

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on considère la simulation du modèle multi enroulements, permettant de représenter les différentes courbes du courant statorique, du courant dans les barres rotoriques, du couple et de la vitesse. La simulation est effectuée dans différentes conditions de fonctionnement : la machine à l'état sain et avec défaut. En suite, on présente une analyse détaillée des différents défauts rotoriques et statoriques. Cette analyse a pour objectif d'analyser les phénomènes observés sur les grandeurs électriques et mécaniques du moteur, tels que les oscillations du couple et de la vitesse, ainsi que la modulation de l'enveloppe du courant statorique.

III.2 Simulation du modèle de la machine asynchrone

Une fois le modèle de la machine asynchrone à cage établi, nous pouvons aborder l'aspect lié à la simulation de celle –ci en utilisant MATLAB 6.5 SIMILINK. Cela permet de mettre en évidence le comportement du moteur asynchrone dans le cas où le rotor est sain et dans le cas où le rotor est défaillant.

III.2.1 Résultat de simulation

Les paramètres de la machine utilisée en simulation sont donnés en annexe1.

III.2.1.1 Cas d'un modèle global multi enroulements

A. Cas d'une machine saine

Sur la figure du courant statorique, le courant de démarrage atteint presque la valeur 5 fois le courant nominal. L'allure de la courbe de la vitesse est similaire à celle d'un système du premier ordre. Lors de l'application d'une charge la vitesse diminue.

Quant au couple électromagnétique, il est fortement pulsatoire, pendant le régime transitoire, ce qui explique le bruit engendré par la partie mécanique.

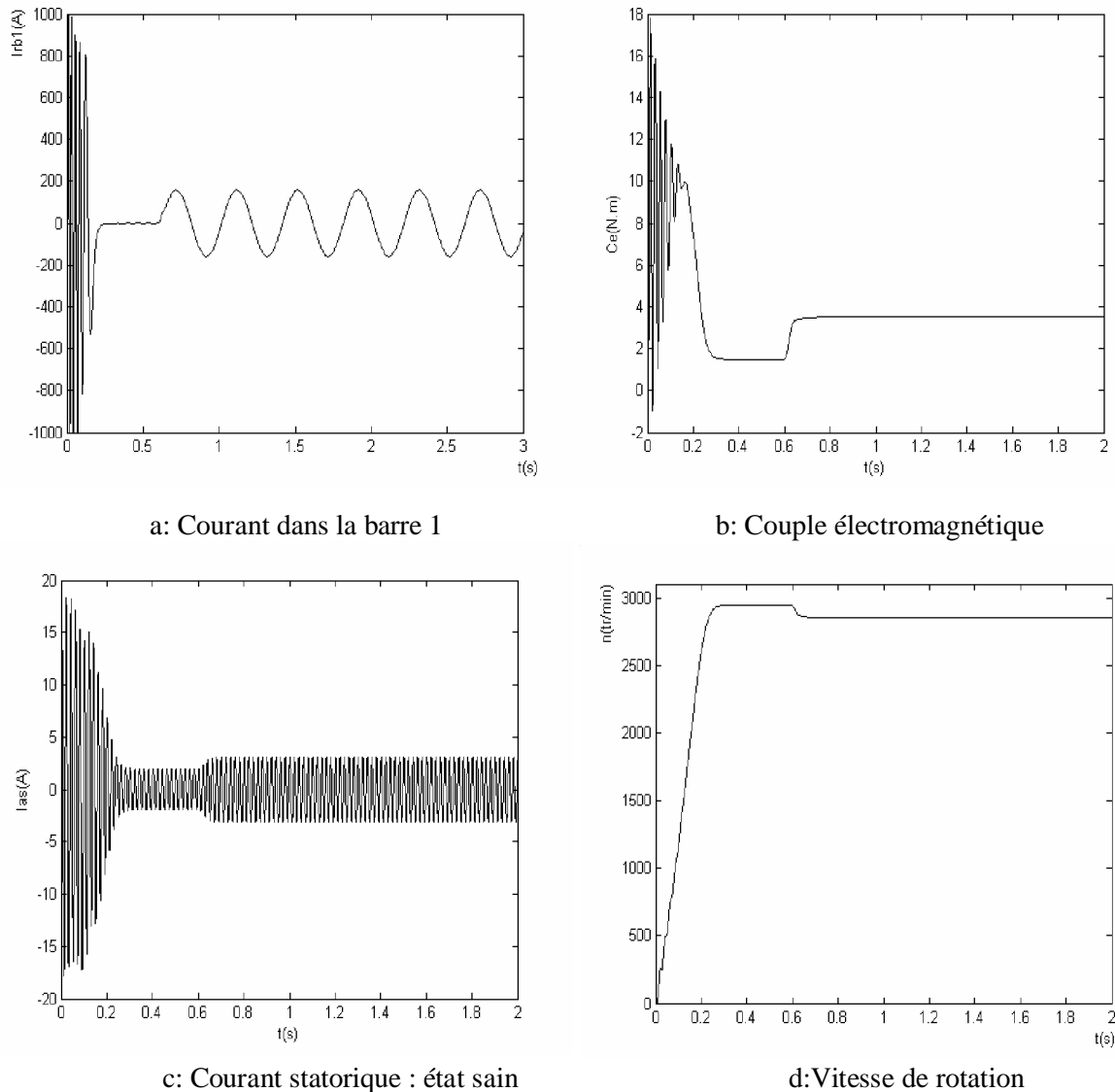


Figure III.1 : Simulation avec modèle global : en charge $C_r=3.5\text{N.m}$ machine saine
Alimentation sans onduleur

B. Cas d'une machine avec défaut rotorique

a- Cas d'une cassure de deux barres adjacentes

- A l'instant $t=0.6\text{s}$ on charge le moteur par $C_r=3.5\text{N.m}$. On remarque des ondulations dans les courants rotoriques. Ceci est dû à l'augmentation du glissement qui influe directement sur la fréquence des courants rotoriques ($f_r=g.f_s$).

- A l'instant $t=1\text{s}$ on simule la cassure de la barre 1. On remarque dans la figure que le courant dans cette barre diminue fortement.

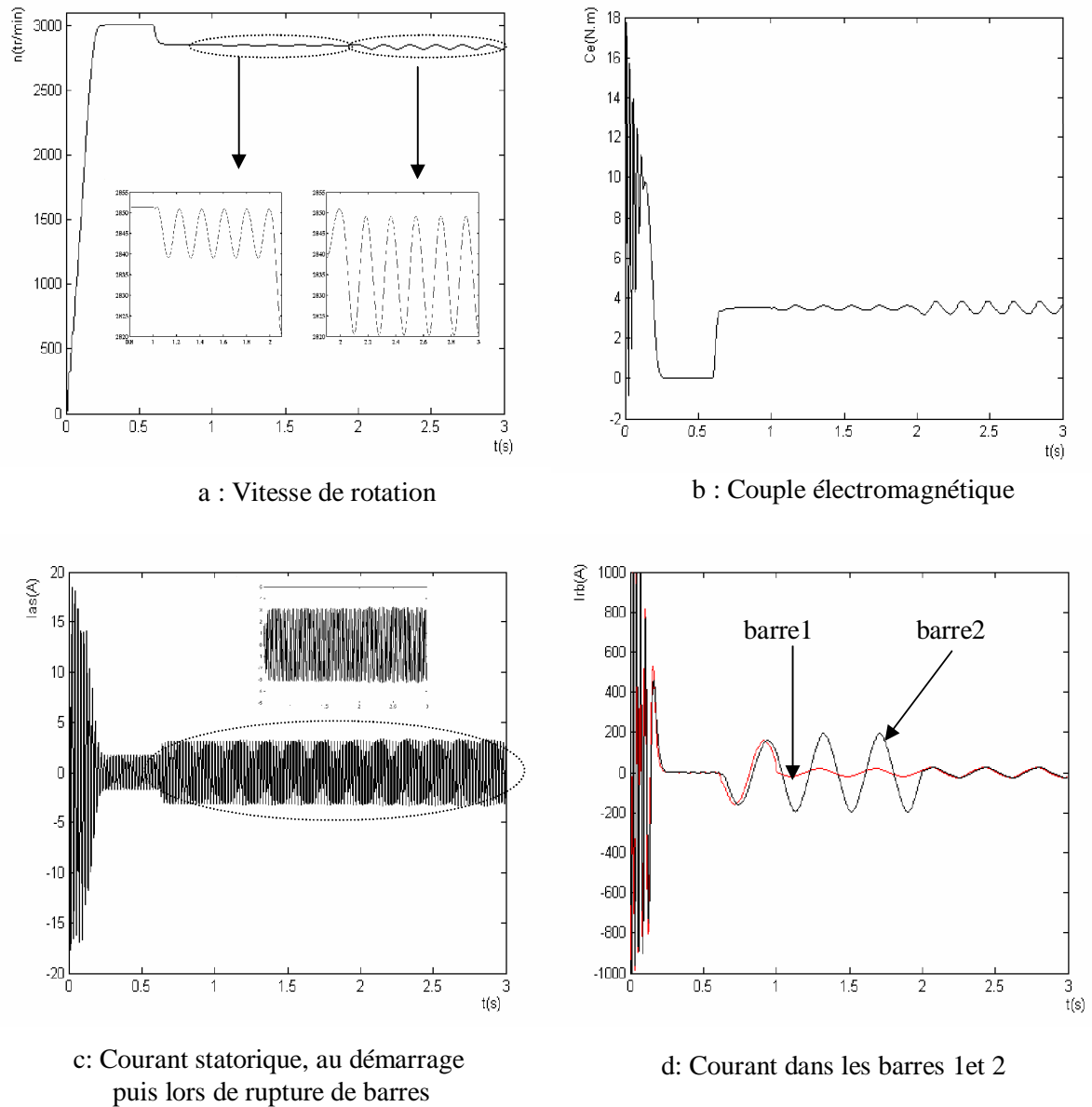


Figure III.2 : Simulation avec le modèle global : en charge ($C_r=3.5\text{Nm}$), avec rupture de deux barres adjacentes à $t=1\text{s}$, alimentation de la machine sans onduleur

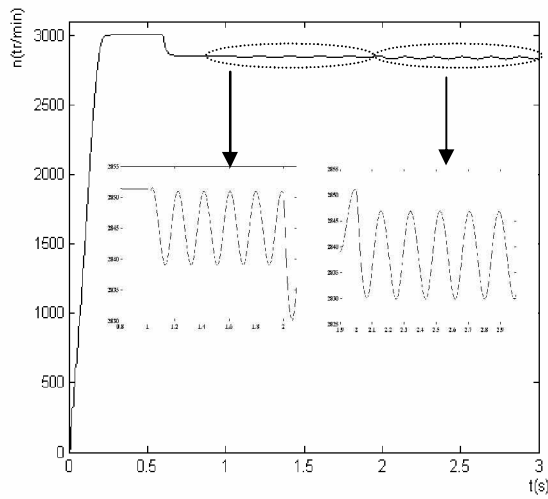
b-Cas d'une cassure de deux barres espacées

Dans la simulation suivante, on va supposer deux défauts successifs: rupture de barres espacées:

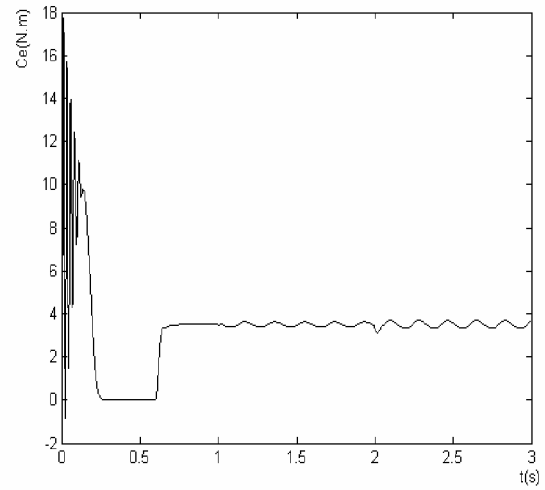
-rupture de la barre 1 à $t=1\text{s}$,

-rupture de la barre 7 à $t=2\text{s}$.

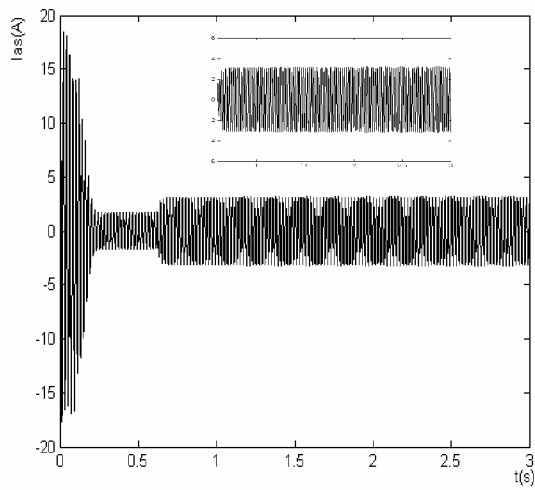
La machine était initialement saine et chargée $C_r=3.5\text{N.m}$.



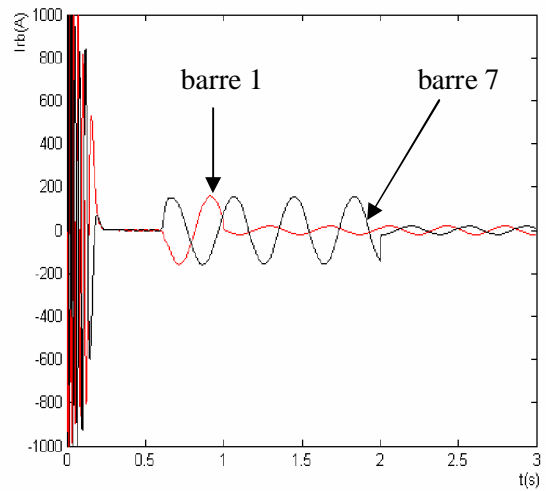
a: Vitesse de rotation



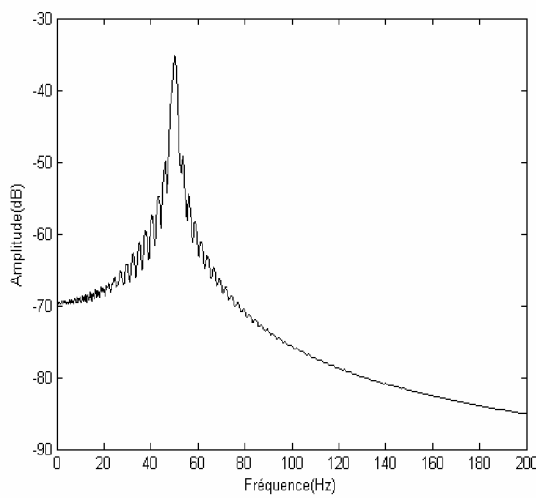
b: Couple électromagnétique



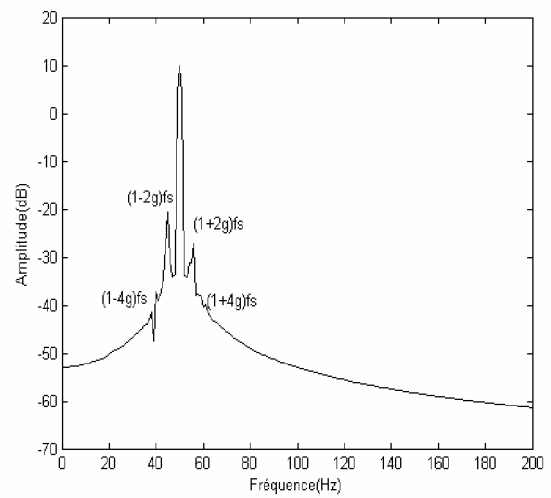
c: Courant statorique



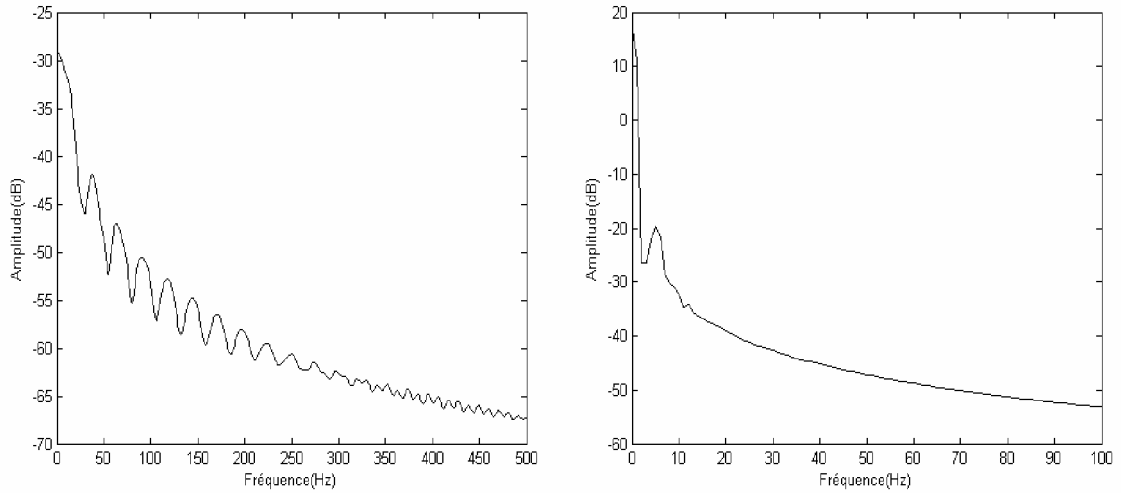
d: Courant dans les barres 1 et 7



e: Spectre du Ias état sain



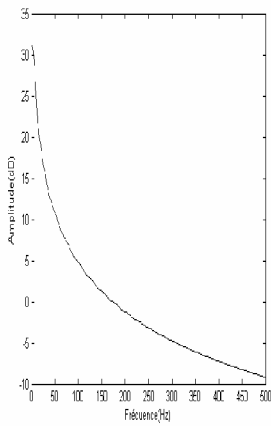
f: Spectre du Ias avec rupture de barre 1 puis 2 à partir de t=1s



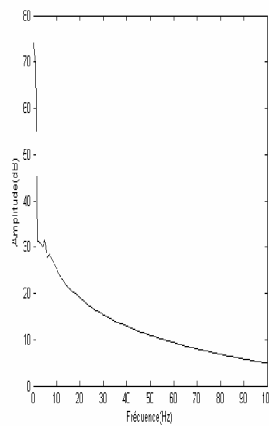
g: Spectre du couple électromagnétique

une seul barre cassée

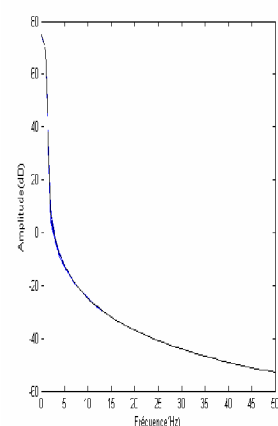
deux barres cassées



état sain



rupture de barre1



rupture de deux barres

h: Spectre de Vitesse

Figure III.3 : Simulation avec le modèle global : en charge ($C_r=3.5Nm$), avec rupture de barre 1 à $t=1s$ et à $t=2s$ barre7 cassée (alimentation sans onduleur)

III.2.1.2 Cas d'un modèle réduit

Dans le schéma de simulation Figure.III.4, trois blocs différents vont apparaître :

- Un bloc "mécanique" qui traduit l'équation du mouvement expression 2-25,
- Un bloc "électrique" qui traduit l'équation expression 2-33,
- Un bloc "électromécanique" qui traduit l'équation 2-38 du couple.

Le schéma bloc utilisé pour la simulation est le suivant :

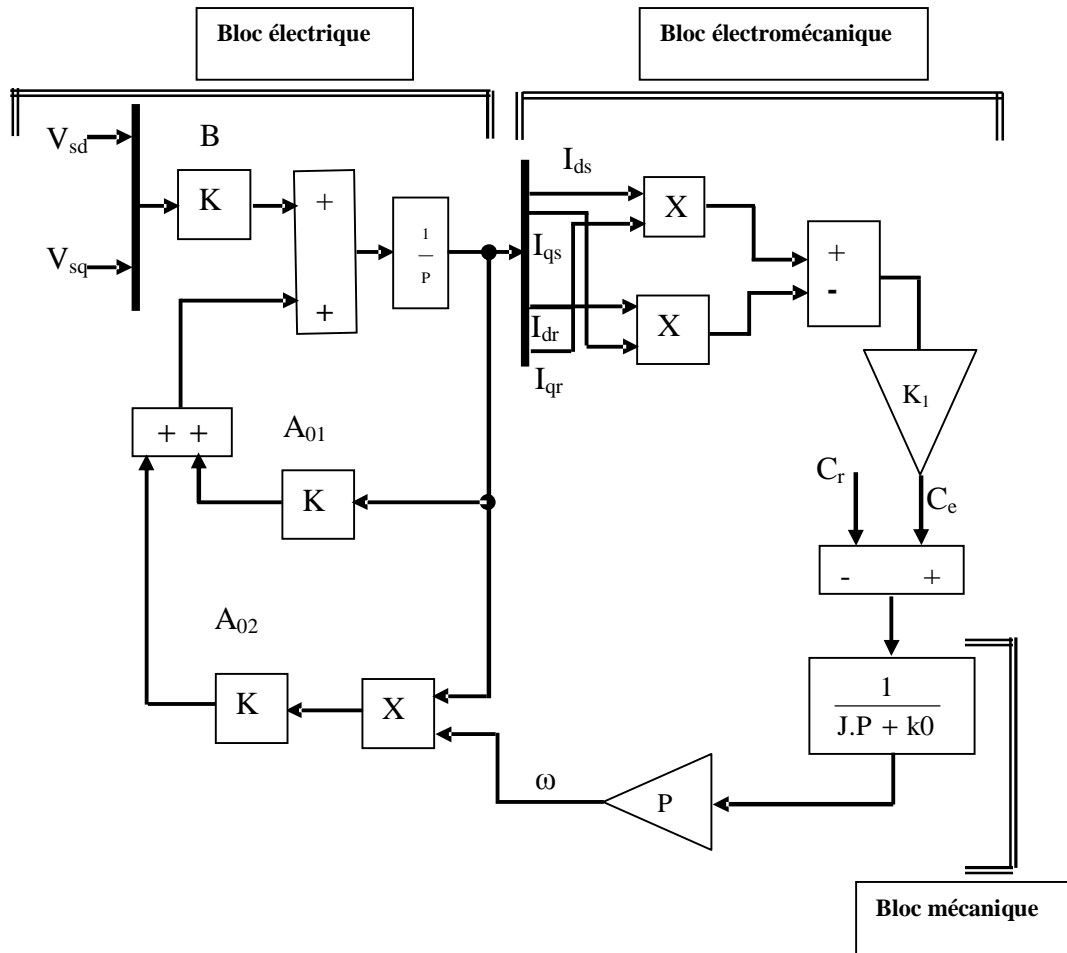


Figure III.4 : Schéma de simulation en SIMULINK de modèle réduit

Le modèle (2-33) de la machine multi- enroulements permet de déterminer les matrices inductances et résistance.

La matrice inductances est donnée par :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -N_r \frac{M_{sr}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & -N_r \frac{M_{sr}}{2} & 0 \\ -\frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rdq} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rdq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix}$$

Soit : $[B] = [L]^{-1}$

La matrice A est donnée par :

$$A = A_{01} + \omega_r \times A_{02}$$

avec:

$$[A_{01}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{rdd} & R_{rdq} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rqd} & R_{rqq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

et:

$$[A_{02}] = \begin{bmatrix} 0 & -L_{sc} & 0 & N_r \frac{M_{sr}}{2} & 0 \\ L_{sc} & 0 & -N_r \frac{M_{sr}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A- Cas d'une machine fonctionnant à vide

L'essai consiste en un démarrage de la machine, à vide, sous pleine tension. On relève la vitesse, le courant de la phase.

Il est difficile de détecter le défaut quand la machine n'est pas chargée.

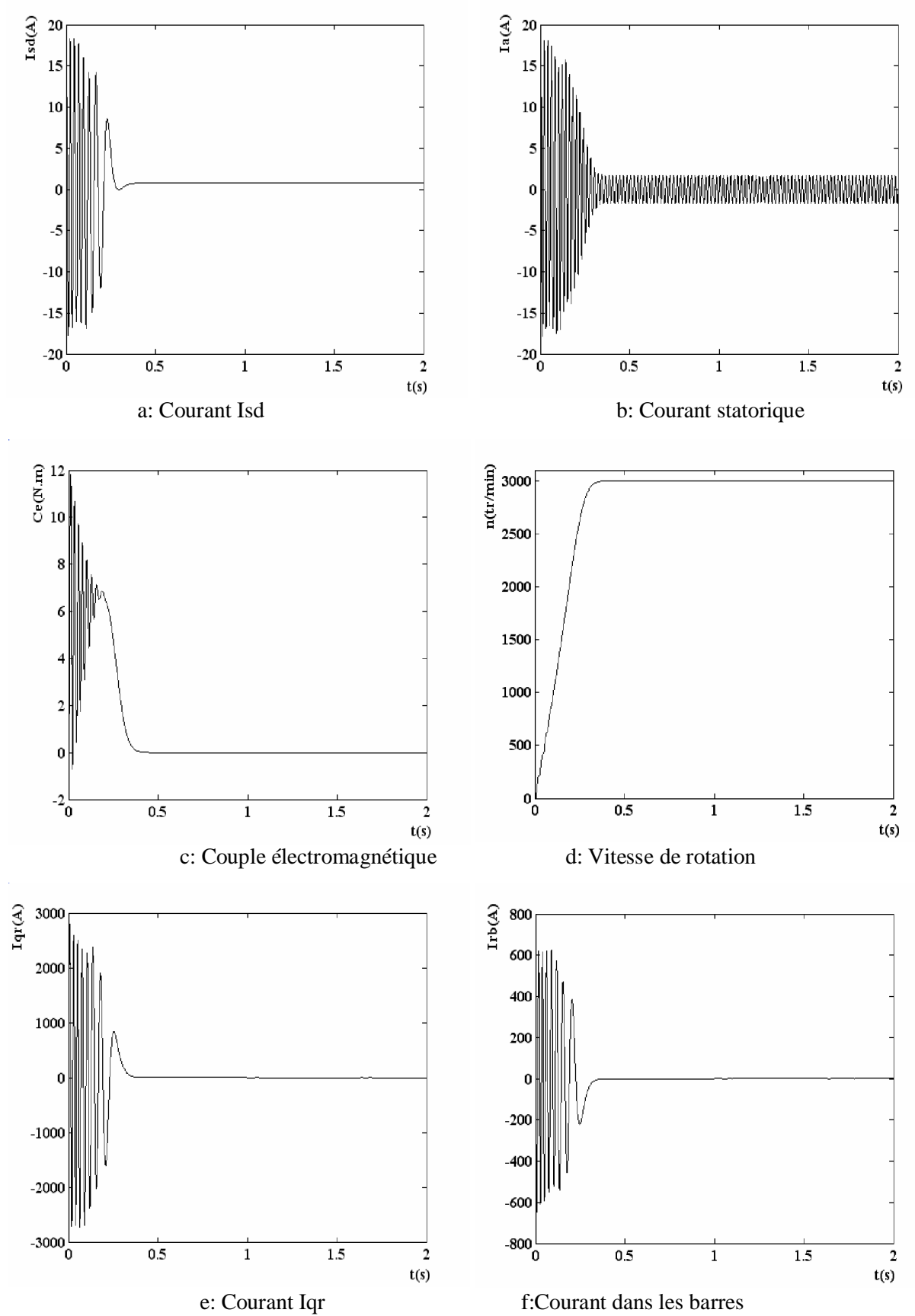
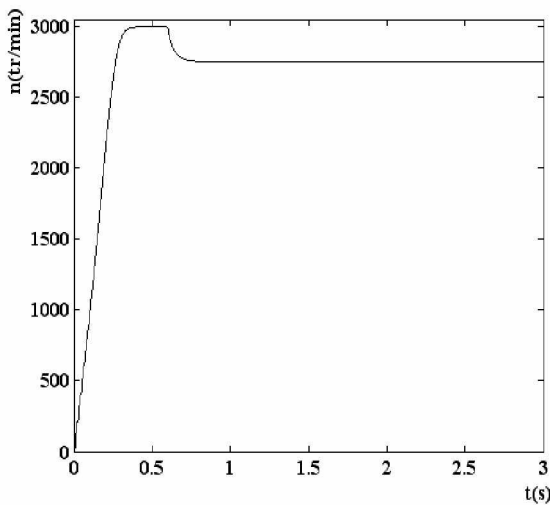


Figure III.5 : simulation avec le modèle réduit : machine non chargée (état sain)

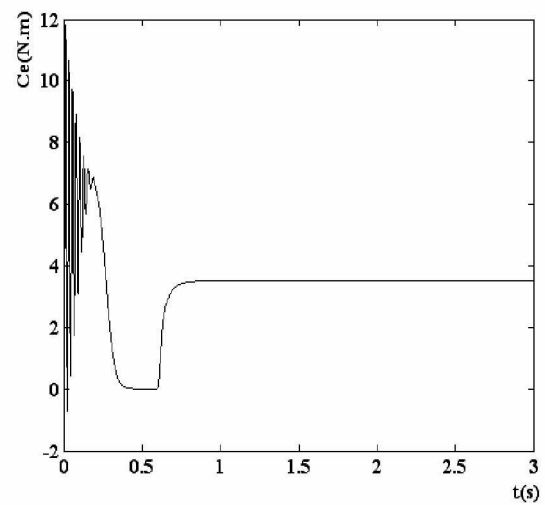
B- Cas d'une machine saine

Pour observer le comportement du modèle simulé, un couple de 3.5 Nm est appliqué à la machine à l'instant $t=0.6s$. Ce couple représente le couple nominal de la machine réelle étudiée.

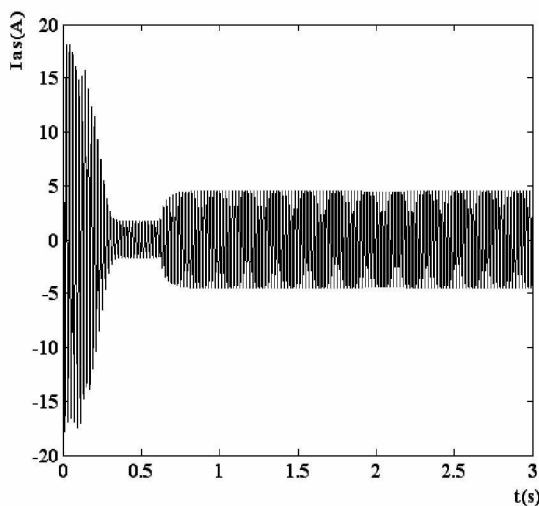
La simulation du modèle du moteur asynchrone avec un rotor sain donne, pour la vitesse, la courbe de la figure (III-6-a). Le couple électromagnétique est présenté à la figure (III-6-b) Les courants statoriques et rotoriques sont représentés sur les figures (III-6-c) (III-6-d). Toutes ces courbes correspondent bien à un fonctionnement normal d'un moteur asynchrone.



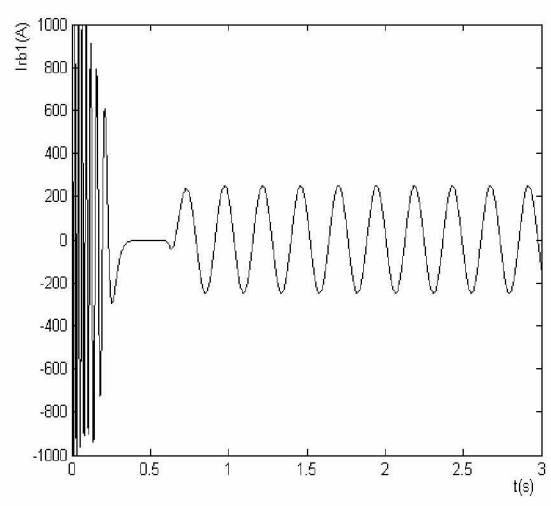
a: Vitesse de rotation à l'état sain



b: Couple électromagnétique



c: Courant statorique



d: Courant dans la barre 1

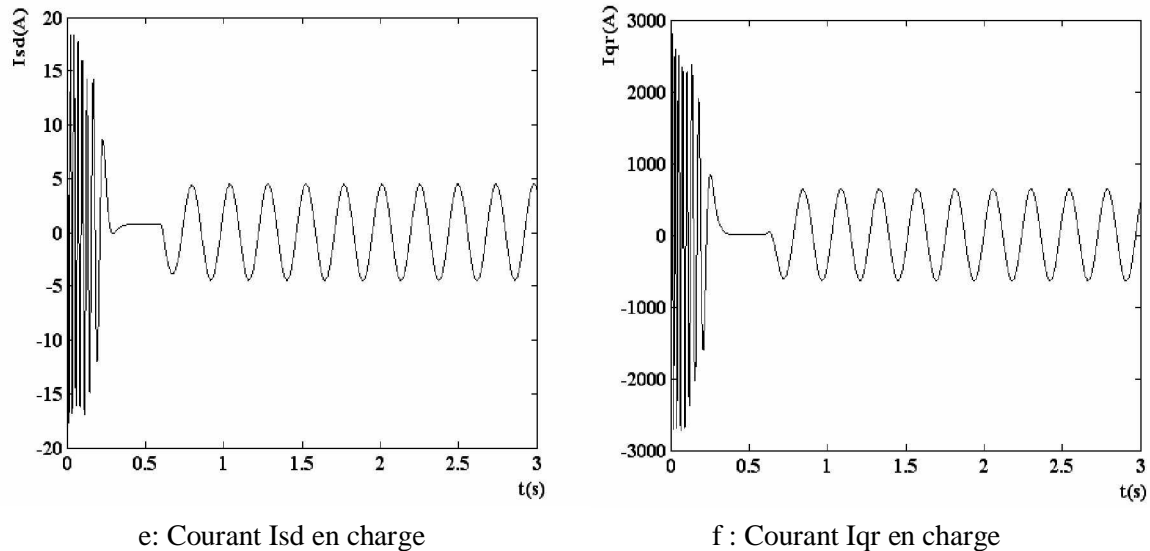


Figure III. 6 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5\text{N.m}$)
Alimentation sans onduleur

A l'instant $t=0.6\text{s}$, nous appliquons un échelon de couple résistant $C_r=3.5\text{ N.m}$. Les courants des barres rotoriques sont très importants. Ils peuvent atteindre 1000A en régime transitoire. Les figures (III-6) montrent l'évolution du couple électromagnétique, de la vitesse et du courant statorique. Les formes des graphes montrent qu'en phase de démarrage le moteur subit un allongement du régime transitoire. A titre d'exemple, nous prenons la courbe du couple électromagnétique. Cette dernière comprend au début une série d'oscillations d'amplitude élevées qui s'amortissent au cours de l'accélération du moteur, à la fin du régime de démarrage (0.45s . Figure III-6-b). Le couple atteint sa valeur maximale, puis s'atténue pour atteindre la valeur du couple résistant.

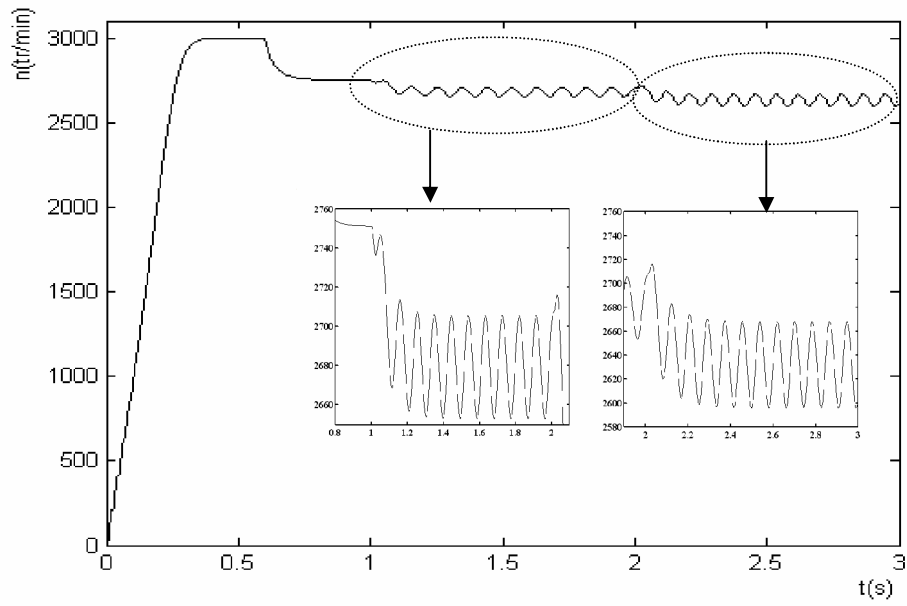
C- Cas d'un défaut de cassure de barre

a- Cas d'une cassure de deux barres adjacentes

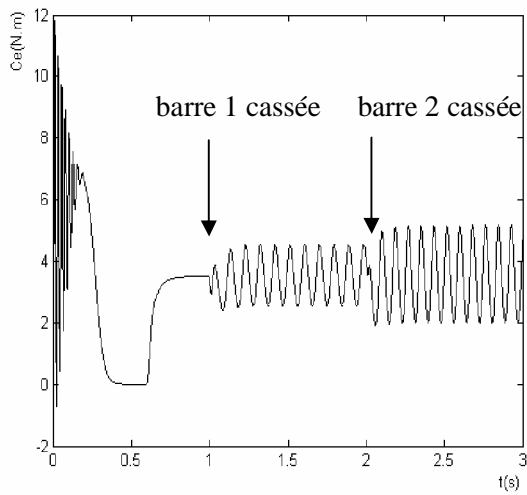
Dans la simulation suivante, on va supposer deux défauts successifs : rupture de barres adjacentes :

- rupture de la barre 1 à $t=1\text{s}$,
- rupture de la barre 2 à $t=2\text{s}$.

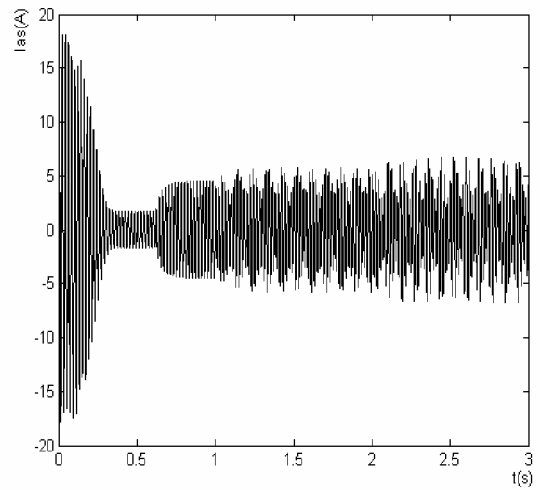
La machine était initialement saine et chargée $C_r=3.5\text{ N.m}$



a: Vitesse de rotation



b: Couple électromagnétique



c: Courant statorique

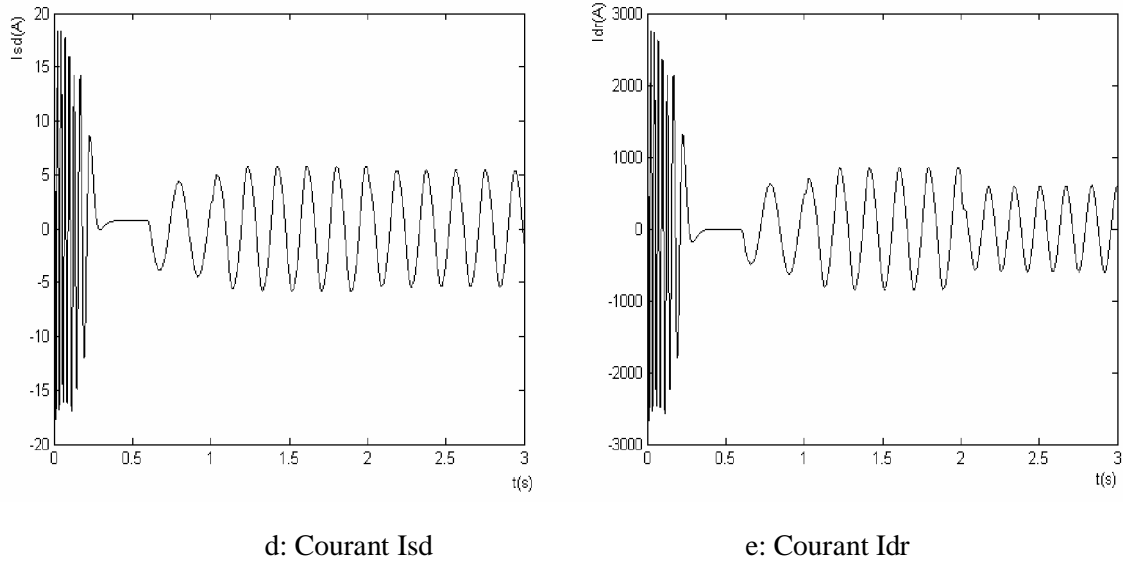


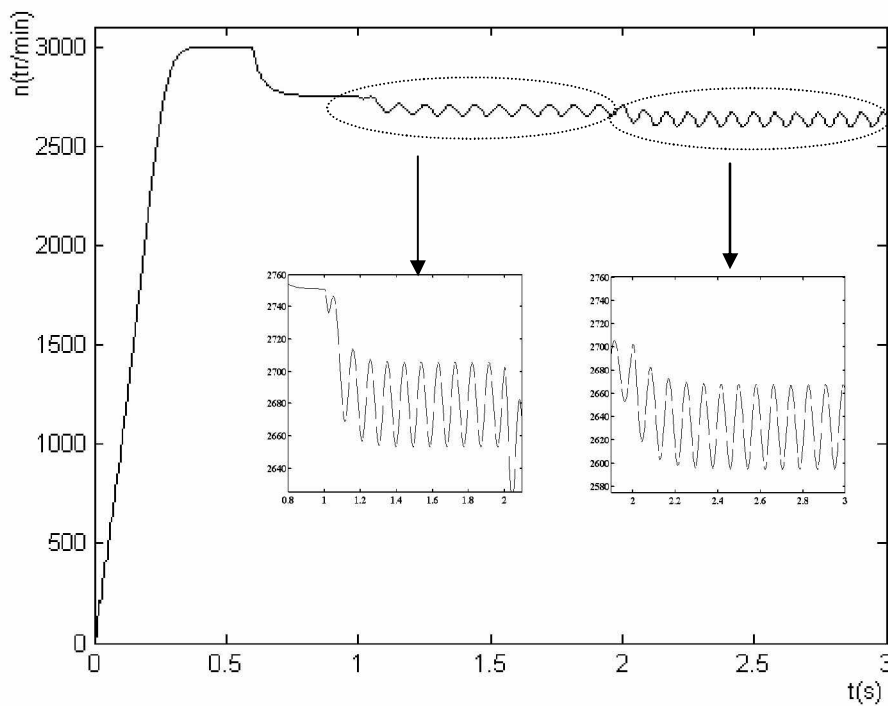
Figure III.7 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge $C_r=3.5 \text{ N.m}$ avec rupture successive des barres '1 puis 2' à partir de $t=1\text{s}$

b- Cas d'une cassure de deux barres espacées

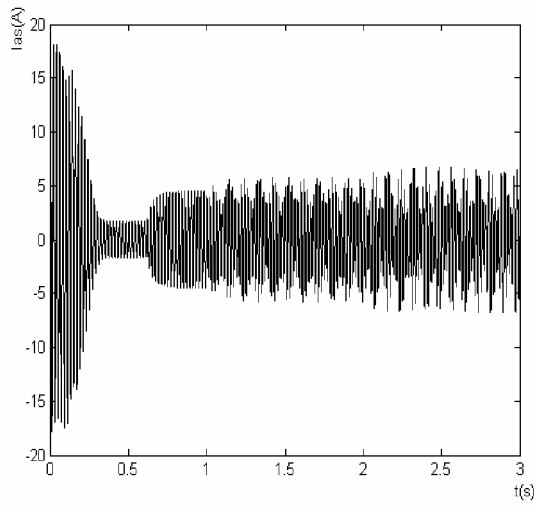
Dans la simulation suivante, on va supposer deux défauts successifs de rupture de barres espacées:

- rupture de la barre 1 à $t=1\text{s}$,
- rupture de la barre 7 à $t=2\text{s}$.

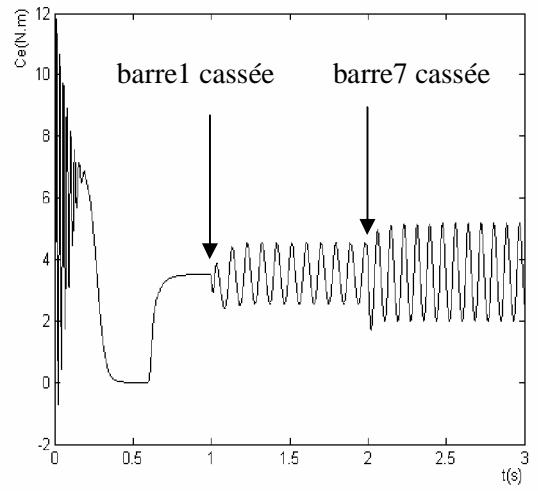
La machine était initialement saine et chargée $C_r=3.5\text{N.m}$.



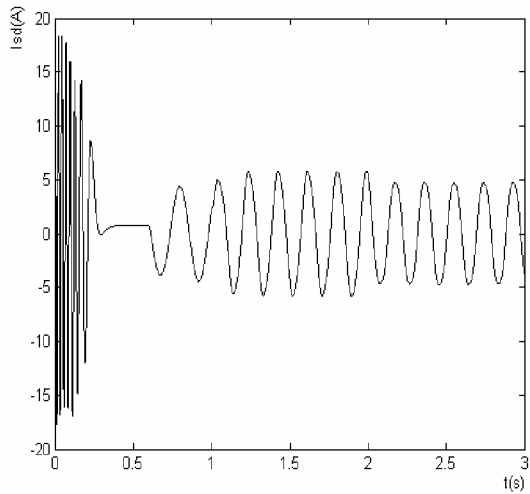
a: Vitesse de rotation



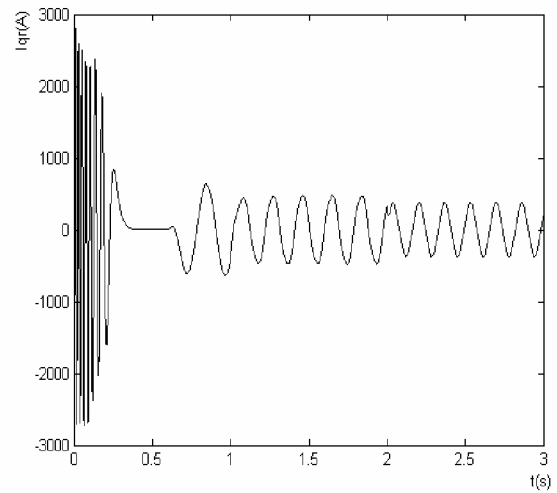
b: Courant statorique



c: Couple électromagnétique



e: Courant Isd



f: Courant Iqr

Figure III.8 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge, saine puis défectueuse à partir de $t=1$ s

III.2.1.3 Interprétation des résultats

A. Les défauts de rupture de barres se traduis :

- a- dans les courbes du courant statorique : par l'apparition d'une modulation d'amplitude,
- b- dans les courbes du courant rotorique : par la déformation des oscillations initialement sinusoïdales.

B. Pour simuler la rupture de la 1^{ère} barre, on augmente sa résistance de 11 fois. Il s'ensuit une augmentation de la valeur efficace du courant dans les barres voisines de la barre cassée. Le phénomène est d'autant plus remarquable que les barres cassées sont espacées et que leur nombre est relativement grand.

C. Au moment de l'apparition du défaut, les grandeurs électriques sont caractérisées, par rapport au régime normal, par des variations brusques.

III.3 Techniques d'analyses des défauts

Pour effectuer le diagnostic dans une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de paramètres, tel que la température, le bruit, les vibrations... En s'appuyant sur leur expérience, ces symptômes ne sont que la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables.

L'analyse spectrale du signal, est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, en particulier les ruptures de barres au rotor, la dégradation des roulements, les excentricités, les court circuits dans les bobinages. Les méthodes d'analyse spectrale sont principalement utilisées dans les machines directement alimentées par le réseau et fonctionnant en régime permanent [ABE 02] [BOU01].

Toutes les méthodes de traitement de signal disponibles pour le diagnostic des machines tournantes peuvent être classées dans quatre groupes différents : l'analyse spectrale, l'analyse cepstrale, l'analyse temporelle, l'analyse temps -fréquence ou temps- échelle. Dans ce qui suit, on présente quelques méthodes qui sont utilisées dans le diagnostic des ruptures de barres.

III.3.1 Analyse spectrale

L'analyse spectrale est certainement la méthode la plus naturelle pour le diagnostic des barres cassées. En règle générale, la seule grandeur intéressante accessible au stator est le courant et l'intérêt de son analyse spectrale est de pouvoir détecter et identifier l'élément défectueux en fonction de sa fréquence.

Pour obtenir le spectre en fréquence, il existe plusieurs méthodes. On distingue principalement deux approches :

- les méthodes non-paramétriques,
- les méthodes paramétriques.

III.3.1.1 Méthodes non- paramétriques

Pour ces méthodes, on trouve tous les estimateurs à base d'analyse de Fourier.

Les spectres basés sur l'utilisation de la transformation de Fourier sont obtenus :

- soit par le calcul direct sur des segments d'échantillons temporels, puis au moyen de la transformée de Fourier, des segments pondérés par une fenêtre d'apodisation
- soit par le calcul du spectre sur la fonction d'auto corrélation [ABE 02].

III.3.1.2 Méthodes paramétriques

Les méthodes d'analyse fréquentielles paramétriques sont basées sur la détermination d'un modèle représentant le signal à analyser et pour lequel les paramètres sont utilisés pour estimer le spectre de puissance. L'estimation du spectre nécessite trois étapes. La première consiste à sélectionner un type de modèle. Ensuite, on estime les paramètres du modèle retenu en utilisant les échantillons du signal. La dernière étape enfin, concerne l'estimation spectrale à partir des paramètres du modèle estimé [ABE 02] [BOU01].

III.3.2 Analyse cepstrale

Cette méthode est utilisée en analyse vibratoire et dans le cas du diagnostic de réducteurs. Il a été prouvé qu'en calculant le cepstre, on identifie clairement la présence des raies.

III.3.3 Méthodes de détections de fréquence connues

Ces méthodes reposent sur le principe que les défauts se caractérisent par l'apparition ou le renforcement d'une raie à une fréquence fixe ou proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

III.3.4 Méthodes temps- fréquence et temps –échelle

III.3.4.1 Temps - fréquence

Les méthodes d'analyse temps – fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non stationnaires [ABE 02]. Plus généralement, elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps. Pour décrire cette évolution temporelle, il faut réaliser une analyse spectrale évolutive, d'où les méthodes temps fréquence. Parmi les techniques de l'analyse temps fréquence, la transformation de Wigner – Ville permet des diagnostics précis. Cette transformation est une fonction réelle qui définit une distribution d'énergie dans le plan temps- fréquence. Elle peut être interprétée comme une densité spectrale instantanée [BOU01].

Cependant, cette analogie est tempérée par l'existence de valeurs négatives qui en rendent l'interprétation délicate. Des procédures de lissage (fréquentiel et temporel) par fenêtrage permettent de réduire les interférences entre les différentes composantes fréquentielles du signal. La représentation temps fréquence a permis ainsi de mettre en évidence la modulation de fréquence linéaire en fonction du temps. Le temps de calcul d'une représentation temps-fréquence peut être prohibitif. De plus l'inter présentation d'une image est souvent difficile.

III.3.4.2 Temps- échelle

Ce mode de représentation est utilisé pour détecter des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquence différentes rencontrés dans un signal. La transformation en ondelette a été formalisée par Grossman et Morle.

III.3.2 Application de l'analyse spectrale

Il existe de nombreux types de fenêtres qui privilégient des aspects particuliers par rapport aux autres. Il convient donc de choisir la fenêtre adéquate pour le signal en fonction du problème particulier que l'on doit résoudre.

Cette caractéristique porte essentiellement sur trois points :

- la largeur et la hauteur du lobe principal,
- la hauteur du premier lobe secondaire,
- l'atténuation des lobes secondaires,

On utilise la fenêtre de hanning.

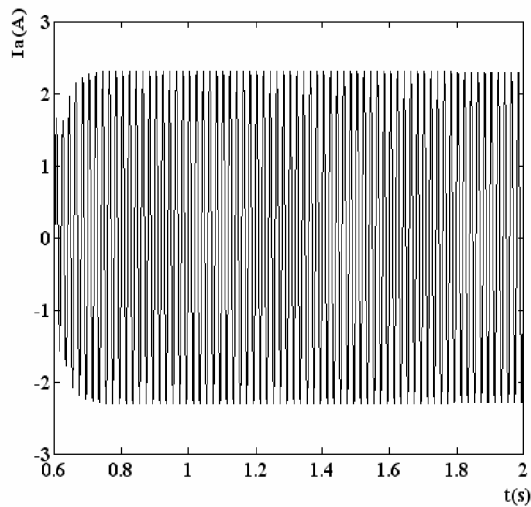


Figure III.9.1 : Courant statorique état sain

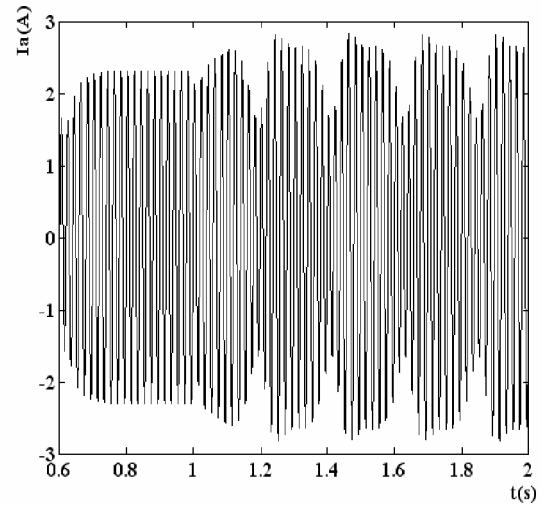


Figure III.9.2: Courant statorique avec une barre cassée

Lors de la rupture de barre, il est difficile d'analyser directement le courant statorique. Ce dernier ne présente en effet qu'une faible modulation (figure III.9.2).

L'analyse par FFT permet de mettre en évidence les raies présentes dans le spectre du signal.

Nous présentons les résultats de simulation de l'analyse du courant statorique par FFT en régime permanent en charge.

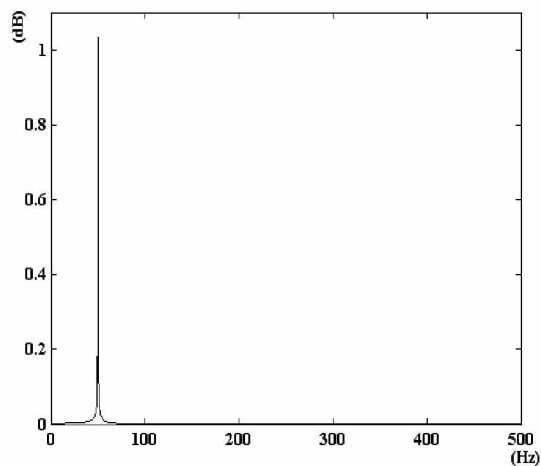


Figure III.9.3. Spectre linéaire du courant (machine saine)

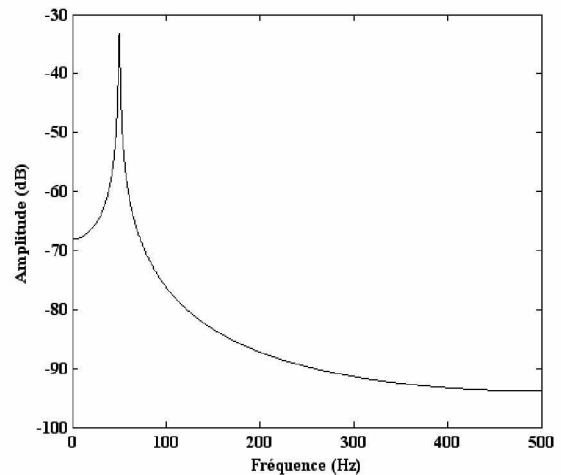


Figure III.9.4. Spectre du courant statorique (machine saine)

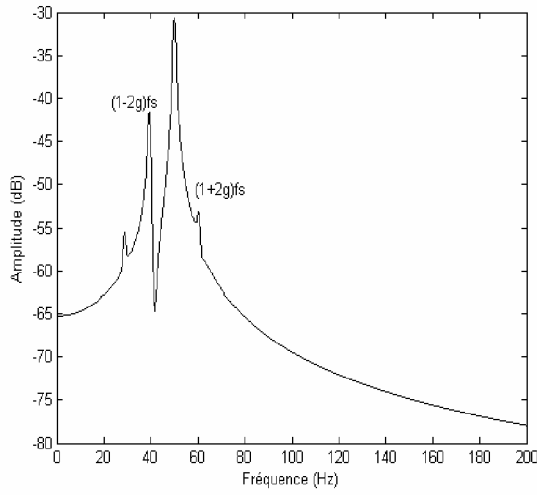


Figure III.9.5: Moteur en charge ($C_r=3.5N.m$), avec une barre cassée "1" $R=11xR_b$

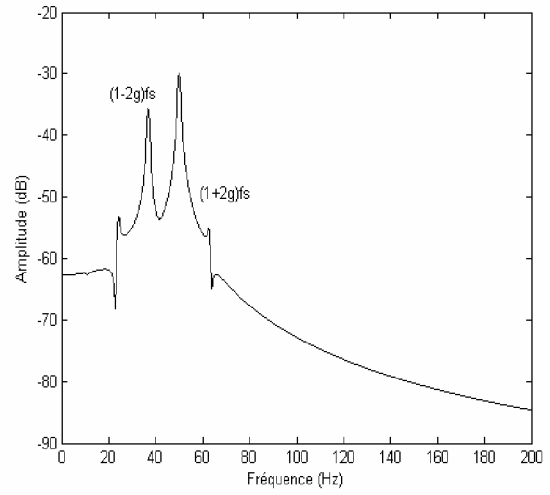


Figure III.9.6 : Moteur en charge ($C_r=3.5N.m$) avec une barres cassée "1" $R=30xR_b$

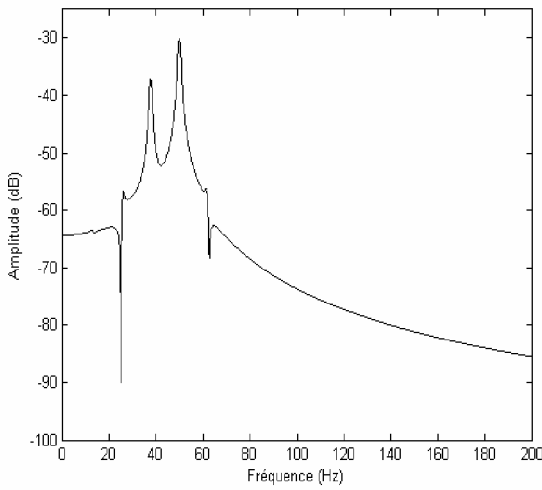


Figure III.9.7: Moteur en charge ($C_r=3.5N.m$), avec deux barres espacées cassées "1-7" $R=11xR_b$

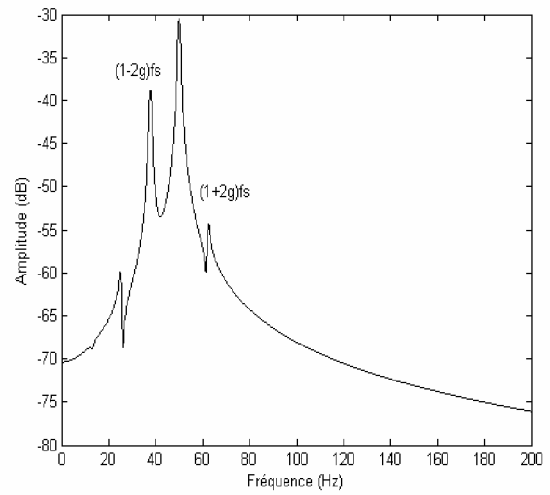


Figure III.9.8 : Moteur en charge ($C_r=3.5N.m$) deux barres adjacents cassées "1-2" $R=11xR_b$

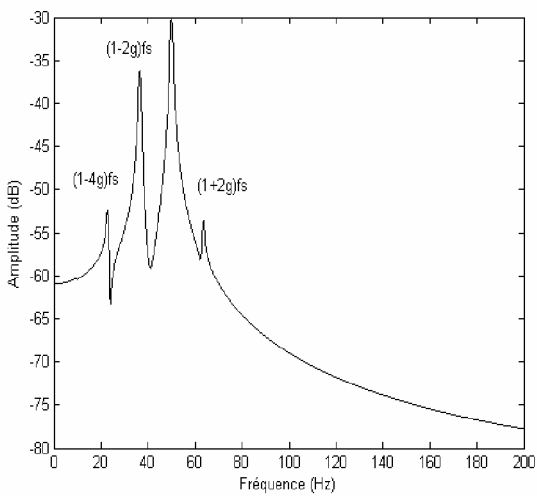


Figure III.9. 9 : Moteur en charge ($C_r=3.5N.m$) avec trois barres cassées "1et 4 et 7" $R=11xR_b$

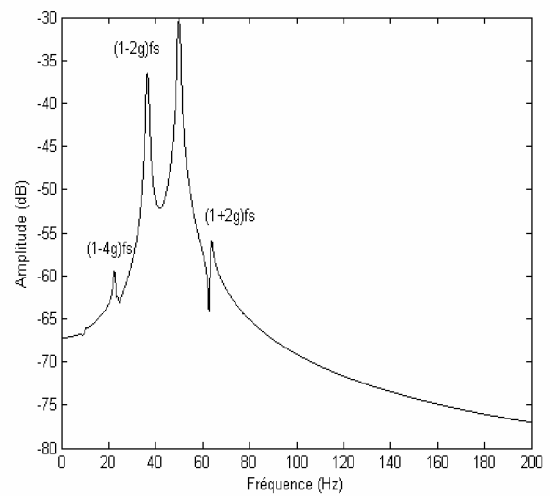


Figure III.9.10 : Moteur en charge ($C_r=3.5N.m$) avec trois barres adjacents cassées "1et 2 et3 " $R=11xR_b$

Les figures (III-9.3 à III-9-10) présentent le spectre de fréquence du courant autour de 50Hz. Ce qu'on peut observer sur le spectre du signal dépend de la résolution donnée par le nombre de points. La tranche d'acquisition comprend 10000 points. La résolution fréquentielle obtenue $\pm 2g \cdot f_s = 3.4\text{Hz}$, ce qui implique que: $\Delta f = \frac{F_e}{N} = 0.1\text{Hz}$ lors de la simulation du moteur sain, ne montre aucune raie latérale.

Lorsqu'une barre est rompue, on remarque l'apparition de raies latérales (Figure III-9-5). On voit bien que l'amplitude augmente avec l'augmentation du nombre des barres cassées.

Les figures (III-10) et (III-11), montrent le spectre du couple et la vitesse pour l'état sain et pour différentes barres cassées, le couple et la vitesse dépendent du comportement du dispositif mécanique constitué du moteur.

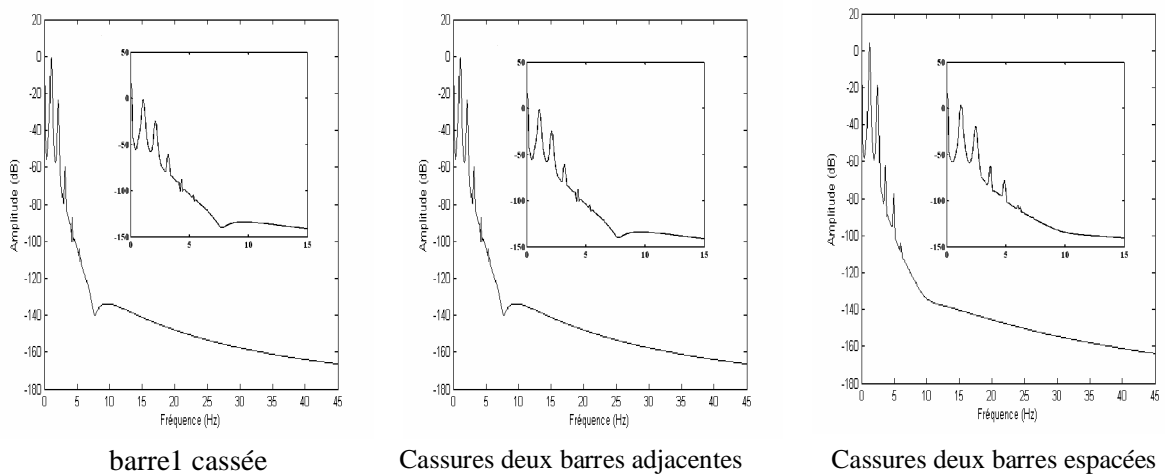


Figure III-10 : Couple électromagnétique

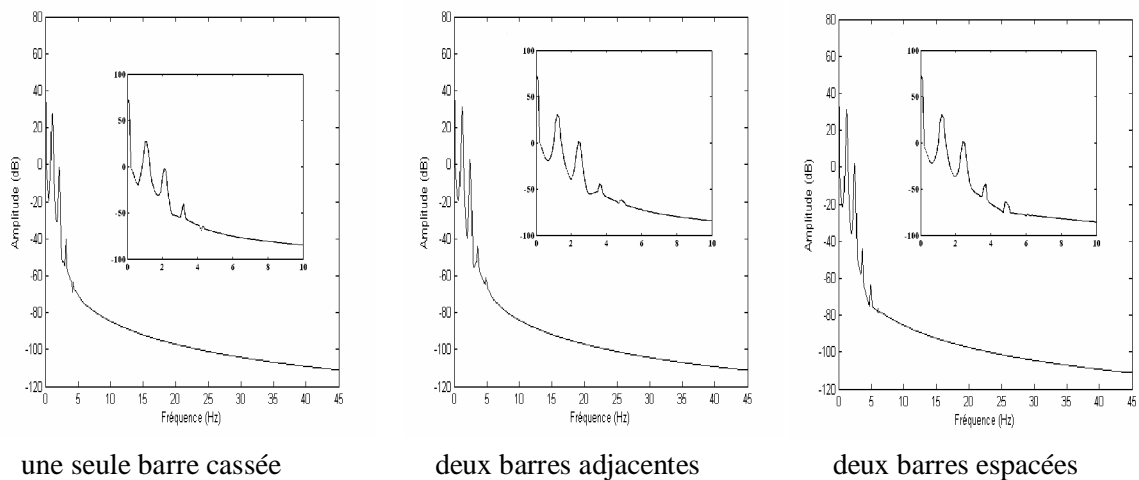


Figure III-11 : Spectre de vitesse

Le tableau (figure III.12) met en évidence l'influence du nombre de barres cassées sur le spectre de courant statorique.

La remarque essentielle est la variation de l'amplitude de raies, cela qui leur augmentation proportionné au nombre de barres cassées et l'intervalle entre barres.

L'état du moteur	(1-2g) f_s	(1+2g) f_s	(1-4g) f_s	(1+4g) f_s
1 barre cassée	-53.84	-59.60	-62.18	-65.18
2 barre adjacentes	-57.264	-59.62	-66.985	-65.30
2 barre espacées	-43.217	-51.10	-52.29	-57.25
3 barre adjacentes	-50.79	-58.44	-65.07	-64.89
3 barre espacées	-55.27	-60.14	-69.03	-66.24

Tableau III.12 : L'amplitude des composantes $(1 \pm 2g) f_s$ et $(1 \pm 4g) f_s$ pour différents nombres de barres cassées

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié à l'aide du modèle multi enroulements les défauts dans la cage rotorique. Les simulations nous ont permis de constater les effets de cassure de barre sur le comportement de la machine. Ces défauts ont des effets similaires et engendrent ce qui suit :

- des oscillations sur le couple et la vitesse,
- l'apparition des harmoniques dans les courants statoriques,
- la diminution de la vitesse moyenne.

On remarque aussi que le temps du régime transitoire augmente avec la sévérité du défaut de barres, les résultats de simulation de ces deux modèles sont comparables, mais pour le modèle global il demande un temps de calcul important égal à 38.078s, mais pour le modèle réduit le temps de calcul ne dépasse pas 10.094s. Ainsi, pour la commande, nous avons présenté les différentes techniques de traitement de signal utilisées pour la détection des défauts. Pour les ruptures de barres, parmi toutes ces méthodes nous avons appliqué l'analyse spectrale par une FFT qui a permis de déterminer la composition fréquentielle du courant statorique et de trouver les raies associées aux défauts. Les amplitudes des harmoniques $(1 \pm 2g)f_s$, associés au défaut, augmentent avec le nombre de barres cassées. Pour le quatrième chapitre on doit appliquer la commande vectorielle.

Pour valider nos programmes de simulation, nous avons comparé nos résultats à ceux d'autres auteurs [BAG 99] et [ABE 02] et [ABE 99]. Ils sont, en bonne concordance.