

## **Chapitre III**

# **Modélisation et simulation des défauts rotoriques de la machine asynchrone**

### III.1 Introduction

La méthode qu'on a adoptée pour la simulation des défauts rotoriques consiste à remplacer la valeur initiale de la résistance des barres cassées par une valeur finie. Cette méthode est appelée méthode des résistances finies.

E. Ritchie estime qu'une augmentation de la résistance de la barre de 11 fois permet d'aboutir à des résultats en concordance avec ceux obtenus expérimentalement.

En ce qui nous concerne nous avons considéré des augmentations de 11 fois la résistance initiale de la barre.

En effet pour un pas de  $10^{-3}$  s, une augmentation de plus de 11 fois conduit à une instabilité numérique (dans notre modèle).

La méthode d'intégration est celle de Runge Kutta d'ordre 4.

### III.2 Modélisation des défauts dans le cas de cassures d'une et de deux barres

Le modèle II.39 démontré dans le chapitre précédent, et réécrit ci-dessous, permet de simuler la rupture de barres au rotor.

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} \omega M_{sr} & 0 \\ \omega L_{sc} & R & -\frac{N_r}{2} \omega M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_1 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 & S_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

Avec:

$$S_1 = \frac{2}{16} \left[ \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos^2 0\alpha + \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos^2 1\alpha + \dots + \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b15} + R_{b14} \right) \cos^2 (15\alpha) \right]$$

$$- \frac{4}{16} \left[ (R_{b0} \cos(0\alpha) \cos(1\alpha)) + (R_{b1} \cos(1\alpha) \cos(2\alpha)) + \dots + (R_{b15} \cos(15\alpha) \cos(0\alpha)) \right] \quad (\text{III.2})$$

$$\begin{aligned}
 S_2 = & -\frac{2}{16} \left[ \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos(0\alpha) \sin(0\alpha) - \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos(1\alpha) \sin(1\alpha) - \dots - \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b15} + R_{b14} \right) \cos(15\alpha) \sin(15\alpha) \right] \\
 & + \frac{2}{16} [(R_{b0} \sin(0\alpha) \cos(1\alpha)) + (R_{b1} \sin(1\alpha) \cos(2\alpha)) + \dots + (R_{b15} \sin(15\alpha) \cos(0\alpha))] \\
 & + \frac{2}{16} [(R_{b0} \cos(0\alpha) \sin(1\alpha)) + (R_{b1} \cos(1\alpha) \sin(2\alpha)) + \dots + (R_{b15} \cos(15\alpha) \sin(0\alpha))] \quad (\text{III.3})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_2 = & -\frac{2}{16} \left[ \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos(0\alpha) \sin(0\alpha) - \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos(1\alpha) \sin(1\alpha) - \dots - \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b15} + R_{b14} \right) \cos(15\alpha) \sin(15\alpha) \right] \\
 & + \frac{2}{16} [(R_{b0} \sin(0\alpha) \cos(1\alpha)) + (R_{b1} \sin(1\alpha) \cos(2\alpha)) + \dots + (R_{b15} \sin(15\alpha) \cos(0\alpha))] \\
 & + \frac{2}{16} [(R_{b0} \cos(0\alpha) \sin(1\alpha)) + (R_{b1} \cos(1\alpha) \sin(2\alpha)) + \dots + (R_{b15} \cos(15\alpha) \sin(0\alpha))] \quad (\text{III.4})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_4 = & \frac{2}{16} \left[ \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos^2 0\alpha + \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos^2 1\alpha + \dots + \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b15} + R_{b14} \right) \cos^2 15\alpha \right] \\
 & - \frac{4}{16} [(R_{b0} \cos(0\alpha) \cos(1\alpha)) + (R_{b1} \cos(1\alpha) \cos(2\alpha)) + \dots + (R_{b15} \cos(15\alpha) \cos(0\alpha))] \quad (\text{III.5})
 \end{aligned}$$

Dans le cas où on veut simuler la rupture d'une barre ou de deux barres les seules valeurs qui vont changer sont celles de:  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  et  $S_4$

### III.2.1. Cassures de barres

La cassure de barres est un des défauts les plus fréquents au rotor. Nos simulations nous permettrons d'identifier les signatures de ce défaut et de prévoir les détériorations générées dans le moteur.

Pour illustrer la cassure totale de barre dans le modèle de la machine, nous augmentons la valeur de la barre cassée de 11 fois [7].

### III.2.2 Simulation des défauts rotoriques à vide et en présence d'une charge sur l'arbre du moteur

#### III.2.2.1 Machine à vide

##### a. Cas d'une cassure d'une barre

- Alimentation sans onduleur

On n'impose tout d'abord aucun couple de charge. La figure III.1 illustre l'évolution temporelle en régime transitoire et en régime permanent de la vitesse de rotation en présence d'une rupture de barre ( $r_{b0}$ ) à  $t=1s$ . Après une phase transitoire, celle-ci se stabilise à une valeur proche de la vitesse de synchronisme à cause de l'absence d'un couple de charge. La figure illustre aussi l'évolution temporelle en régime transitoire et en régime permanent du couple électromagnétique  $C_{em}$  en présence d'une rupture de barre ( $r_{b0}$ ). Après une phase

transitoire, celui-ci se stabilise à une valeur proche de zéro à cause de l'absence d'un couple de charge.

La figure III.2 illustre le courant statorique , en présence d'une rupture d'une barre ( $r_{b0}$ ) à  $t=1s$

La figure III.3 illustre les courants de barres  $I_{rb0}$  ,  $I_{rb1}$  ,  $I_{rb2}$  ,  $I_{rb3}$  , en présence d'une rupture des barres ( $r_{b0}$ ) à  $t=1s$  .

On remarque dans l'essai à vide, les signatures des défauts rotoriques sont très minimes.

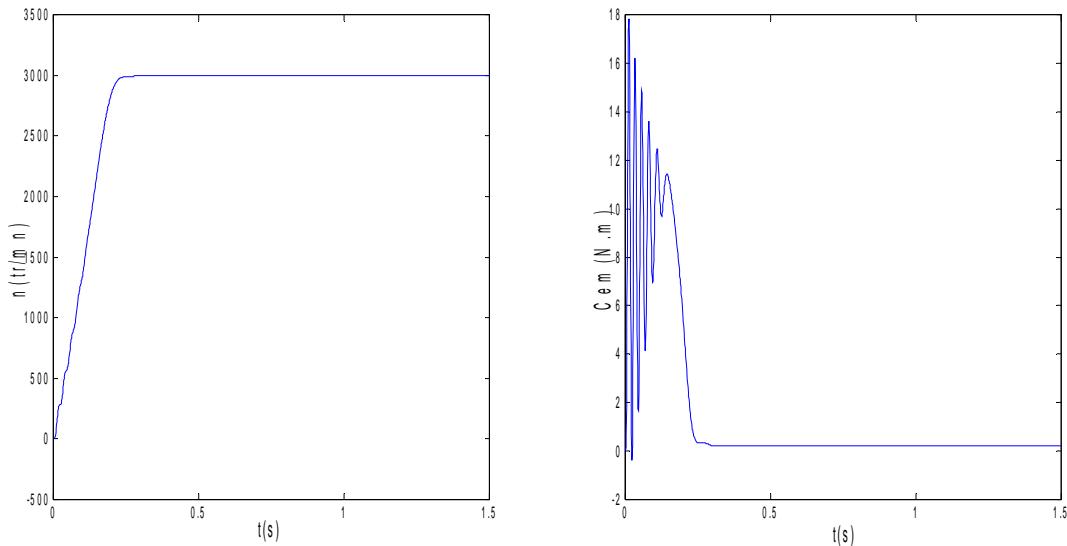


Figure III.1 : vitesse de rotation, couple électromagnétique ( simulation avec le modèle réduit, machine en défaut à vide)

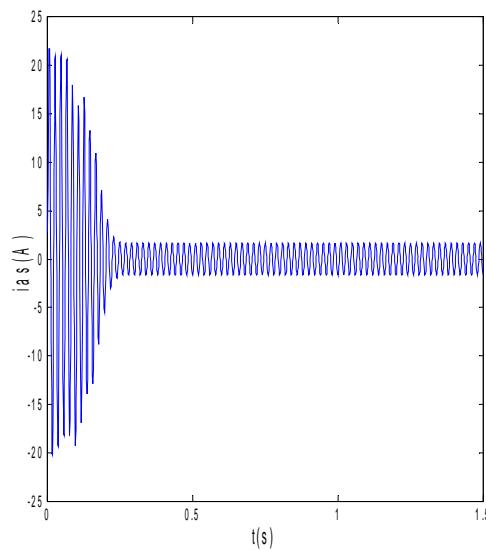


Figure III.2 : courant statorique, simulation avec le modèle réduit, machine en défaut à vide

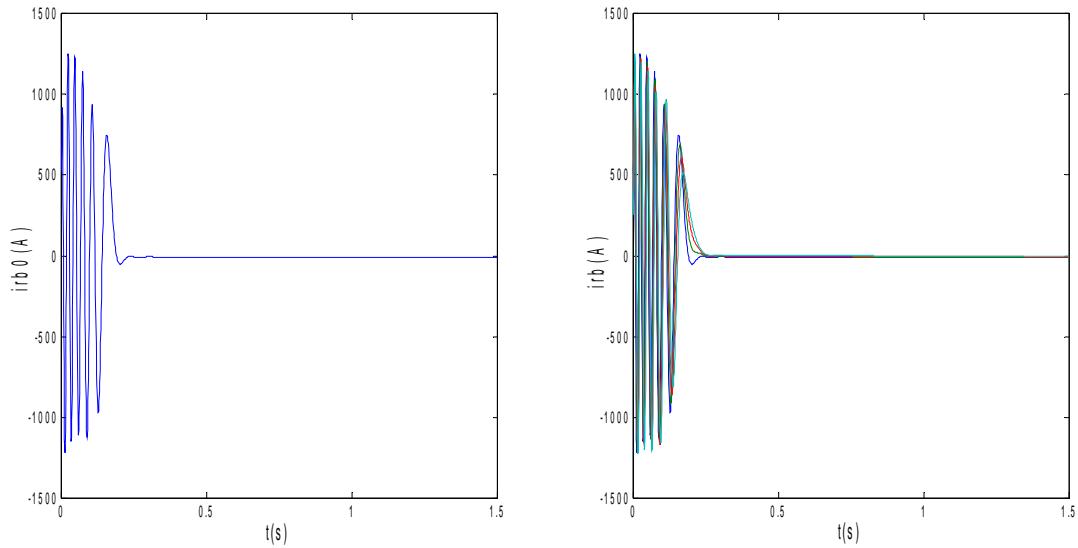
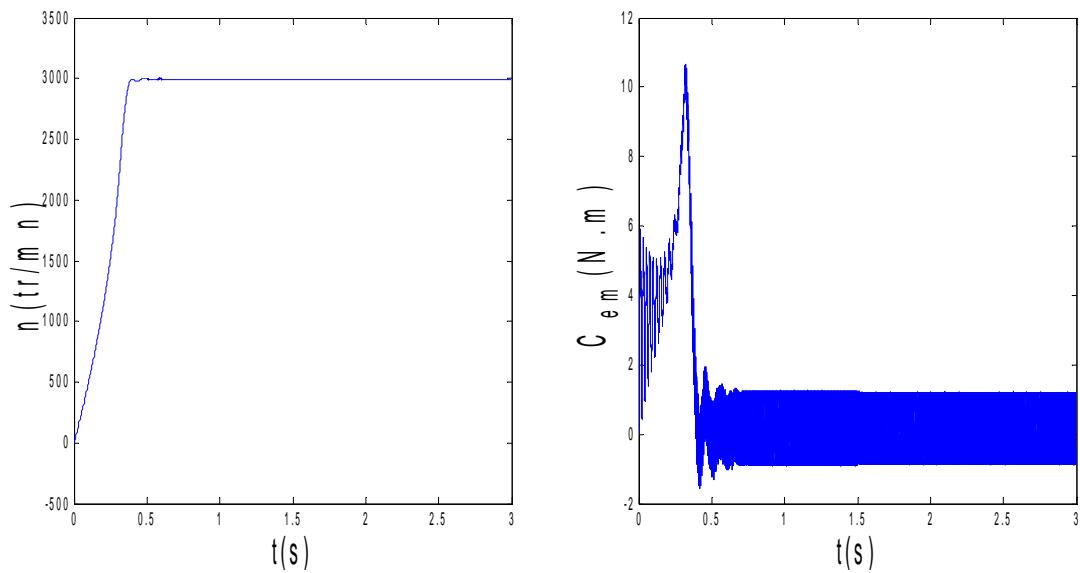


Figure III.3 :courants dans les barres rotoriques,  $I_{rb0}, I_{rb1}, I_{rb2}, I_{rb3}$ , simulation avec modèle global, machine en défaut à vide.

- **Alimentation avec onduleur**



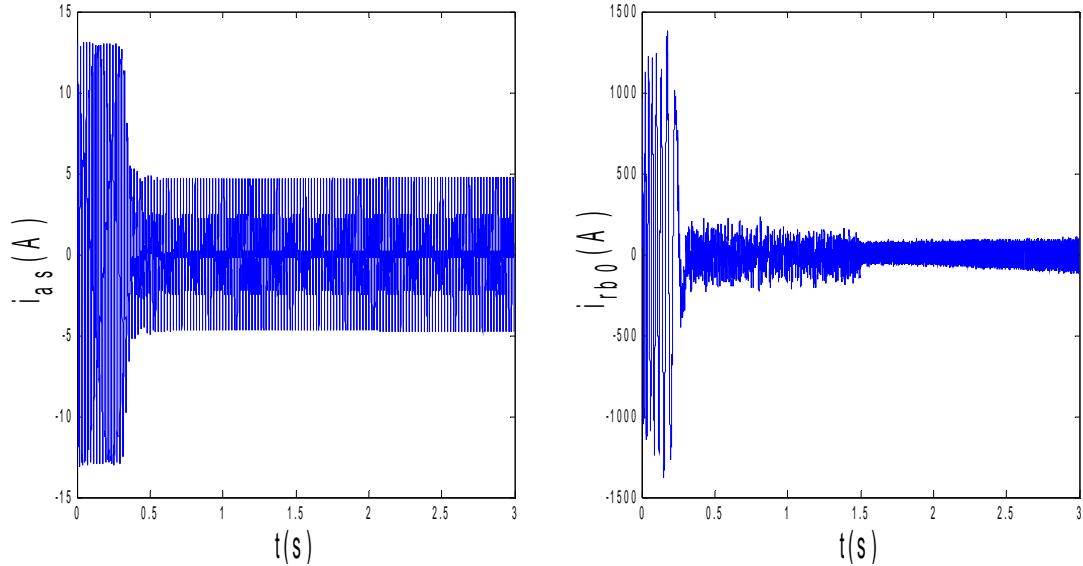


Figure III.4 : Simulation avec le modèle réduit, machine en défaut à vide, alimentation avec onduleur

### b- Cas d'une cassure de deux barres

- Alimentation sans onduleur

La figure III.5 illustre l'évolution temporelle en régime transitoire et en régime permanent de la vitesse de rotation en présence d'une rupture de deux barres ( $r_{b0}$ ) à  $t=1s$  et ( $r_{b1}$ ) à  $t=2s$ . Après une phase transitoire, celle-ci se stabilise à une valeur proche de la vitesse de synchronisme à cause de l'absence d'un couple de charge. La figure illustre aussi le couple électromagnétique  $C_{em}$  en présence d'une rupture des barres ( $r_{b0}$ ) à  $t=1s$  et ( $r_{b1}$ ) à  $t=2s$ . Après une phase transitoire, celui-ci se stabilise à une valeur proche de zéro à cause de l'absence d'un couple de charge. La figure III.6 illustre le courant statorique, en présence d'une rupture d'une barre ( $r_{b0}$ ) à  $t=1s$  et ( $r_{b1}$ ) à  $t=2s$ .

La figure III.7 illustre les courants de barres  $I_{rb0}$ ,  $I_{rb1}$ ,  $I_{rb2}$ ,  $I_{rb3}$ , en présence d'une rupture des barres ( $r_{b0}$ ) à  $t=1s$  et ( $r_{b1}$ ) à  $t=2s$ .

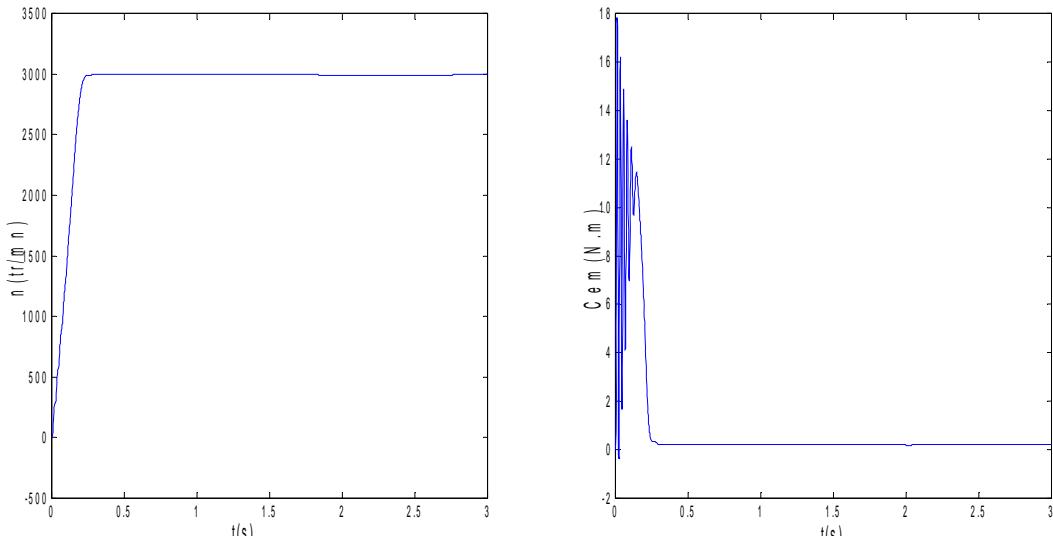


Figure III.5 : vitesse de rotation, couple électromagnétique  
(simulation avec le modèle réduit, machine en défaut à vide)

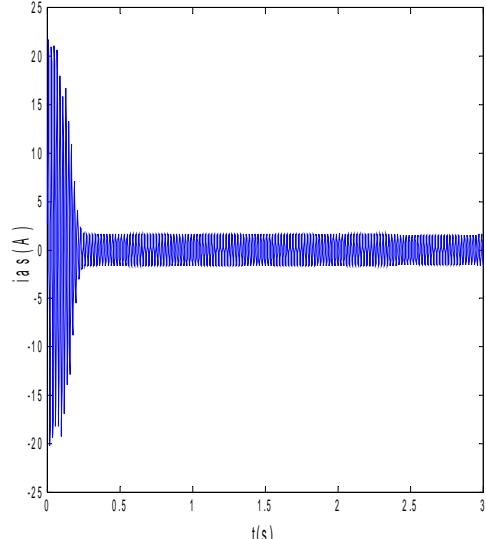


Figure III.6 : courant statorique (simulation avec le  
modèle réduit, machine en défaut à vide)

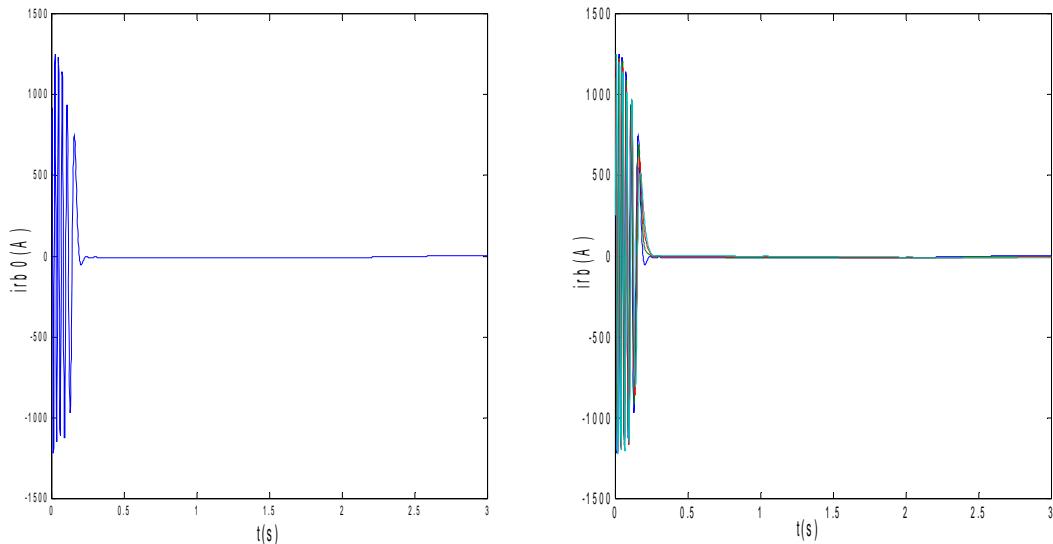


Figure III.7 : courants dans les barres rotoriques  $I_{\text{rb}0}$ ,  $I_{\text{rb}1}$ ,  $I_{\text{rb}2}$ ,  $I_{\text{rb}3}$ ,  
(simulation avec modèle global, machine en défaut à vide)

- **Alimentation avec onduleur**

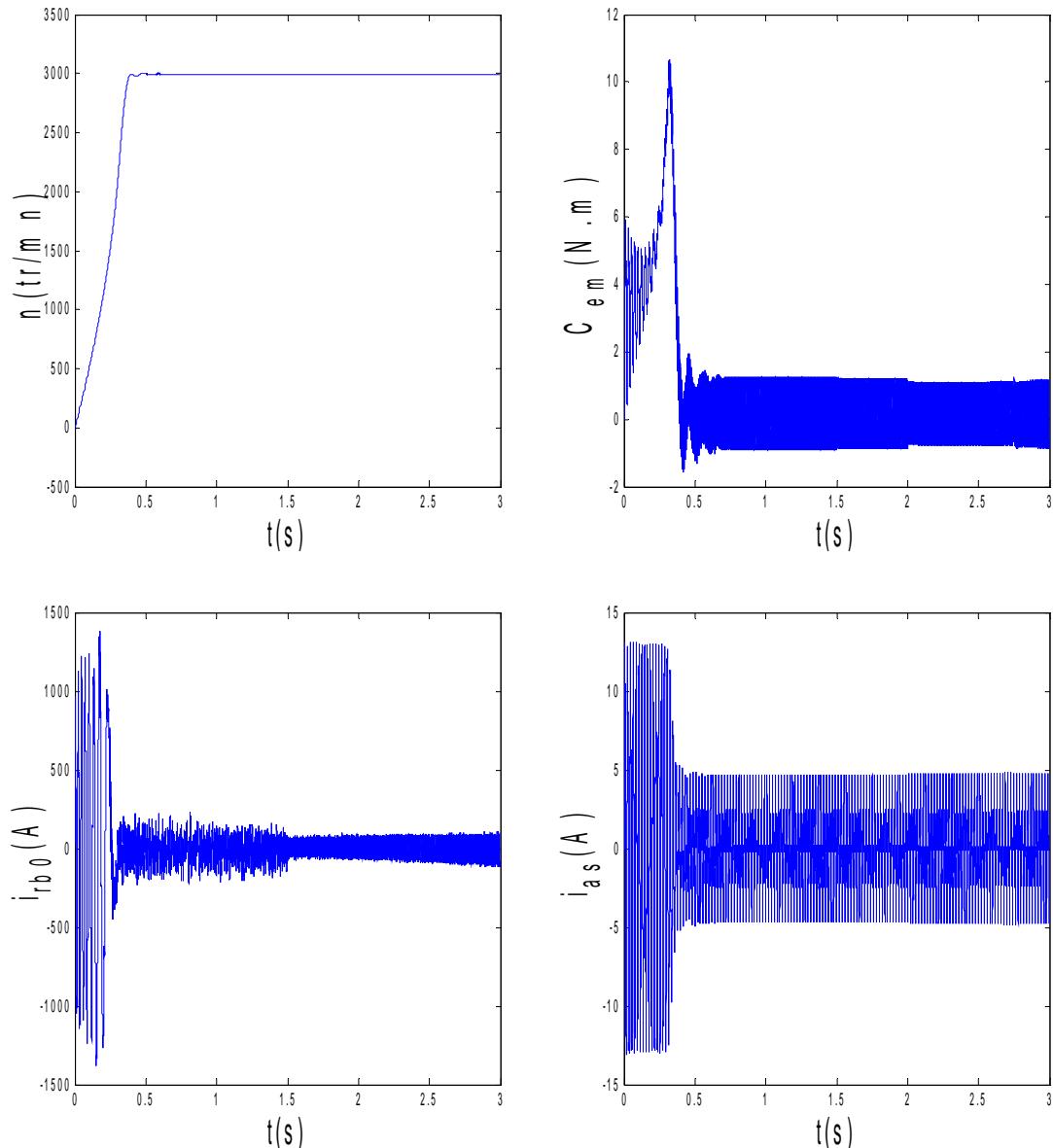


Figure III.8 : Simulation avec le modèle réduit, machine en défaut à vide, alimentation avec onduleur

## 2. Machine en charge

### a. Cas d'une cassure d'une barre

- **Alimentation sans onduleur**

On impose maintenant un couple de charge de 3.5 N.m à  $t=0.6s$ .

La figure III.9 illustre l'allure de la vitesse de rotation, celle-ci se stabilise à une valeur de 2219 tr/mn. La figure illustre aussi du couple électromagnétique  $C_{em}$  en présence d'une rupture des barres  $r_{b0}$  à  $t=1s$ . Après une phase transitoire, celui-ci se stabilise à une valeur proche de 3.5 N.m à cause de la présence du couple de charge.

La figure III.10 illustre l'évolution permanent du courant statorique , en présence d'une rupture de barre  $r_{b0}$  à  $t=1s$  .

La figure III.11 illustre les courants de barres  $I_{rb0}$ ,  $I_{rb1}$ ,  $I_{rb2}$ ,  $I_{rb3}$ , en présence d'une rupture de barre  $r_{b1}$  à  $t=1s$ . Les courants circulant dans les barres adjacentes aux barres cassées sont très supérieurs à leur valeur nominale. On conclut donc qu'il y a un risque de défaillance en chacune dans la mesure où les contraintes électriques et thermiques sont redistribuées sur les conducteurs adjacents.

Nous observons ce qui suit:

- La vitesse chute à 2917 tr/mn, et le couple électromagnétique vient équilibrer le couple résistant .
- La détérioration de la barre réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et fait apparaître les oscillations .
- L'oscillation sur la vitesse .
- Les courants des phases statoriques sont toujours déphasés entre eux de  $120^\circ$ ,

Cependant une ondulation de l'amplitude des courants apparaît avec la cassure de la barre. La figure III.9 illustre cette ondulation.

- Le rotor avec ce défaut de la structure crée en plus de champ rotorique direct qui tourne à  $g^*\omega_s$  par rapport au rotor , un champ inverse qui tourne à  $-g^*\omega_s$  dans le repère rotorique. L'interaction de ces champs avec celui issu du bobinage statorique donne naissance à un couple électromagnétique (somme d'une composante directe constante et d'une composante inverse sinusoïdale), de pulsation  $2g\omega_s$ . Elle sera la cause d'oscillations sur la vitesse [4].

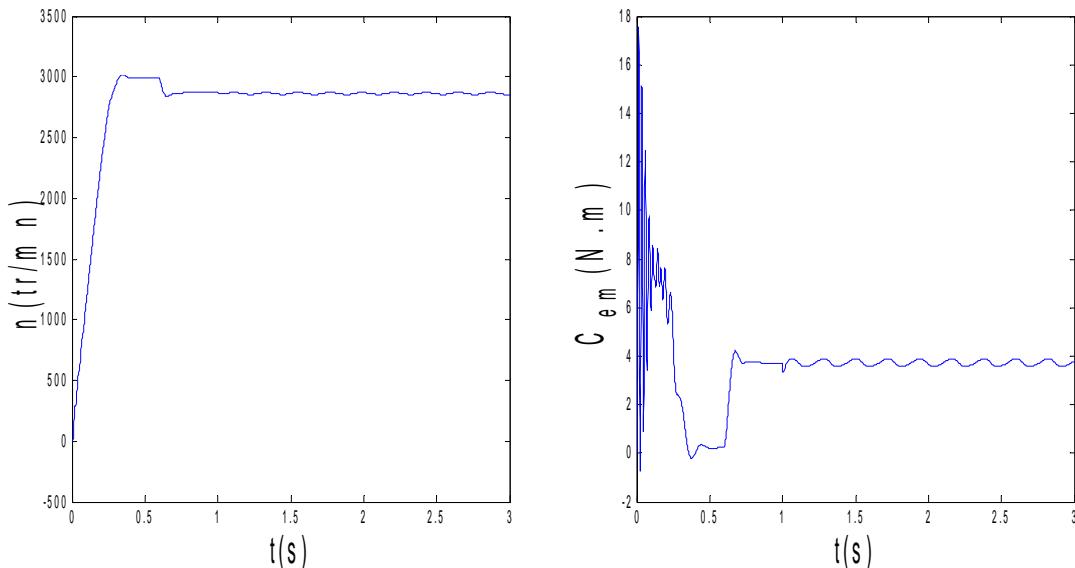


Figure III.9 : vitesse de rotation, couple électromagnétique et le courant statorique (simulation avec le modèle réduit, machine avec défaut et en charge,  $C_r=3.5$  N.m)

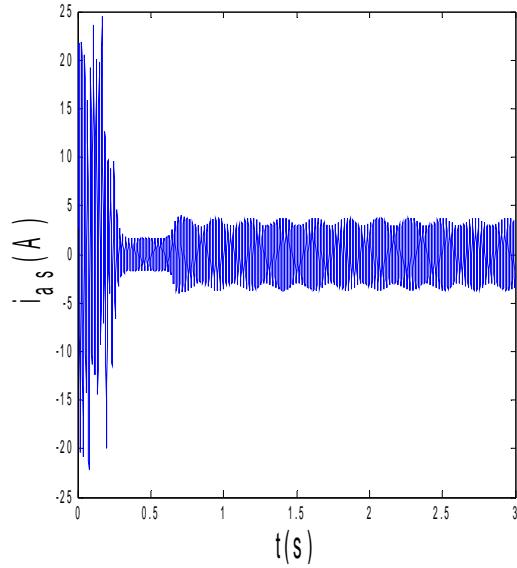


Figure III.10 : courant statorique, simulation avec le modèle réduit, machine avec défaut en charge,  $C_r=3.5$  N.m

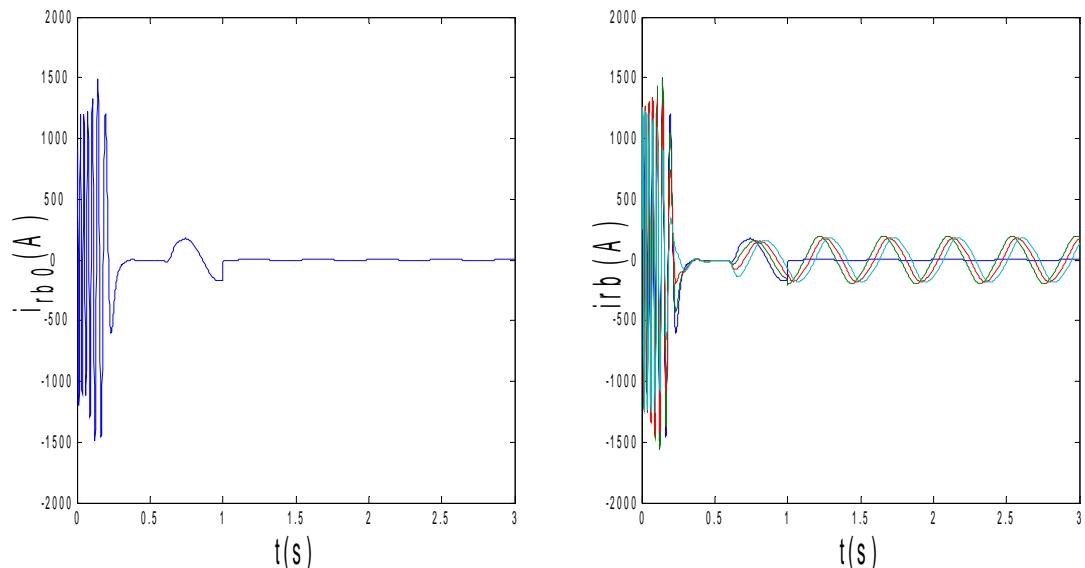


Figure III.11 : courants dans les barres rotoriques  $I_{rb0}$ ,  $I_{rb1}$ ,  $I_{rb2}$ ,  $I_{rb3}$   
(simulation avec modèle global, machine en défaut en charge,  $C_r=3.5$  N.m)

- **Alimentation avec onduleur**

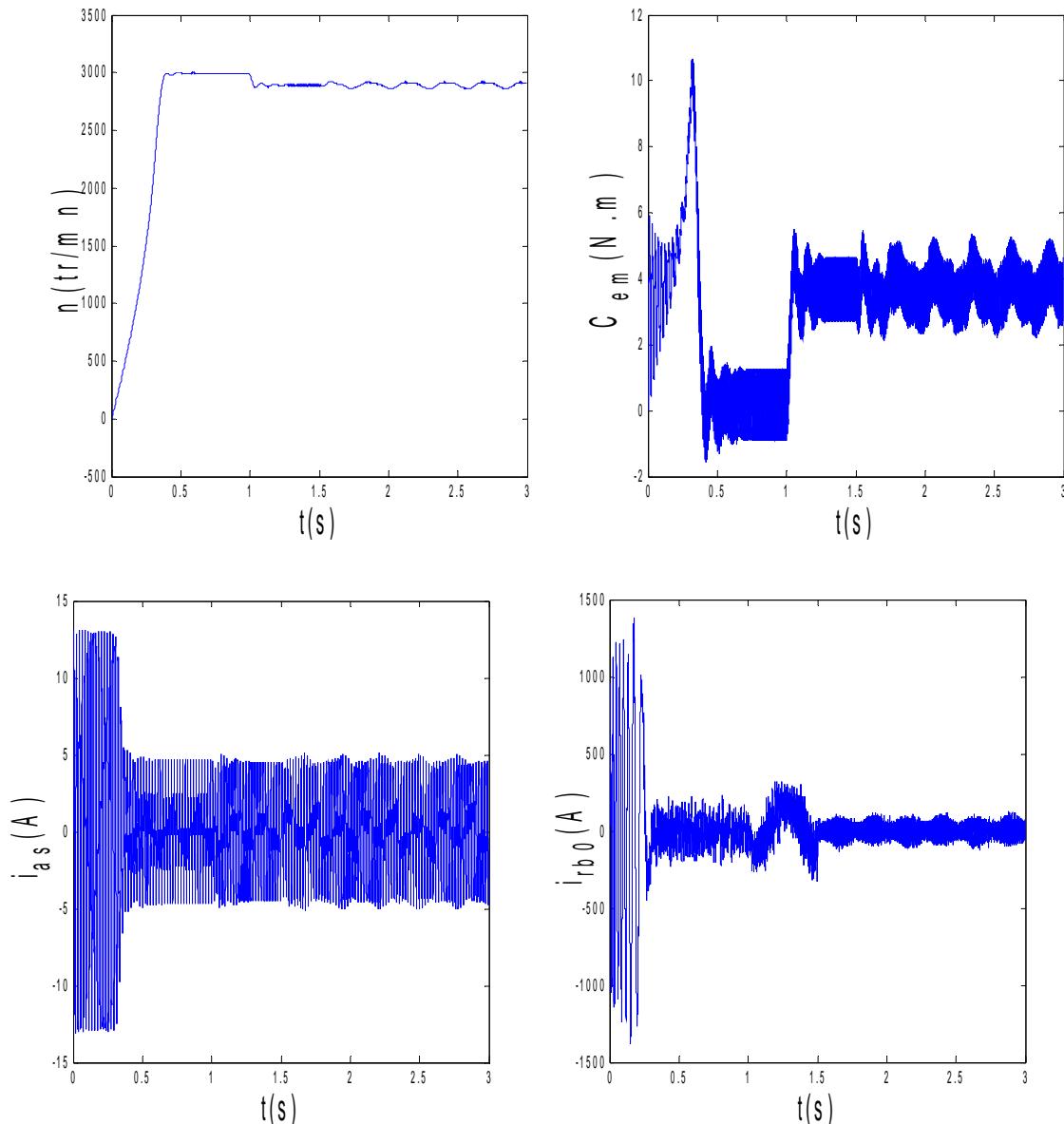


Figure III.12 : Simulation avec le modèle réduit, machine avec défaut et en charge (alimentation avec onduleur)

a. **Cas d'une cassure de deux barres**

- **Alimentation sans onduleur**

On impose maintenant un couple de charge de 3.5 N.m à  $t=0.6s$ .

La figure III.13 illustre le couple électromagnétique  $C_{em}$  en présence d'une rupture de barre  $r_{b0}$  à  $t=1s$  et  $r_{b1}$  à  $t=2s$ . Après une phase transitoire, celui-ci se stabilise à une valeur proche de 3.5 N.m à cause de la présence du couple de charge. On constate des oscillations du couple électromagnétique à la fréquence  $2gf_{s0}$  en régime permanent.

La figure III.14 illustre l'évolution du courant statorique, en présence d'une rupture de barre  $r_{b0}$  à  $t=1s$  et  $r_{b1}$  à  $t=2s$ .

La figure III.15 illustre l'évolution temporelle des courants de barres  $I_{rb0}$ ,  $I_{rb1}$ ,  $I_{rb2}$ ,  $I_{rb3}$  en présence d'une rupture de barre  $r_{b1}$  à  $t=1s$ . Les courants circulant dans les barres adjacentes aux barres cassées sont très supérieurs à leur valeur nominale. On conclut donc qu'il y a un risque de défaillances en chacune dans la mesure ou les contraintes électriques et thermiques sont redistribuées sur les conducteurs adjacents.

Les effets de la cassure de barre (oscillation de  $\omega$  et  $C_{em}$ ) croit rapidement avec le nombre de barres cassé ; d'où on observe:

- Augmentation de l'amplitude des oscillations. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine.
- L'amplitude des courants des phases statoriques est proportionnelle au nombre de barres cassées.
- Lors des défauts rotoriques, les courants dans les barres cassées chutent pratiquement à zéro, tandis que les courants dans les barres voisines deviennent déséquilibrés. Les courants qui conduisaient les barres cassées se répartit alors dans les barres voisines

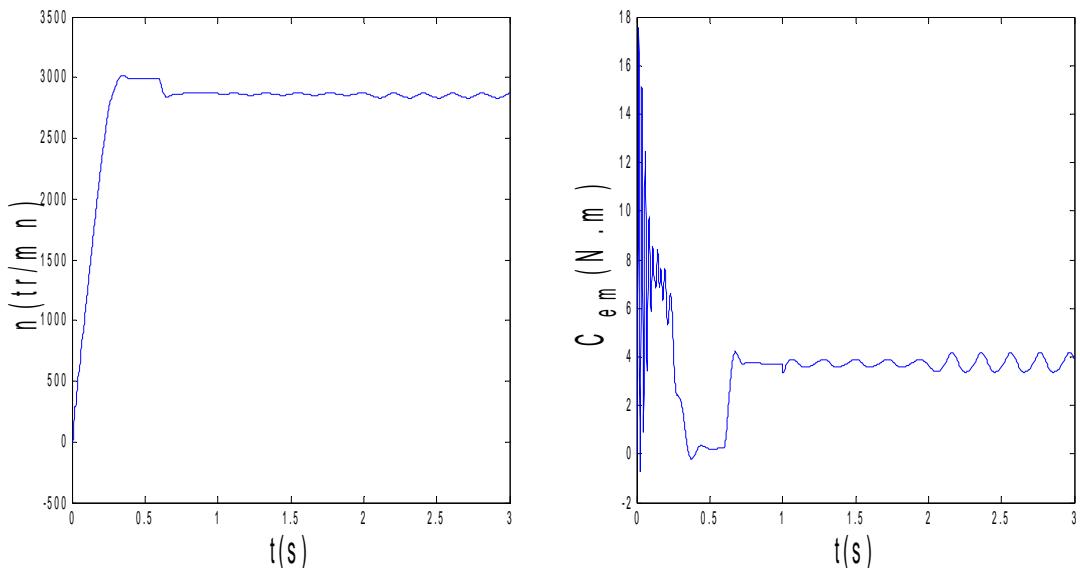


Figure III.13 : vitesse de rotation, couple électromagnétique, (simulation avec le modèle réduit, machine avec défaut et en charge,  $C_r=3.5$  N.m)

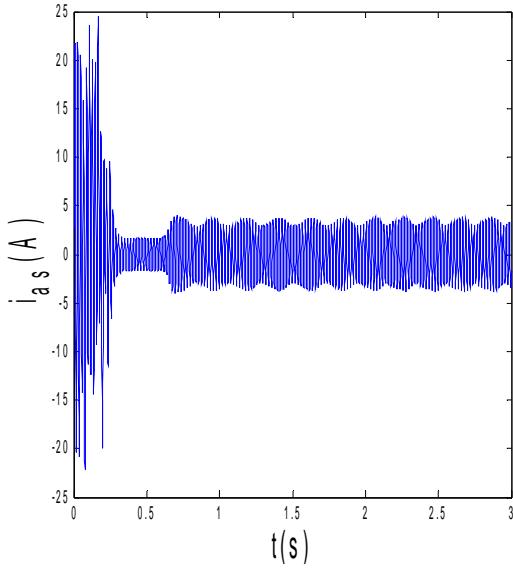


Figure III.14 : courant statorique, simulation avec le modèle réduit, machine avec défaut et en charge,  $C_r=3.54\text{N.m}$

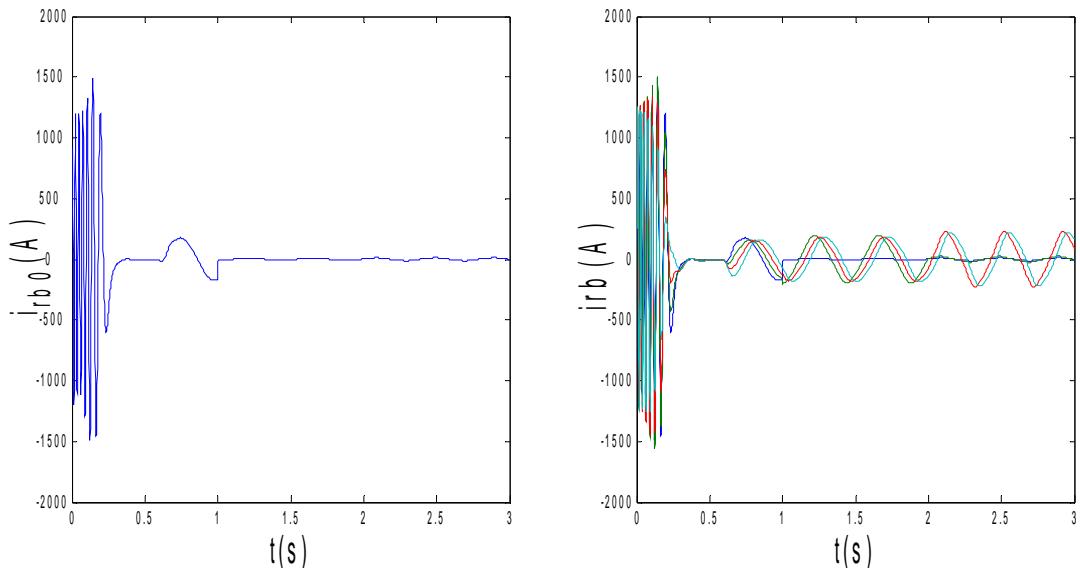


Figure III.15 : courants dans les barres rotoriques  $I_{rb0}$ ,  $I_{rb1}$ ,  $I_{rb2}$ ,  $I_{rb3}$  (simulation avec modèle global, machine avec défaut et en charge,  $C_r=3.5\text{N.m}$ )

- **Alimentation avec onduleur**

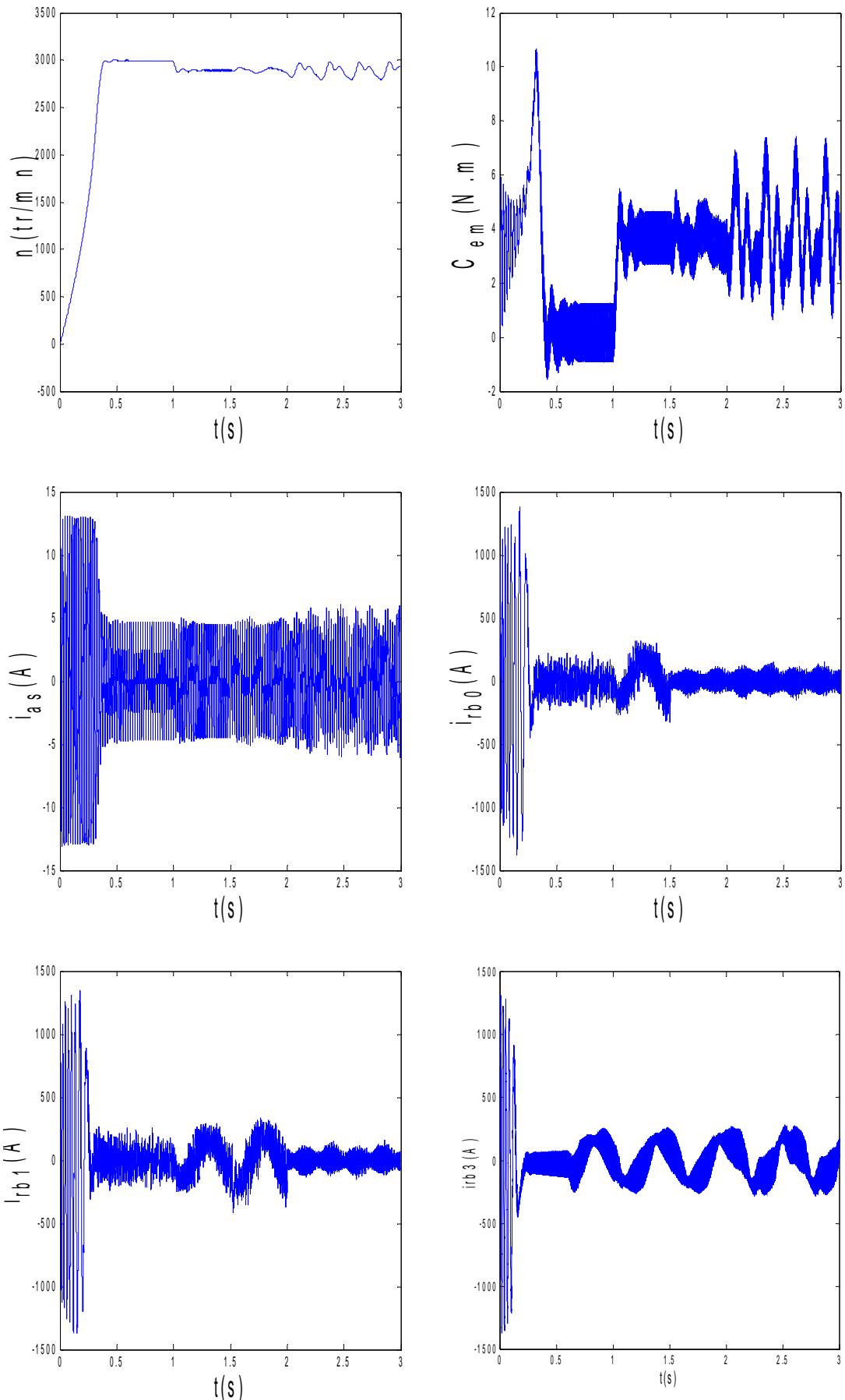


Figure III.16 : Simulation avec le modèle réduit, machine avec défaut et en charge alimentation avec onduleur

### III.3. Analyse spectrale de la signature du courant en présence des défauts rotoriques [3] [4]

Lors de la rupture de barre, il est difficile d'analyser directement le courant statorique. Ce dernier ne présente en effet qu'une petite modulation (figure III.3).

L'analyse par FFT permet de mettre en évidence les raies présentes dans le spectre de signal. Nous présentons les résultats de simulation relatifs à l'analyse par FFT en régime permanent à charge nominal, dans les figures qui suivent :

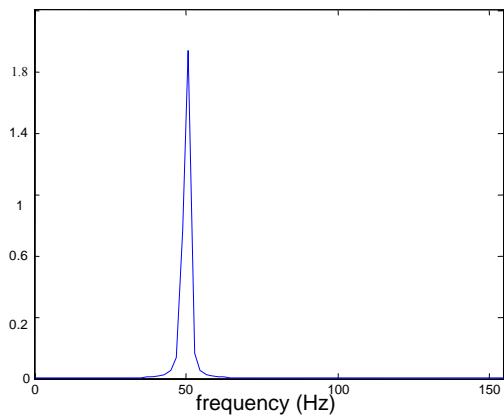


Figure III.17 : Moteur sain à vide

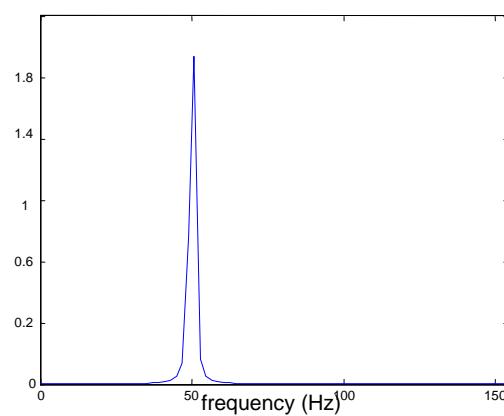


Figure III.18 : Moteur sain en charge

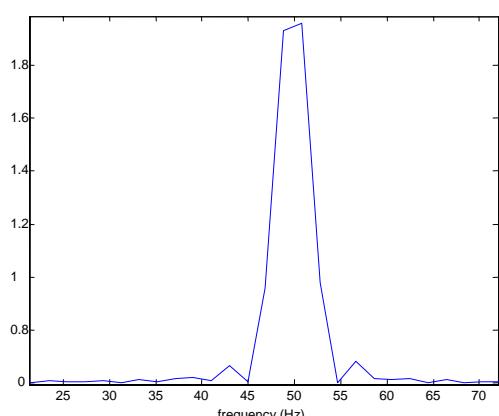


Figure III.19 : Moteur avec une barre cassée

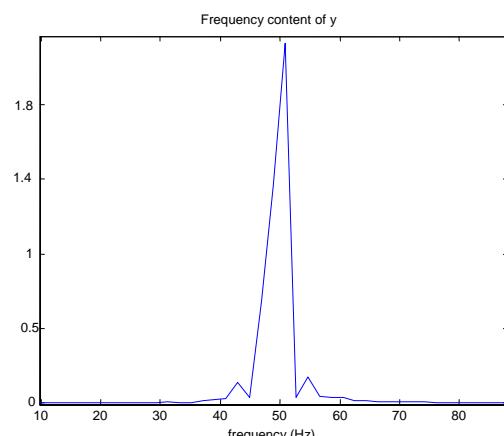


Figure III.20 : Moteur avec deux barre cassées

Les figures III.17 à III.20 présentent le spectre de fréquence du courant autour de 50Hz. Lors de la simulation du moteur sain, à vide et en charge. Nous n'observons aucune raie latérale figure (III.17 et III.18).

Lorsqu'une barre est rompue, on remarque l'apparition des raies latérales à 46 Hz et 54 Hz au voisinage du fondamental  $f_s = 50\text{Hz}$ , (figure III.19).

Si on augmente le nombre de barres casées ( $K=0$  ;  $K=1$ ), on obtient des valeurs importantes de l'amplitude des raies figure III.20.

Donc une analyse spectrale du courant statorique fait donc apparaître les composantes latérales à 46 Hz et 54 Hz par rapport au fondamental, ces fréquences correspondantes à la fréquence de **Deleroi**  $f_s (1 \pm 2.g)$  [10].

Ce résultat, très important, constitue une signature fiable du défaut.

#### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a exploité la flexibilité du modèle initial pour prendre en compte les défaillances rotoriques pouvant affecter la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil.

Nous avons simulé la machine asynchrone en premier lieu, avec des défauts au rotor puis on a fait une analyse harmonique des courants statoriques.

Nos simulations nous permettent de conclure, que la cassure de barres fait apparaître des oscillations sur le courant, le couple et la vitesse. D'autre part, ce défaut connaît un effet cumulatif lors de la rupture de barre.

Une analyse harmonique des courants statoriques permet de voir une corrélation entre le défaut et les amplitudes des composantes à  $f_s (1 \pm 2.g)$ .

On a montré que ce modèle pouvait répondre aux objectifs fixés : compréhension des phénomènes physiques mis en jeu et prédition de la dégradation des performances lors de l'apparition de défaillances.