. Ceban, R. Pusca, and R. Romary, "study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis," *ieee transactions on industrial electronics*, vol. pp, p. 12, 2011.
- [26] D.Yang and j.penman, "intelligent detection of induction motor bearing faults using current and vibration monitoring", proceeding of comadem 2000, 3-8 december 2000pages461-470.
- [27] T. Boumegoura, "recherche de signature electromagnetique des defauts dans une machine asynchrone et synthese d'observateurs en vue du diagnostic," these de doctorat, ecole centrale de lyon ecully, fance, 2001.

- [28] E. Schaeffer, "diagnostic des machines asynchrones : modeles et outils parametriques dedies a la simulation et a la detection de defauts," these de doctorat, institut de recherche en cybernetique de nantes, école centrale de nantes, nantes, france, 1999.
- [29] F. Filippetti, G. Franceschini, and C. Tassoni, "neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults," *iee transactions on industry applications*, vol. 31, pp. 892- 899, july/august 1995.
- [30] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, "ai techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect," *iee transactions on industry applications*, vol. 34, pp. 98-108, january/february 1998.
- [31] C. G. Dias, I. E. Chabu, and M. A. Bussab, "hall effect sensor and artificial neural networks applied on diagnosis of broken rotor bars in large induction motors," in *iee international conference on computational intelligence for measurement systems and applications - cimsa 2006*, 2006, pp. 34-39.
- [32] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G. A. Capolino, "advances in diagnostic techniques for induction machines," *iee transactions on industrial electronics* vol. 55, pp. 4109-4126, december 2008.
- [33] G. Salles, F. Filippetti, C. Tassoni, G. Crellet, and G. Franceschini, "monitoring of induction motor load by neural network techniques," *iee transactions on power electronics*, vol. 15, pp. 762-768, 2000.
- [34] M. A. Awadallah and M. M. Morcos, "application of ai tools in fault diagnosis of electrical machines and drives-an overview," *iee transactions on energy conversion*, vol. 18, pp. 245-251, 2003.
- [35] S. Altug, C. Mo-Yuen, and H. J. Trussell, "fuzzy inference systems implemented on neural architectures for motor fault detection and diagnosis," *iee transactions on industrial electronics*, vol. 46, pp. 1069-1079, 1999.
- [36] S. B. Makarand, J. K. Zafar, M. S. Hiralal, and L. S. Ram, "adaptive neural fuzzy inference system for the detection of inter-turn insulation and bearing wear faults in induction motor," *iee transactions on industrial electronics*, vol. 54, pp. 250-258, 2007.
- [37] H. Razik and G. Didier, "on the monitoring of the defects of squirrel cage induction motors," in *power tech conference proceedings, 2003 iee bologna*, 2003, p. 6 pp. vol.2.
- [38] H.Noura, " modelisation des machines asynchrones triphasees a cage en vue du diagnostic par la methode des elements finis ," these de doctorat , universite mohamed kheider -biskra , 2015
- [39] L .Meftah , " simulation et commande de la machine asynchrone double etoile pour aerogeneration ," these de magister, universite ferhat abbas setif 1, 2014

- [40] M. B Smail "contribution a la detection et au diagnostic des defauts dans un systeme machine a induction-convertisseur", these de doctorat, universite batna 2, decembre 2016.
- [41] Ho.Yacine, M. Mohammed, « emploi de l'approche des vecteurs de park a la detection des defauts rotoriques du moteur a induction », these d'ingenier d'etat, juin 2005, usto
- [42] A.Mellakhi N. Benouzza A.Bendiabdellah , " analyse spectrale du courant statorique pour detecter les cassures de barres dans les moteurs asynchrones triphases a cage en tenant compte des harmoniques d'espace " universite hassiba benbouali de chlef, universite des sciences et technologie d'oran 2010
- [43] D. Gaetan, « modelisation et diagnostic de la machine asynchrone en presence de defaillance», these de doctorat, octobre 2004, nancy i.
- [44] R.Kasmir, « Diagnostic des defauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes», Lyon, decembre 2003 [5] Hubert Razik , « Le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de defaillance, un etat de l'art ». Juin h