



Modélisation d'entraînement électromécanique multi masses à base de Machine Courant Continu MCC



Réaliser par: **Soufiane BOUAFIA** ⁽¹⁾,

Proposé et Dirigé par : **Dr. Abderrahim ZEMMIT** ⁽²⁾

(1) Licence Electromécanique – Département Génie électrique – Faculté de technologie – Université de M'sila

(2) Enseignante au Département Génie électrique – Faculté de technologie – Université de M'sila

Résumé :

Ce travail se présente le développement d'un modèle multi-masses d'un entraînement électromécanique à base de machine à courant continu MCC à excitation indépendante . Ce modèle servira de référence pour élaborer des simulations numériques sous Matlab-Simulink , une modélisation multi-masses reflétant la complexité du mécanisme entraîné est indispensable pour l'étude de nombreux systèmes industriels.

Motés clés : Modèle multi-masses, Machine à courant continu MCC, Modélisation, Simulation.

1. INTRODUCTION

De nombreux systèmes électromécaniques peuvent être modélisés en tant que systèmes multimasses, composés d'une machine électrique et d'une charge mécanique interconnectées par un arbre flexible, à savoir: les systèmes de laminage, les ponts roulant, les systèmes d'entraînement d'antennes, les robots, les moulins de papier, les élévateurs, les machines-outils, les presses-imprimantes, et aussi les éoliennes ainsi que beaucoup d'autres applications industrielles. Le couplage élastique entre la machine électrique et le mécanisme entraîné, causé par l'élasticité de l'arbre et des engrenages, est souvent inévitable et peut causer des vibrations indésirables qui affectent la performance dynamique de l'entraînement; d'où il se présente l'intérêt d'une analyse détaillée de tels systèmes.

En utilisant un modèle à une masse qui suppose que les liaisons entre les différents éléments du mécanisme sont entièrement rigides, nous négligeons les propriétés oscillatoires de ce mécanisme. Pour tenir compte de la réalité de fonctionnement caractérisé par une élasticité entre les éléments du système mécanique, une modélisation multi-masses reflétant la complexité du mécanisme entraîné est indispensable pour l'étude de nombreux systèmes industriels .

2. LA LA MACHINE A COURANT CONTINU MCC

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les moteurs à courant continu sont utilisés dans les asservissements ou la facilité de réglage de la vitesse, du moment, du couple et du sens de rotation permet une mise en œuvre aisée.

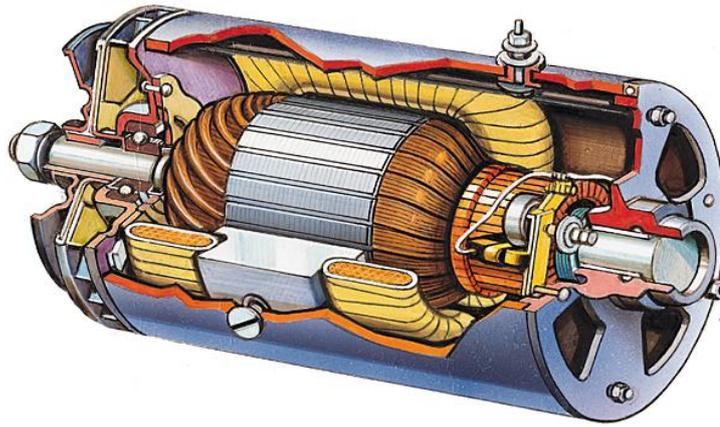


Figure1 : Coupe d'une machine à courant continu .

2.1 Principe de fonctionnement

Tous les moteurs électriques sont basés sur le principe physique du couplage magnétique entre deux champs magnétiques. La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'opère à travers ce couplage magnétique ou interaction magnétique.

Le principe de la machine à courant continu repose sur l'application de forces de Laplace sur des conducteurs solidaires de **l'induit** et baignées dans une induction magnétique. Un champ magnétique B est créé par **l'inducteur** (soit par des enroulements fixes soit par des aimants permanents). La machine peut donc fonctionner, selon le phénomène exploité :

2. 2.1. Fonctionnement en moteur

Si l'on fait passer un courant dans la spire placée au rotor en présence du champ B , des forces F sur les conducteurs sont ainsi créés. Le couple de force F entraîne la mise en rotation du rotor.

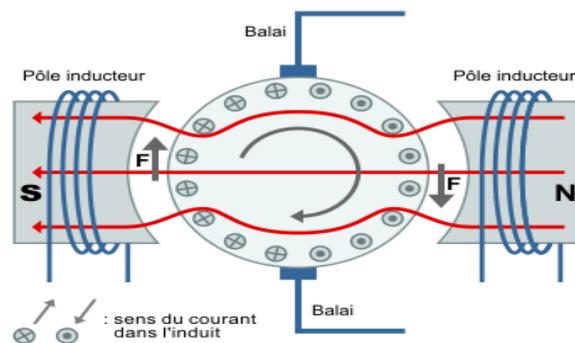


Figure 2 : Mode de fonctionnement en moteur

2.2. 2. Fonctionnement en génératrice

Si une source extérieure entraîne le rotor et exerce un couple moteur qui se traduit, pour les conducteurs, par une force opposée à la force F , ces conducteurs sont le siège d'une force électromotrice induite (f.é.m) et par conséquent ils sont parcourus par un courant induit I .

La principale utilisation du moteur :

- Faible puissance : (qq W) : servomécanisme équipement auto
- Moyenne puissance : (<300 kW) : Machines outils engins de levage

- Fortes puissances : (<10 MW) : traction TGV (premiers TGV 12 MCC 525 KW sous 1070 V et $I_{max}=1000 A$)

2.2 Description de la machine a courant continu [2]

La machine à courant continu est constituée comme toutes les machines de 2 parties principales

2.A.1. Partie fixe : appelée **inducteur**, qui est à l'origine de la circulation d'un flux magnétique longitudinal fixe créé soit par des enroulements inducteur (bobinage) soit par des aimants permanents.

2.A.2. Partie mobile : appelée **induit**, relié à un collecteur rotatif inversant la polarité de chaque enroulement induit au moins une fois par tour de façon à faire circuler un flux magnétique transversal en quadrature avec le flux inducteur.

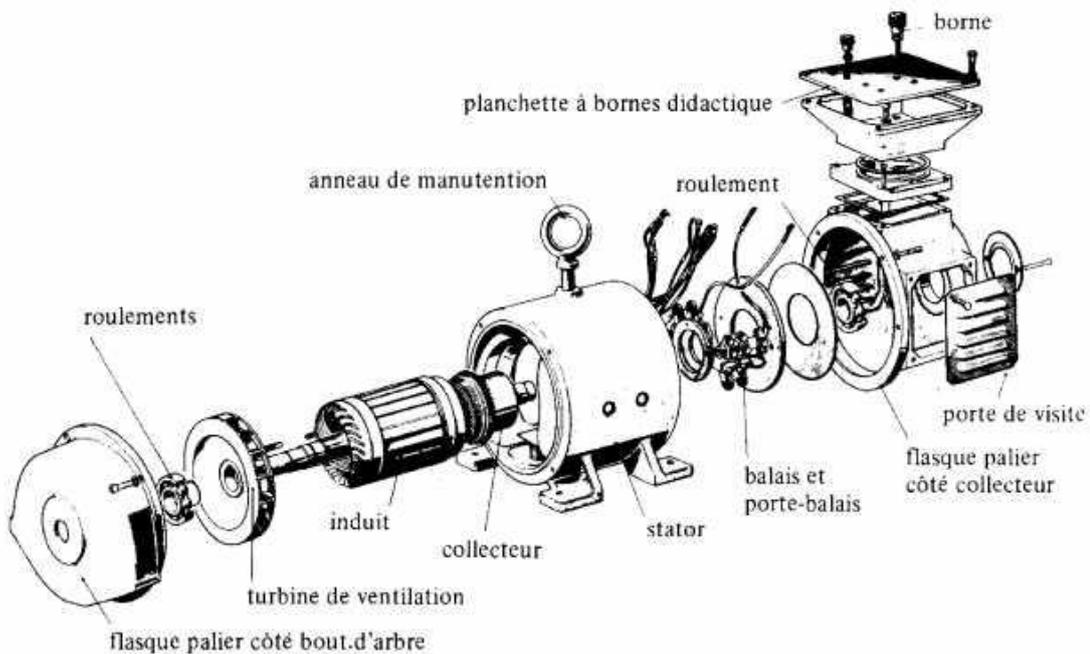


Figure.3 : Constitution d'une machine à courant continu [3]

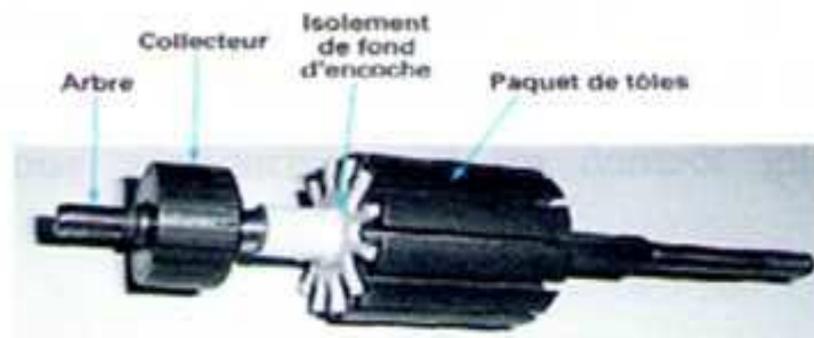
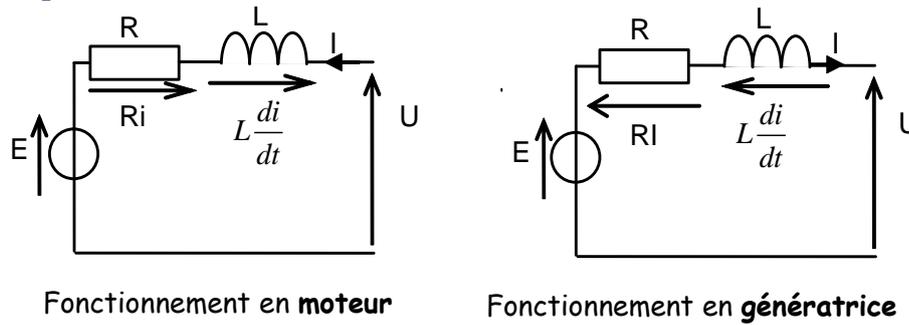


Figure 4 : Induit de petit moteur à courant continu

2.3. Modèle équivalent



$$U = E - Ri - L \frac{di}{dt}$$

$$U = E + Ri + L \frac{di}{dt} \quad \text{En régime quelconque}$$

$$U = E - Ri$$

$$U = E + Ri \quad \text{En régime permanent}$$

Avec **R** résistance de l'enroulement de l'induit et **L** : inductance de l'induit

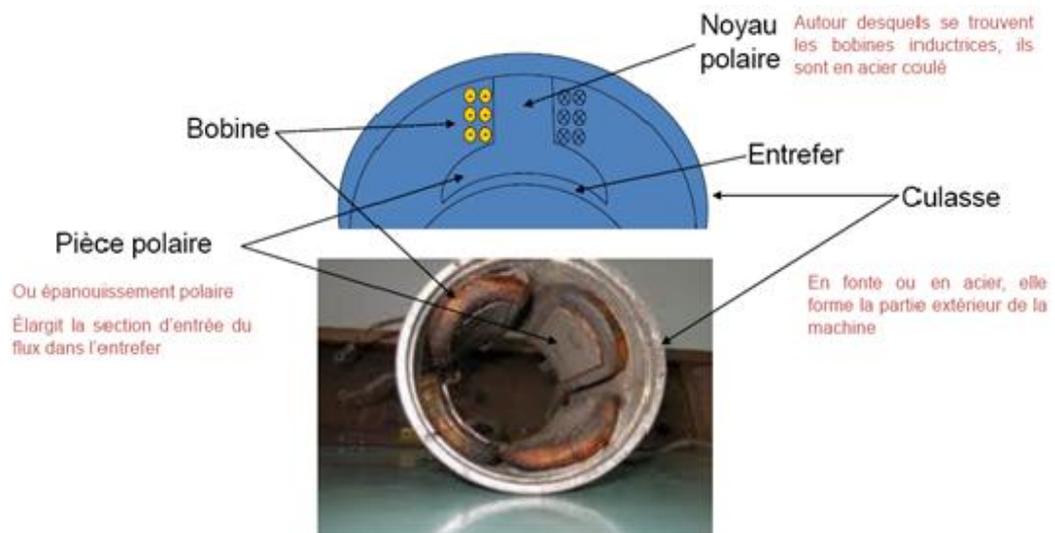


Figure 5 : Inducteur de moteurs à courant continu

2.4 Moteur A Excitation séparée (Composée)

Le moteur à excitation séparée ne s'emballe pas à vide et répercute sur le courant I tout accroissement de couple ; le moteur série s'emballe, mais réduit les appels de courant lors d'une augmentation de couple I . Pour concilier les avantages, on utilise un moteur comportant sur les pôles deux inducteurs :

- l'un *dérivé*, comportant N_d spires, branché en parallèle et parcouru par le courant I_e ;
- l'autre *série*, comportant N_s spires, branché en série, parcouru par le courant I .

| Caractéristiques | Domaines d'emploi |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| L'inducteur est alimenté par une source indépendante. Grande souplesse de commande Large gamme de vitesse. Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement | machines outils : moteur de broche, d'axe. Machines spéciales. |

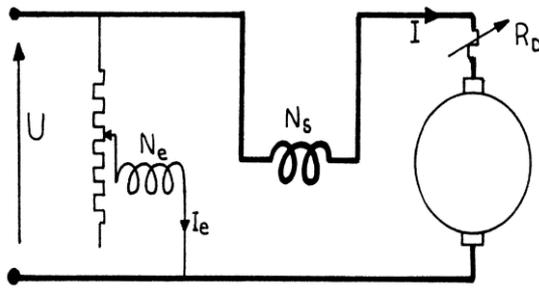


Figure 6 : Schéma d'une machine à courant continu à excitation composée

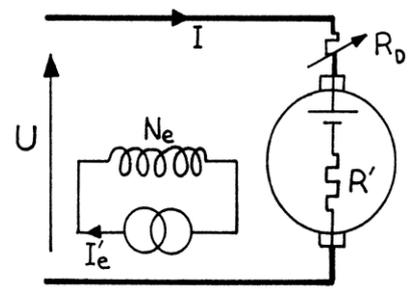


Figure 7 : Schéma équivalent d'une machine à courant continu à excitation composée.

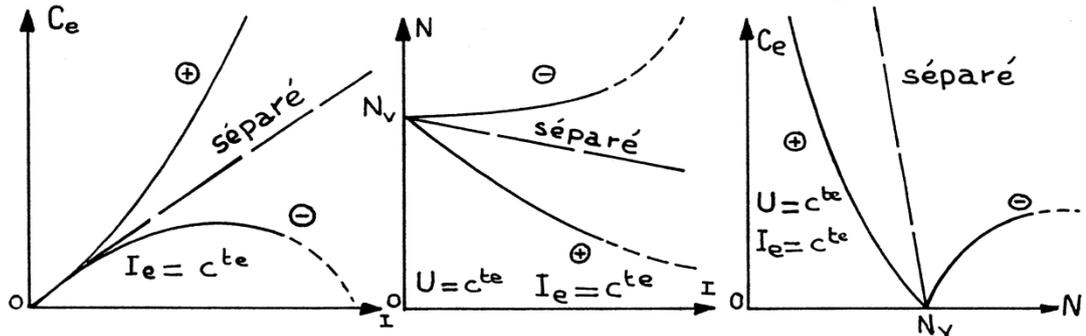


Figure 8 : Caractéristiques mécaniques d'une machine à courant continu à excitation composée.

3. MODELE THEORIQUE DE LA MACHINE A COURANT CONTINU:

Le modèle de la machine à courant continu à excitation indépendante est déduit de la machine biphasée en supposant que les variables sont exprimées dans le référentiel α - β relié au stator (inducteur de la machine cc)

Les équations de la machine cc sont:

$$U_e = (R_e + sL_e)I_e$$

$$U_a = (R_a + sL_a)I_a + P \cdot L_{ea} \cdot I_e \cdot \Omega$$

$$C_e = P \cdot L_{ea} \cdot I_e \cdot I_a$$

U_e : Tension d'excitation ;

I_e : Courant d'excitation ;

U_a : Tension aux bornes de l'induit ;

I_a : Courant d'induit ;

R_e : Résistance du circuit d'excitation ;

R_a : Résistance du circuit d'induit ;

L_e : Inductance du circuit d'excitation ;

L_a : Inductance du circuit d'induit ;

L_{ea} : Inductance mutuelle électrique ;

P : Nombre de paires de pôles;

C_e : Couple électromagnétique;

Ω : Vitesse angulaire du rotor.

4. MODELE THEORIQUE DU SYSTEME MECANIQUE MULTI-MASSSES:

Les équations décrivant le système mécanique sont déduites du modèle d'étude du mouvement de Lagrange suivant:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{d\dot{q}_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} + \frac{dW_d}{d\dot{q}_i} = Q_i ; \quad \boxed{L=W_c+W_p}$$

W_c : est l'énergie cinétique du système.

W_p : est l'énergie potentielle du système.

W_d : est l'énergie dissipée.

pour un mouvement de rotation nous avons: $q_i = \varphi_i$, $\dot{q}_i = \Omega_i$, $Q_i = C_i$

φ_i , Ω_i : sont respectivement les déplacement et vitesse angulaires de l'élément i ,

C_i : est le couple appliqué à l'élément i .

Donc l'équation de Lagrange généralisée devient (pour chaque élément du système):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dW_c}{d\Omega_i} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{dW_p}{d\Omega_i} \right) - \frac{dW_c}{d\varphi_i} + \frac{dW_p}{d\varphi_i} + \frac{dW_d}{d\Omega_i} = C_i$$

Les énergies cinétique, potentielle et dissipée d'un système mécanique à (n) masses en mouvement de rotation ont pour expression :

$$W_c = \sum_{i=1}^n \frac{J_i \cdot \Omega_i^2}{2};$$

$$W_p = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{k_{i,i+1} \cdot (\varphi_i - \varphi_{i+1})^2}{2};$$

$$W_d = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\beta_{i,i+1} \cdot (\Omega_i - \Omega_{i+1})^2}{2}$$

En combinant ces dernières expression avec l'équation de Lagrange nous obtenons notre modèle mécanique à (n) masses qui est décrit par le système d'équation suivant [2]:

$$C_e - \frac{k_{12}}{s} (\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} = J_1 s \Omega_1$$

$$\frac{k_{12}}{s} (\Omega_1 - \Omega_2) - \frac{k_{23}}{s} (\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23} (\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} = J_2 s \Omega_2$$

$$\frac{k_{n-2,n-1}}{s} (\Omega_{n-2} - \Omega_{n-1}) - \frac{k_{n-1,n}}{s} (\Omega_{n-1} - \Omega_n) + \beta_{n-2,n-1} (\Omega_{n-2} - \Omega_{n-1}) - \beta_{n-1,n} (\Omega_{n-1} - \Omega_n) - C_{r,n-1} = J_{n-1} s \Omega_{n-1}$$

$$\frac{k_{n-1,n}}{s} (\Omega_{n-1} - \Omega_n) + \beta_{n-1,n} (\Omega_{n-1} - \Omega_n) - C_{rn} = J_n s \Omega_n$$

Où :

J_i : Moment d'inertie de la nième masse ;

Ω_i : Vitesse angulaire de la nième masse ;

C_{ri} : Couple résistant appliqué à la nième masse ;

$k_{i,i+1}$: Coefficient de rigidité entre les masses i et $i+1$;

$\beta_{i,i+1}$: Coefficient d'amortissement entre les masses i et $i+1$;

Nous allons par la suite simuler un modèle mécanique à trois (3) masses qui est déduit du système généralisé ci-dessus et qui par conséquent serait décrit par un système à trois équations comme suit :

$$C_e - \frac{k_{12}}{s} (\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} = J_1 s \Omega_1$$

$$\frac{k_{12}}{s} (\Omega_1 - \Omega_2) - \frac{k_{23}}{s} (\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23} (\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} = J_2 s \Omega_2$$

$$\frac{k_{23}}{s} (\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{23} (\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r3} = J_3 s \Omega_3$$

5. DONNEES NUMERIQUES D'UN ENTRAINEMENT 3-MASSSES A BASE DE MOTEUR A COURANT CONTINU

Nous allons considérer, dans une première application d'entraînement multi-masses, un moteur *cc* à excitation séparée, de puissance nominale de $2kW$ avec un courant d'induit nominal de $20A$ et une vitesse angulaire égale à 230 rad/s qui fonctionne à tensions constantes $U_a = 100V$ et $U_e = 5V$.

Les paramètres électriques et mécaniques de l'entraînement du moteur cc sont donnés par :

$R_a = 0.18\Omega$, $R_e = 3.5\Omega$, $L_a = 0.1H$, $L_e = 0.0062H$ et $L_{ae} = 0.095H$, $J_t = 0.04\text{kg.m}^2$, $\beta_i, i+1 = 0.007\text{Nms/rad}$, $k_i, i+1 = 20\text{Nm/rad}$ ($i = 1, 2$) et $P = 3$;

Et les valeurs de couple de charge minimale et maximale sont respectivement :

$C_{r\text{min}} = \sum C_{ri} = 0\text{N.m}$; et $C_{r\text{max}} = \sum C_{ri} = 10\text{N.m}$;

La contribution d'inertie du moteur dans l'inertie totale du système dépend du type d'entraînement. Nous attribuons initialement à la première masse (moteur) 50% de l'inertie totale, à la deuxième masse 25%, et à la troisième masse 25% de l'inertie totale, par ailleurs d'autres cas seront également étudiés pour analyser l'effet de la variation du moment d'inertie sur la réponse du système.

6. SIMULATION DU MODELE DE L'ENTRAINEMENT 3-MASSSES A BASE DE MOTEUR A COURANT CONTINU SOUS MATLAB-SIMULINK :

Le modèle tel que développé sous Matlab-Simulink est présenté à la figure :

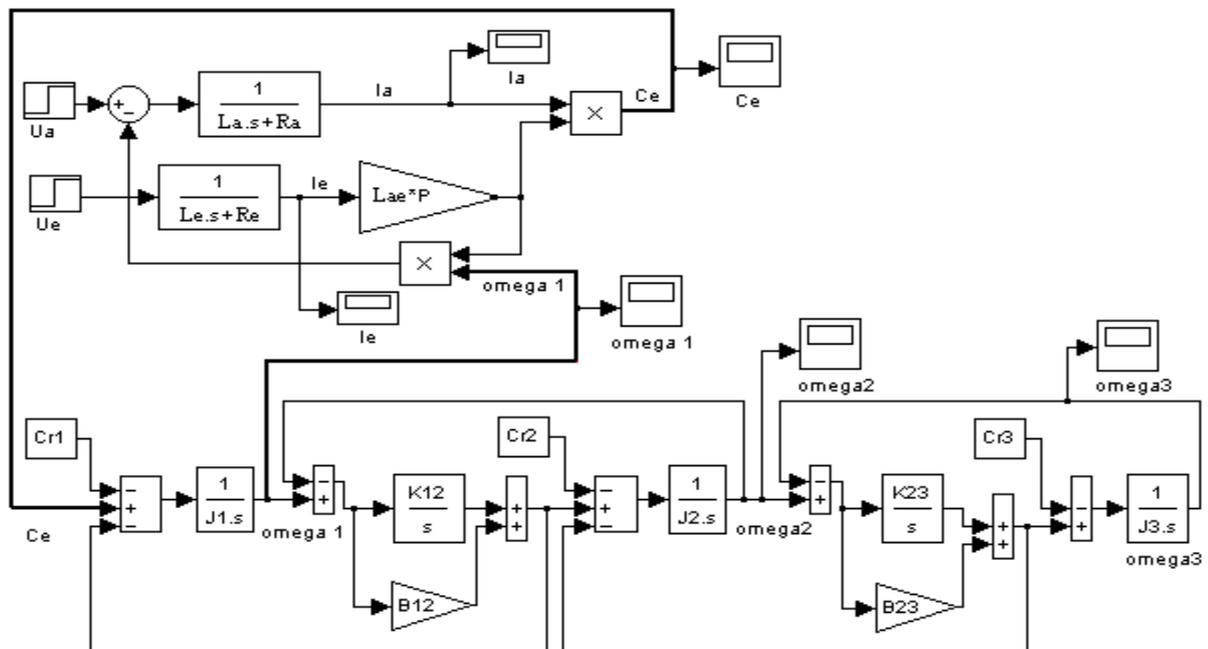


Figure 9 : Modèle de simulation développé sous Matlab-Simulink de l'entraînement 3-masses à base de machine à courant continu

Tout en utilisant les données numériques présentées au paragraphe 5, nous considérons dans un premier temps un couple de charge ($Cr3$) nul, quant aux couples résistants $Cr1$ et $Cr2$ dus aux frottements, nous les considérons négligeables donc nuls tout le long de l'étude.

D'abord, les résultats de simulation présentés à la figure 10 , mettent en valeur la situation de démarrage du moteur à courant continu sans système de commande à vitesse variable.

Quoi que nous allons présenter quelques fois à titre indicatif l'état au démarrage de la machine électrique, nous allons ignorer dans cette étude cette situation qui devrait être traitée pratiquement par des systèmes de commande adaptées, et ce pour nous pencher sur l'analyse de variations aux quelles le système est sujet quand le régime permanent est établi, et particulièrement la mise en valeur du phénomène oscillatoire lié à la structure multi-masses du système mécanique suite à ces variations.

Nous appliquons dans une seconde étape une variation de type échelon du couple de charge au niveau de la troisième masse $\Delta Cr3=6N.m$ à l'instant $t =10 s$. La figure 11, représente les résultats de simulation de ce premier cas. Les différents cas qui suivront cette première application seront analysés autour de cette variation.

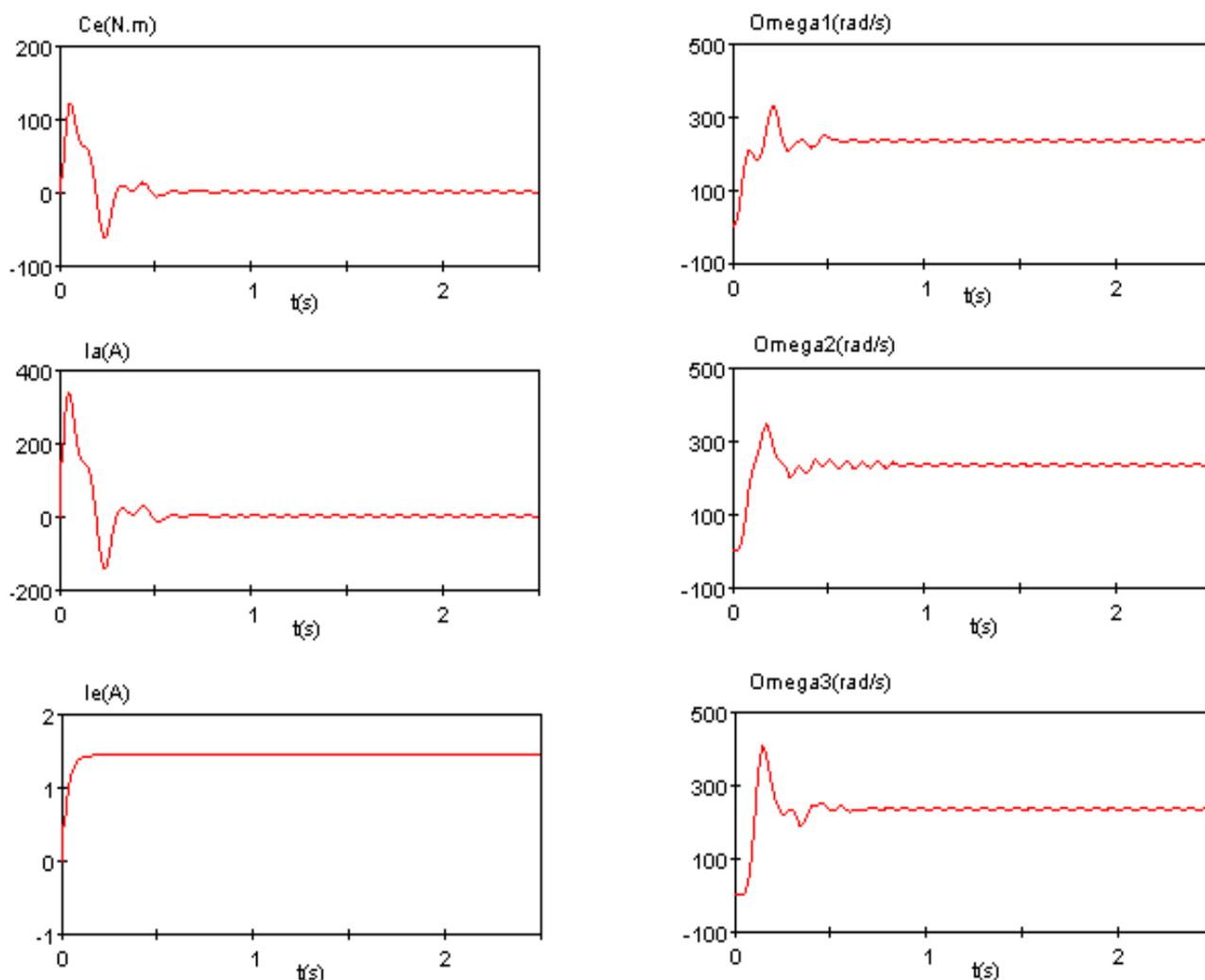


Figure 10 : Courbes au démarrage, du couple électromagnétique, du courant d'induit, du courant d'excitation et des vitesses des trois masses (Mcc/ Matlab-Simulink).

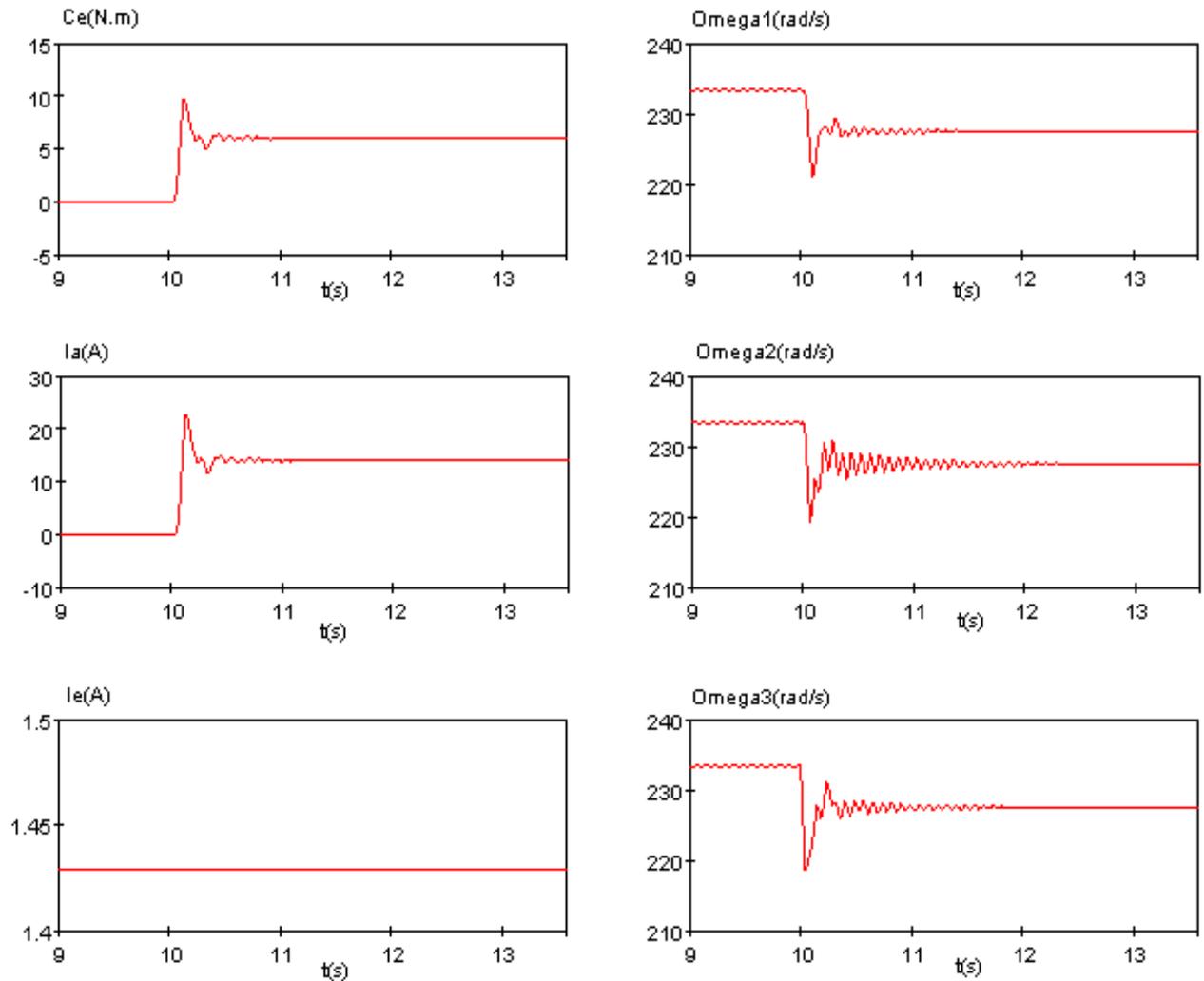


Figure 11: Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses et des courants d’induit et d’excitation, suite à une variation du couple de charge $\Delta Cr3=6N.m$ à $t = 10 s$ (Mcc/ Matlab-Simulink).

Dans ce qui suit nous faisons varier la valeur du coefficient de rigidité entre la deuxième et la troisième masse K_{23} pour étudier son effet sur la réponse du système, tous les autres paramètres restent constants. Il est à préciser que le choix d’un coefficient de rigidité élevé permet de ramener notre système mécanique (à 3 masses) vers un système à 2 masses; les résultats de simulation obtenus dont nous n’avons présenté ici qu’une partie pour ne pas alourdir le document, montrent que le système à 3 masses ainsi que le système ramené à 2 masses sont sujets aux oscillations (résonance mécanique), différemment du modèle à une masse [1] qui suppose que les liaisons sont parfaitement rigides. Par ailleurs, nous remarquons d’après la figure 12, et c’est ce que nous voulions démontrer via cette application, que plus le coefficient de rigidité K_{23} est important, mieux les oscillations sont amorties.

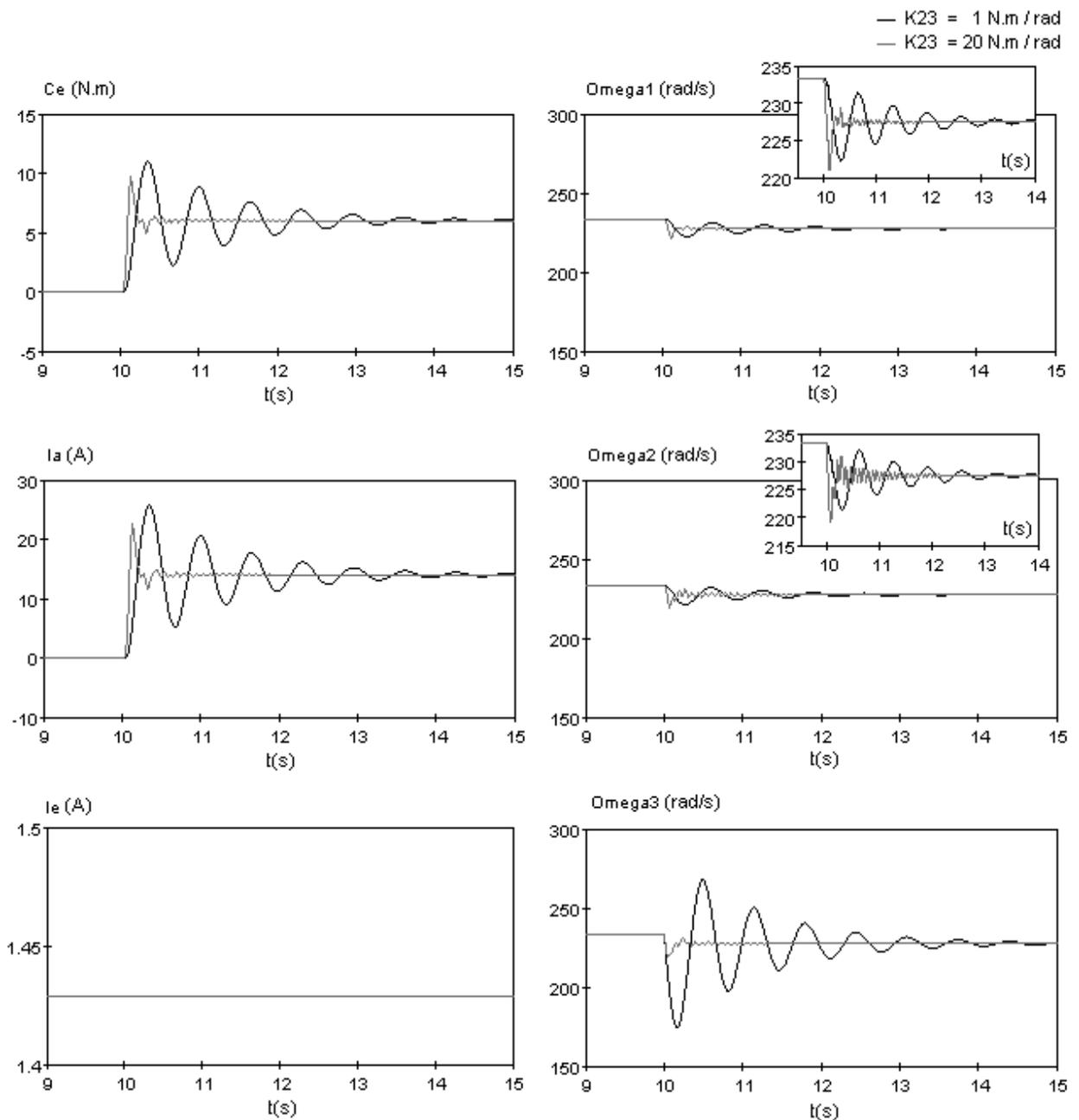


Figure 12 : Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation $\Delta Cr3=6N.m$ à $t = 10s$, pour différentes valeurs du coefficient de rigidité K_{23} (Mcc/ Matlab-Simulink)

Nous faisons maintenant varier le moment d'inertie total de la deuxième et de la troisième masse et étudier l'effet de cette variation sur la réponse du système, tous les autres paramètres restent constants y compris le moment d'inertie du moteur. Nous remarquons d'après la figure 13 que lorsque le moment d'inertie de la partie mécanique devient important par rapport à la celui du moteur les oscillations sont mieux amorties.

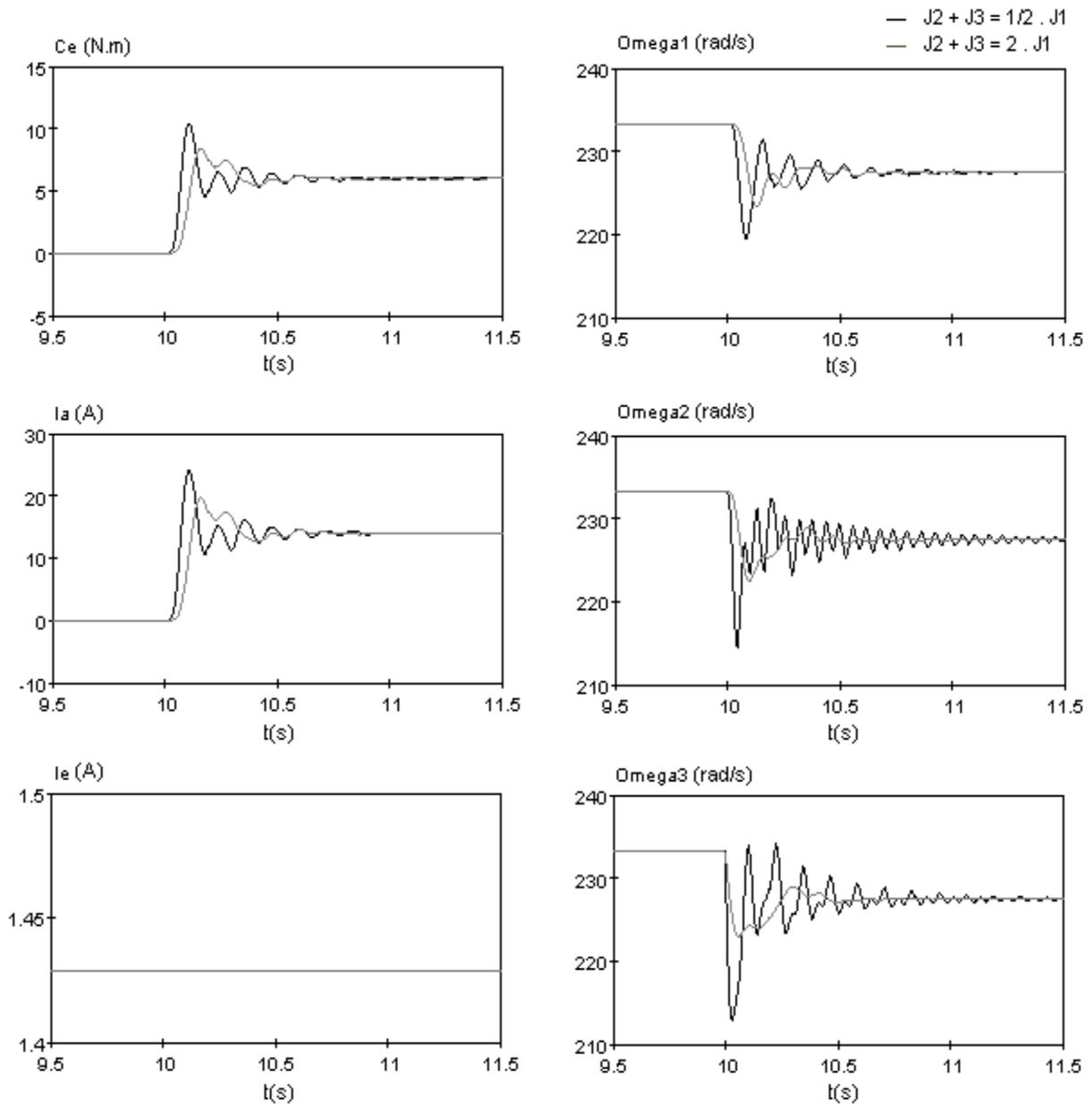


Figure 13: Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation $\Delta Cr3=6N.m$ à $t = 10$ s, pour différentes valeurs du moment d'inertie $[J1+J2]$ (Mcc/ Matlab-Simulink)

7. CONCLUSION GENERALE:

On a établi dans ce travail le modèle d'un modèle multi-masses d'un entraînement électromécanique à base de machine à courant continu MCC à excitation indépendante .

La modélisation et la simulation de machine à courant continu MCC à excitation indépendante , ont permis de déterminer et d'analyser les différentes caractéristiques du couple et de vitesse. Ce modèle servira de référence pour élaborer des simulations numériques sous Matlab-Simulink ,

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] Mamadou Lamine Doumbia, « Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de philosophiae doctor (PhD) en génie électrique, Ecole polytechnique de Montréal, Mai 2000.
- [2] M.L. Doumbia, G. Roy, V. Rajagopalan and V. Missurenko, « Comparative study of multi-mass models of electrical drives with asynchronous motors», Can. J. Elect. & comp. Eng., Vol. 23, No. 3, 1998.
- [3] Sergey Edward Lyshevski, « Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics », CRC Press LLC, N.W. 2000.
- [4] P.M. Anderson, and Anjan Bose, « Stability simulation of wind turbine systems», IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 12, December 1983, pp.3791-3795.
- [5] N. Laverdure, S. Bacha, D. Roje, B. Raison, and F. Dumas, « Elements of modeling of wind power systems with energy management: two structures in comparison », IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society , Vol. 2, 05-08 November 2002, pp.1083-1088.
- [6] E.S. Abdin, and W. Xu, « Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine induction generator unit», International conference on Power System Technology, Vol. 2, 18-21 August 1998, pp.1198-1202.
- [7] Ezzeldin S. Abdin, and Wilson Xu, « Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine induction generator unit», IEEE Transactions on Energy Conversion , Vol. 15, No. 1, March 2000, pp.91-96.
- [8] A. Murdoch, J. R. Winkelman, and S. H. Javid, « Control design and performance analysis of a 6 MW Wind Turbine-Generator », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 5, May 1983, pp.1340-1347.