



Poly

EPM-RT-2004-04

MODÉLISATION DE SYSTÈMES ÉLECTROMÉCANIQUES
MULTI-MASSES À BASE DE MACHINES ASYNCHRONES,
À L'AIDE DES OUTILS MATLAB ET EMTP,
AVEC APPLICATION AUX ÉOLIENNES

par

Sanae Rechka, Gilles Roy,
Sébastien Denetiere et Jean Mahseredjian

Département de Génie Électrique
Section Énergie électrique

École Polytechnique de Montréal

Juillet 2004

©2004

Sanae Rechka, Gilles Roy, Sébastien Denetiere, Jean Mahseredjian
Tous droits réservés

Dépôt légal :

Bibliothèque nationale du Québec, 2004
Bibliothèque nationale du Canada, 2004

EPM-RT-2004-04

Modélisation de systèmes électromécaniques multi-masses à base de machines asynchrones, à l'aide des outils Matlab et EMTP, avec application aux éoliennes

par : Sanae Rechka, Gilles Roy, Sébastien Denetiere, Jean Mahseredjian

Département de Génie Électrique, Section Énergie électrique

École Polytechnique de Montréal

Toute reproduction de ce document à des fins d'étude personnelle ou de recherche est autorisée à la condition que la citation ci-dessus y soit mentionnée.

Tout autre usage doit faire l'objet d'une autorisation écrite des auteurs. Les demandes peuvent être adressées directement aux auteurs (consulter le bottin sur le site <http://www.polymtl.ca/>) ou par l'entremise de la Bibliothèque :

École Polytechnique de Montréal
Bibliothèque – Service de fourniture de documents
Case postale 6079, Succursale «Centre-Ville»
Montréal (Québec)
Canada H3C 3A7

Téléphone: (514) 340-4846

Télécopie: (514) 340-4026

Courrier électronique: biblio.sfd@polymtl.ca

Ce rapport technique peut-être repéré par auteur et par titre dans le catalogue de la Bibliothèque :
<http://www.polymtl.ca/biblio/catalogue.htm>

Remerciements

Je tiens à remercier M. Gilles Roy (EPM - École Polytechnique de Montréal) pour le soutien technique qu'il m'a apporté pour mener à bonne fin ce travail ainsi que pour ses encouragements et sa grande présence. Je remercie M. Sébastien Dennetiere (IREQ - Institut de recherche Hydro-Québec) d'avoir supervisé de près ce projet ainsi que de sa disponibilité pour répondre à mes questions. Et finalement je remercie M. Jean Mahseredjian (IREQ - Institut de recherche Hydro-Québec) de son apport à cette étude ainsi que de m'avoir intégré à son équipe de recherche pour la réalisation de mon stage donnant lieu ainsi à la production de ce rapport.

Sommaire

Le présent rapport représente le résultat d'un travail de stage effectué à l'Institut de recherche Hydro-Québec (IREQ) sous le parrainage de l'École Polytechnique de Montréal (EPM). Il décrit toute l'étude suivie aux fins de validation d'un modèle d'entraînement électrique multi-masses à base de machine asynchrone – le modèle de celle-ci ayant déjà été développé à l'IREQ - dans l'objectif de l'intégrer dans la bibliothèque de l'outil de simulation EMTP; de nombreux résultats d'analyse de modèles multi-masses, tenant compte de différents cas pratiques, font partie de cet ouvrage.

Ce travail se présente en trois chapitres:

- Le premier chapitre traite le développement d'un modèle multi-masses d'un entraînement électromécanique à base de machine à courant continu. Ce modèle servira de référence pour élaborer des simulations numériques sous Matlab-Simulink et sous EMTP, dont les résultats sont analysés et ensuite comparés pour mettre en relief les similitudes et les différences entre les deux plates-formes de simulation.

- Dans le deuxième chapitre, nous mettons au point un modèle multi-masses d'un entraînement électromécanique à base de machine asynchrone que nous simulons sous Matlab-Simulink ; nous comparons les résultats obtenus avec les résultats de simulation du modèle développé par l'IREQ sous EMTP, et ce pour fins de validation de ce dernier, particulièrement en mode moteur. Différents cas pratiques sont considérés pour l'analyse des deux modèles.

- Au troisième chapitre, nous procédons à l'étude de ces mêmes modèles à base de machine asynchrone en mode générateur dans une application de générateur éolienne. Un modèle d'aérogénérateur, utilisant une machine asynchrone, est mis au point et évalué sous Simulink et EMTP; le couple exercé par le vent sur l'éolienne est également modélisé dans ce système.

Il est à noter que le développement des modèles d'entraînement à base de machine à courant continu ou à base de machine asynchrone a été inspiré principalement de la thèse de Mamadou Doumbia [1] tout en se référant à d'autres publications et ouvrages scientifiques [2], [3]. Quant à la mise au point de l'application de l'éolienne comme telle, de nombreux livres et articles scientifiques nous ont été d'un grand support pour dresser une démarche scientifique originale enrichie par les données numériques de l'application pratique, fournies directement par Tomas Petru et Torbjörn Thiringer en complément de ceux déjà présents dans leur publication citée en référence [12]. Cette étude présente en effet un support souple et riche en matière de données et résultats liés au sujet.

Table des Matières

Remerciements	i
Sommaire	ii
Table des matières	iii
Introduction	1
Chapitre 1 - Modélisation d'entraînement électromécanique	
multi-masses à base de machine à courant continu	3
1.1 - Modèle théorique de la machine à courant continu	3
1.2 - Modèle théorique du système mécanique multi-masses	3
1.3 - Données numériques d'un entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu	5
1.4 - Simulation du modèle de l'entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu sous Matlab-Simulink	6
1.5 - Simulation du modèle de l'entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu sous EMTP	11
1.6 - Comparaison des résultats obtenus par EMTP et Matlab-Simulink	16
Chapitre 2 - Modélisation d'entraînement électromécanique	
multi-masses à base de machine asynchrone	19
2.1 - Modèle théorique de la machine asynchrone	19
2.2 - Modèle théorique du système mécanique multi-masses	20
2.3 - Données numériques d'un entraînement 3-masses à base de moteur asynchrone	22
2.4 - Simulation du modèle de l'entraînement 3-masses à base de moteur asynchrone sous Matlab-Simulink	22

2.5 - Simulation du modèle de l'entraînement 3-masses à base de moteur asynchrone sous EMTP	28
2.6 - Comparaison des résultats obtenus par EMTP et Matlab-Simulink	33
Chapitre 3 - Application de la modélisation multi-masses	
du générateur asynchrone au domaine des éoliennes	36
3.1 - Modèle théorique de la turbine à vent	36
3.2 - Description et données numériques d'un modèle 2-masses d'une éolienne à base de machine asynchrone	38
3.3 - Simulation du système de l'éolienne à base de machine asynchrone sous Matlab-Simulink	40
3.4 - Validation du système de l'éolienne à base de machine asynchrone sous EMTP	51
Conclusion	56
Bibliographie	58

Introduction

De nombreux systèmes électromécaniques peuvent être modélisés en tant que systèmes multi-masses, 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.

Conscient de l'importance d'une telle représentation, l'Institut de recherche Hydro-Québec (IREQ) s'est intéressé à développer un modèle d'entraînement électrique multi-masses à base de machine asynchrone, dans l'objectif de l'intégrer dans la bibliothèque de l'outil de simulation EMTP. Une partie importante de ce développement s'est fait à travers un projet de stage réalisé à l'IREQ par l'auteur principal de ce rapport (S. Rechka).

Le projet de stage comportait deux objectifs: le premier était la validation d'un modèle d'entraînement électrique multi-masses, à base de machine asynchrone, opérant en mode moteur ainsi qu'en mode générateur dans des applications d'éoliennes; le second objectif était une formation avancée dans l'apprentissage de l'outil EMTP.

Nous avons d'abord commencé par le développement d'un modèle multi-masses d'un entraînement électromécanique à base de machine à courant continu inspiré de la thèse de M. Mamadou Doumbia, 2000 [1] ainsi que des références [2], [3]. Ce modèle a servi pour élaborer des simulations numériques tant sous Matlab-Simulink que sous EMTP, lesquels résultats de simulations ont été comparés pour mettre en relief les similitudes et/ou les différences entre les deux environnements de simulation; ceci a fait l'objet du chapitre 1 du présent rapport.

Au chapitre 2, nous avons mis au point un modèle multi-masses d'un entraînement électromécanique à base de machine asynchrone toujours sur la base des références [1] et [2], nous l'avons simulé sous Matlab-Simulink et nous avons comparé les résultats obtenus avec les résultats de simulation du modèle développé par l'IREQ sous EMTP, et ce en utilisant les mêmes données numériques de la machine asynchrone et de la partie mécanique multi-masses dans les deux schémas de simulation. Une analyse approfondie des modèles multi-masses du

moteur asynchrone a été également effectuée, en simulant différents cas pratiques et ce sous Simulink et EMTP.

Au chapitre 3, nous avons procédé à l'étude de ces mêmes modèles multi-masses de la machine asynchrone en mode générateur dans une application d'éolienne; un modèle d'aérogénérateur à base de machine asynchrone a été en effet mis au point et évalué sous Simulink et EMTP ; le couple exercé par le vent sur l'éolienne est également modélisé dans ce système.

Les résultats les plus importants atteints dans cette étude sont finalement discutés en conclusion.

Chapitre 1

Modélisation d'entraînement électromécanique multi-masses à base de machine à courant continu

1.1 - Modèle théorique de la machine à courant continu [1]-[2]

Le modèle de la machine à courant continu à excitation indépendante est déduit de la machine biphasée [1] 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 :

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

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

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

où :

- 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 ;
- P : Nombre de paires de pôles ;
- C_e : Couple électromagnétique.
- Ω : Vitesse angulaire du rotor.

1.2 - Modèle théorique du système mécanique multi-masses

Les équations décrivant le système mécanique sont déduites du modèle d'étude du mouvement

de Lagrange suivant : $\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} + \frac{dWd}{dq_i} = Q_i$; $L = W_c - W_p$

avec :

Wc : est l'énergie cinétique du système.

Wp : est l'énergie potentielle du système.

Wd : est l'énergie dissipée.

ou encore :
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dWc}{d\dot{q}_i} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{dWp}{d\dot{q}_i} \right) - \frac{dWc}{dq_i} + \frac{dWp}{dq_i} + \frac{dWd}{d\dot{q}_i} = Qi$$
, avec :

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) :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dWc}{d\Omega_i} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{dWp}{d\Omega_i} \right) - \frac{dWc}{d\varphi_i} + \frac{dWp}{d\varphi_i} + \frac{dWd}{d\Omega_i} = Ci$$

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

$$Wc = \sum_{i=1}^n \frac{J_i \cdot \Omega_i^2}{2} ; \quad Wp = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{k_{i,i+1} (\varphi_i - \varphi_{i+1})^2}{2} ; \quad Wd = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\beta_{i,i+1} (\Omega_i - \Omega_{i+1})^2}{2}$$

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

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

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

.....

.....

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

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

où :

- J_i : Moment d'inertie de la $i^{\text{ème}}$ masse ;
- Ω_i : Vitesse angulaire de la $i^{\text{ème}}$ masse ;
- C_{ri} : Couple résistant appliqué à la $i^{\text{ème}}$ 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 [2]:

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

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

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

1.3 - Données numériques d'un entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu

Nous allons considérer, dans une première application d'entraînement multi-masses [3], 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 :

$$R_a = 0.18\text{Ohm}, \quad R_e = 3.5\text{Ohm}, \quad L_{ea} = 0.1H, \quad L_a = 0.0062H \quad \text{et} \quad L_e = 0.095H, \quad J_i = 0.04\text{kg.m}^2, \\ \beta_{i,i+1} = 0.007\text{Nms/rad}, \quad k_{i,i+1} = 20\text{Nm/rad} \quad (i = 1, 2) \quad \text{et} \quad P = 3;$$

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

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

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.

1.4 - Simulation du modèle de l'entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu sous Matlab-Simulink

Le modèle tel que développé sous Matlab-Simulink est présenté à la figure 1.4.1 ci-dessous.

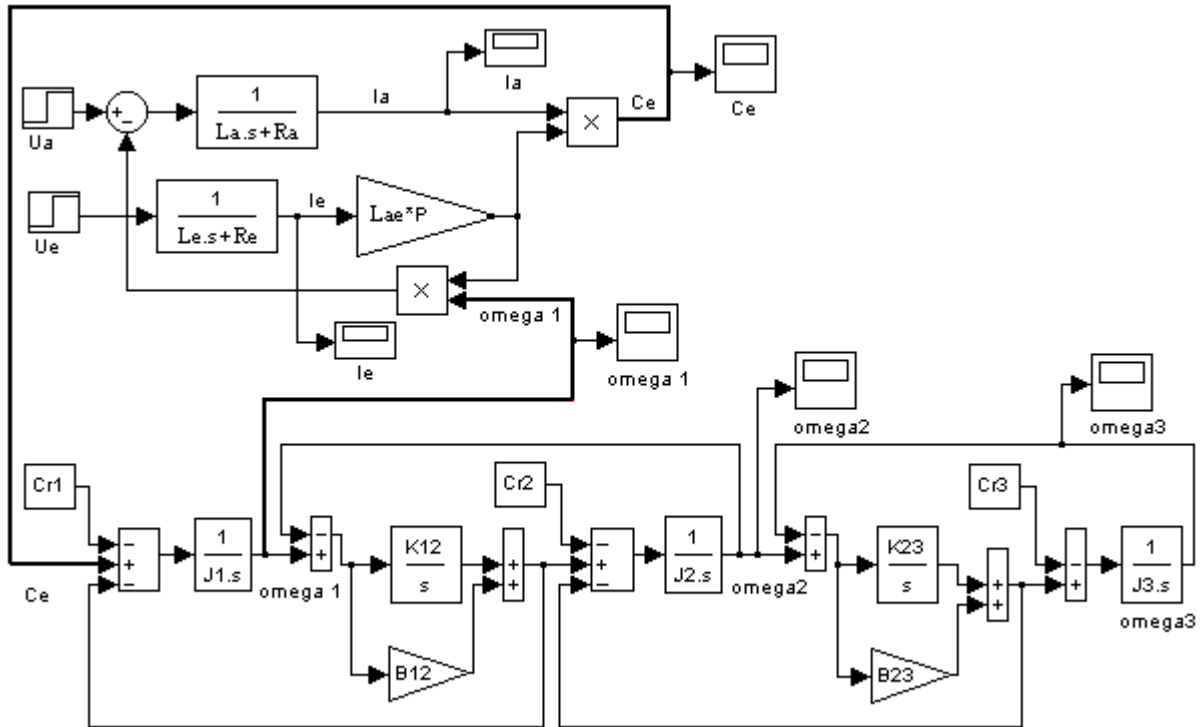


Fig. 1.4.1 : Modèle de simulation développé sous Matlab-Simulink de l'entraînement 3-masses à base de machine à courant continu

Tout en utilisant les données numériques présentées au paragraphe 1.3, nous considérons dans un premier temps un couple de charge (Cr_3) nul, quant aux couples résistants Cr_1 et Cr_2 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 1.4.2 mettent en valeur la situation de démarrage du moteur à courant continu sans système de commande à vitesse variable. Quoique 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 auxquelles 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 1.4.3 représente les résultats de simulation de ce premier cas. Les différents cas qui suivront cette première application seront analysés autour de cette variation.

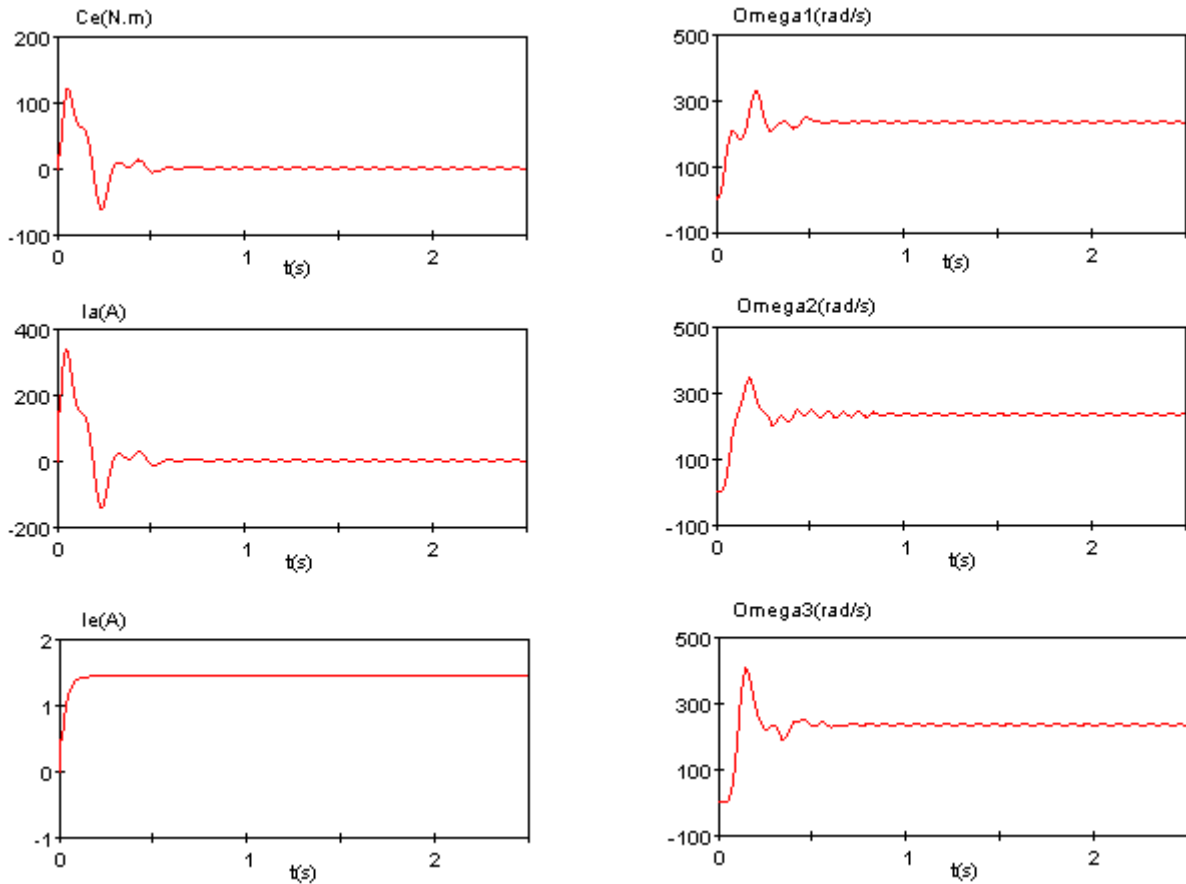


Fig. 1.4.2 : Courbes au démarrage, du couple électromagnétique, du courant d'induit, du courant d'excitation et des vitesses des trois masses (Mcc/ Matlab-Simulink)

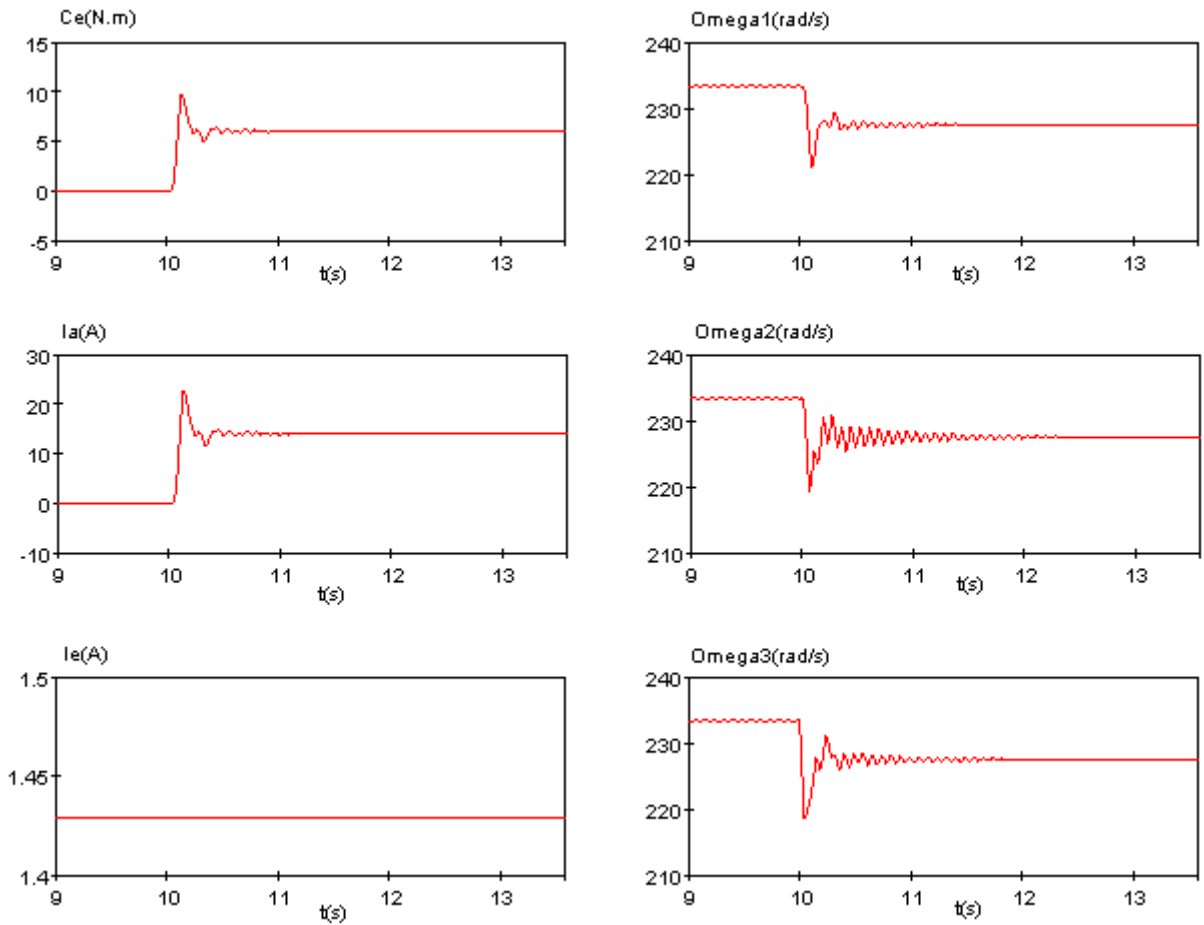


Fig. 1.4.3 : Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation du couple de charge $\Delta Cr_3 = 6 \text{ N.m}$ à $t = 10$ s (Mcc/ Matlab-Simulink)

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 1.4.4, 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.

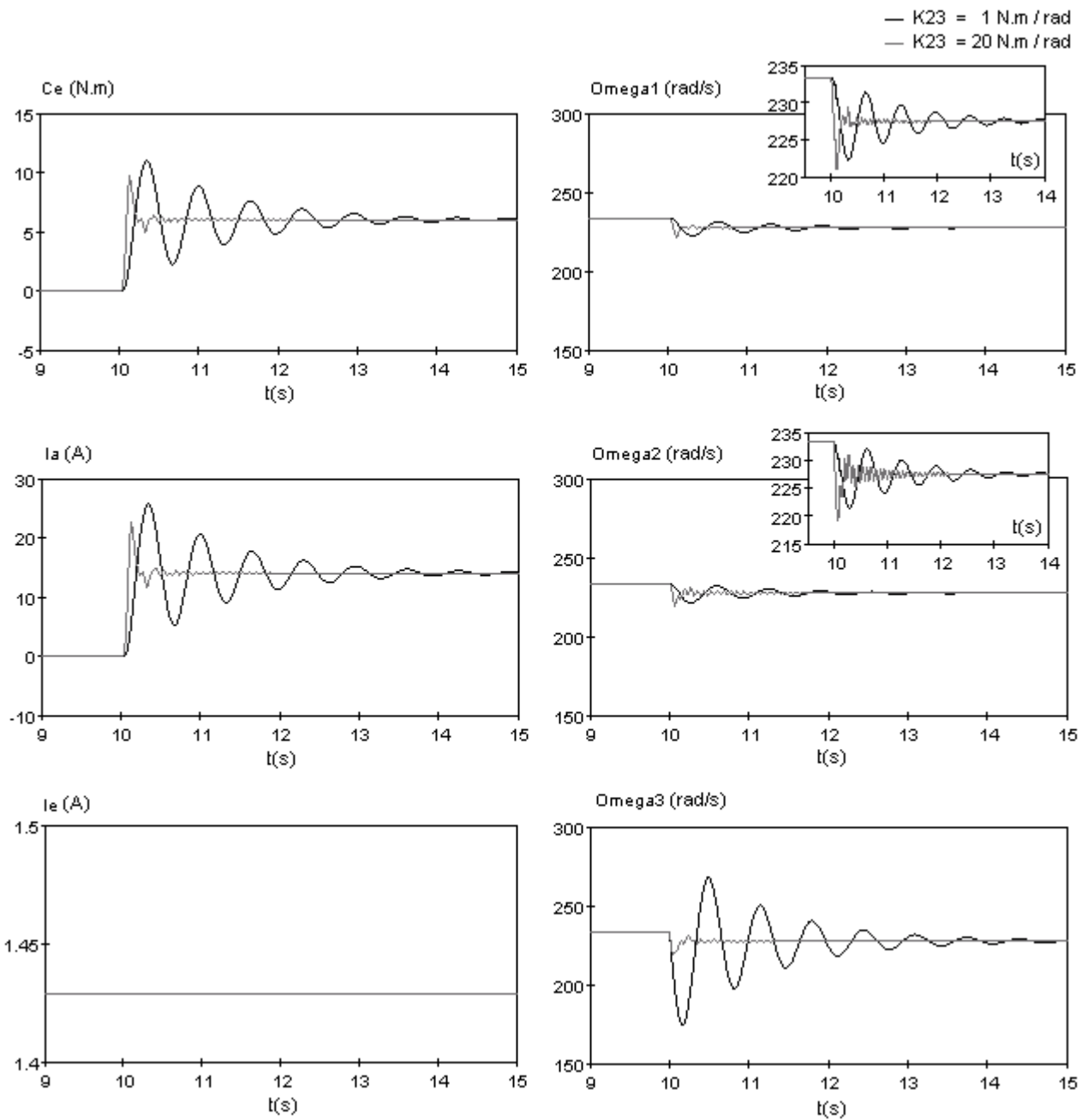


Fig. 1.4.4 : Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation $\Delta Cr3=6N.m$ à $t = 10s$, pour différentes valeurs du coefficient de rigidité K_{23} (Mcc/ Matlab-Simulink)

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 1.4.5 que lorsque le moment d'inertie de la partie mécanique devient important par rapport à celui du moteur les oscillations sont mieux amorties.

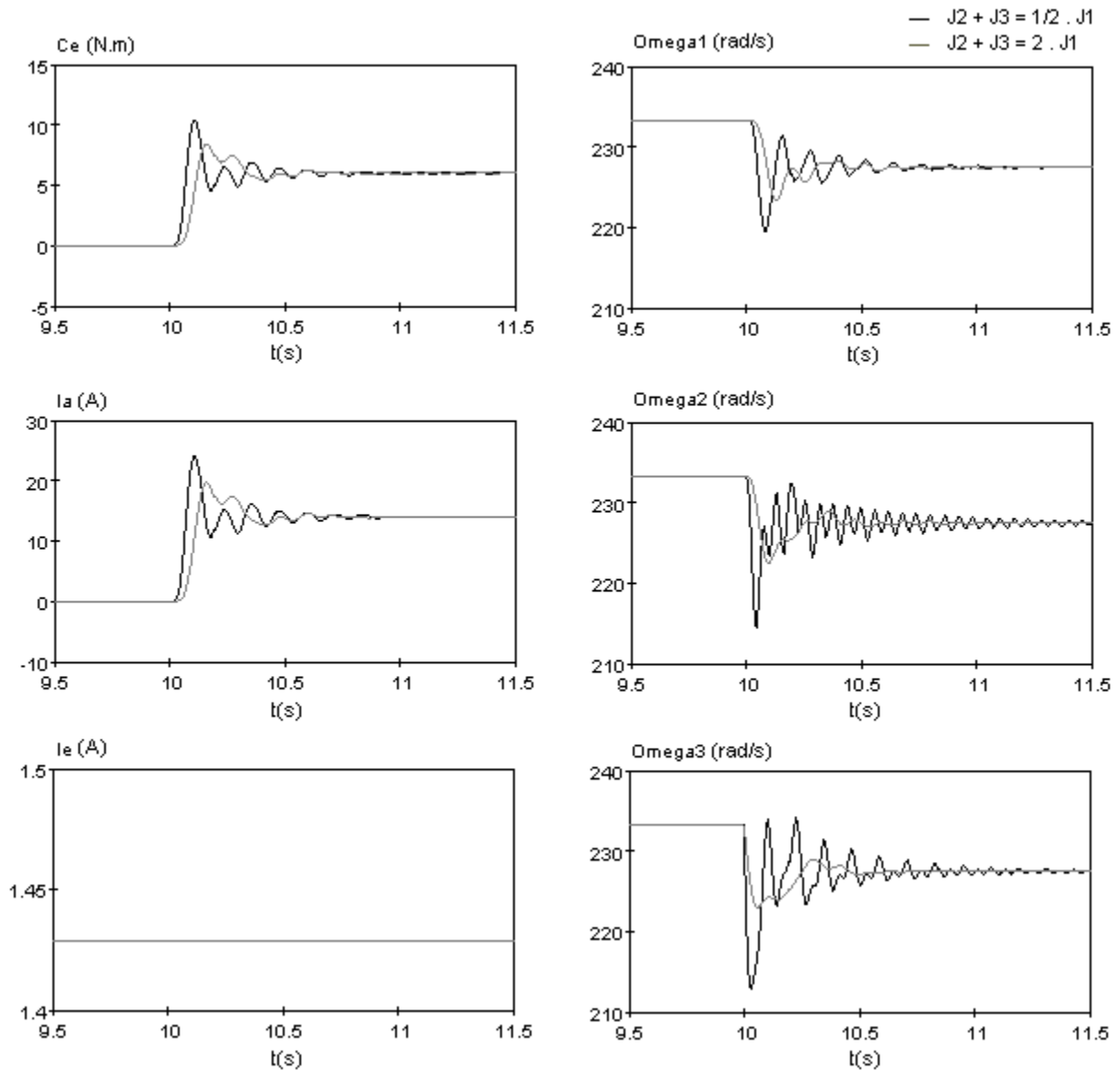


Fig. 1.4.5 : Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation $\Delta Cr3=6N.m$ à $t = 10$ s, pour différentes valeurs du moment d'inertie $[J_1+J_2]$ (Mcc/ Matlab-Simulink)

1.5 - Simulation du modèle de l'entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu sous EMTP

Le modèle tel que développé sous EMTP est présenté à la figure 1.5.1 ci-dessous, il est à noter que la structure du schéma est identique à celle développée sous Simulink où le contenu des blocs peut être visualisé au besoin.

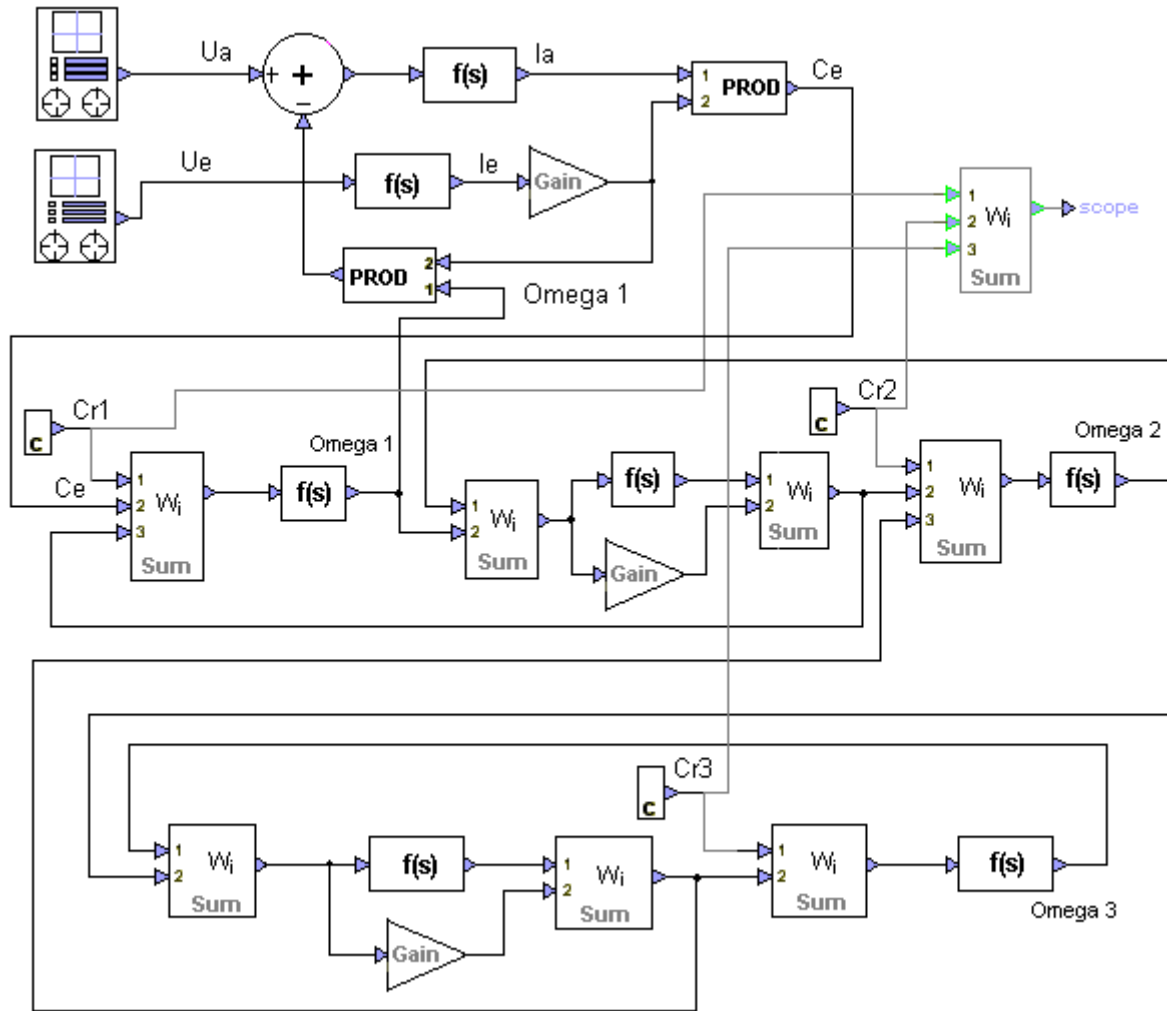


Fig. 1.5.1 : Modèle de simulation de l'entraînement 3-masses à base du moteur à courant continu, développé sous EMTP

En utilisant les données numériques présentées au paragraphe 1.3, nous procédons de la même manière que le paragraphe 1.4, ainsi les résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel EMTP sont présentés via les graphiques (Fig. 1.5.2 – 1.5.5) pour les mêmes cas étudiés précédemment sous Matlab-Simulink.

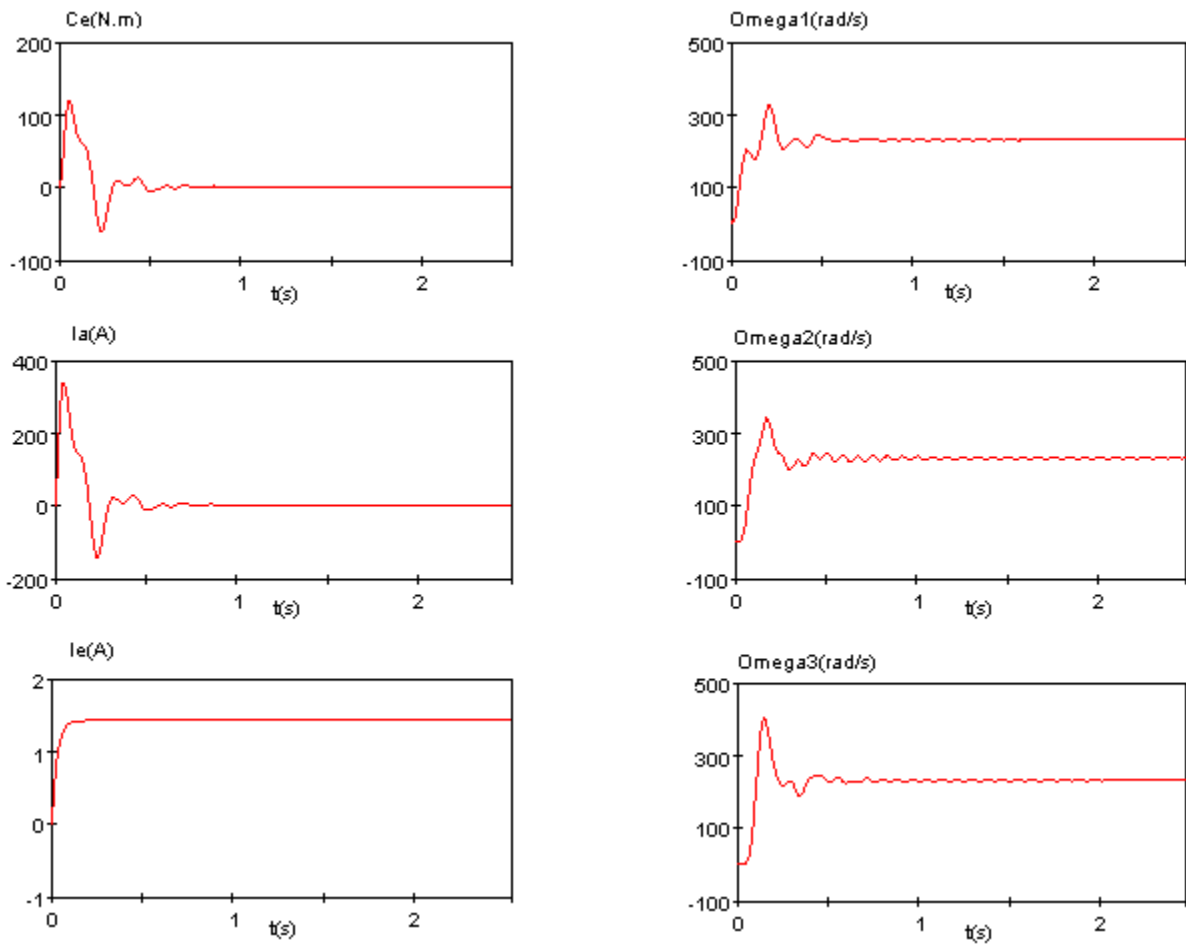


Fig. 1.5.2 : Courbes au démarrage, du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, et des courant d'induit et d'excitation (Mcc/ EMTP)

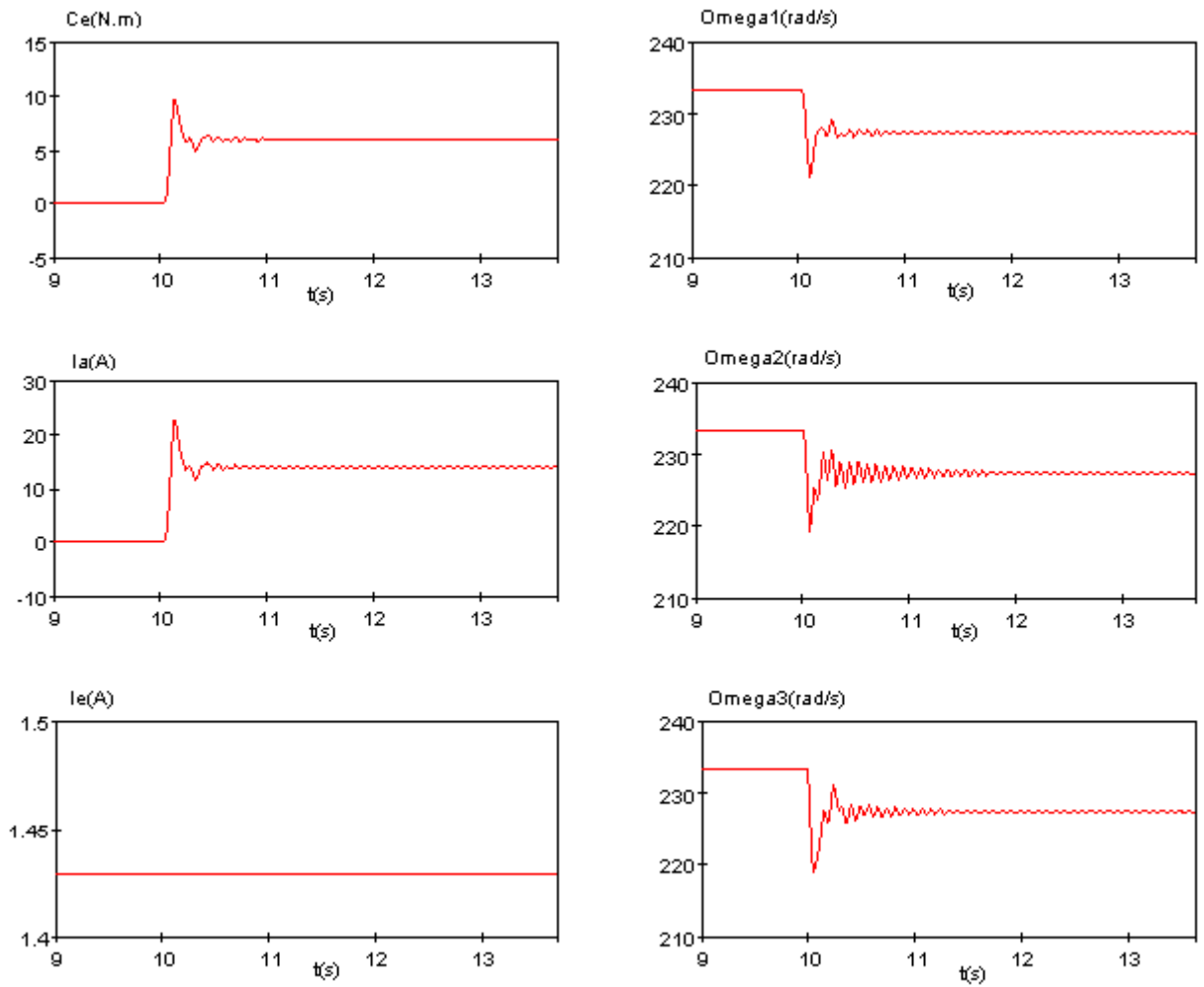


Fig. 1.5.3 : Courbes du couple électromagnétique, du courant d'induit, du courant d'excitation et des vitesses des trois masses, suite à une variation du couple de charge $\Delta C_{r3} = 6 \text{ N.m}$ à $t = 10 \text{ s}$ (Mcc/ EMTP)

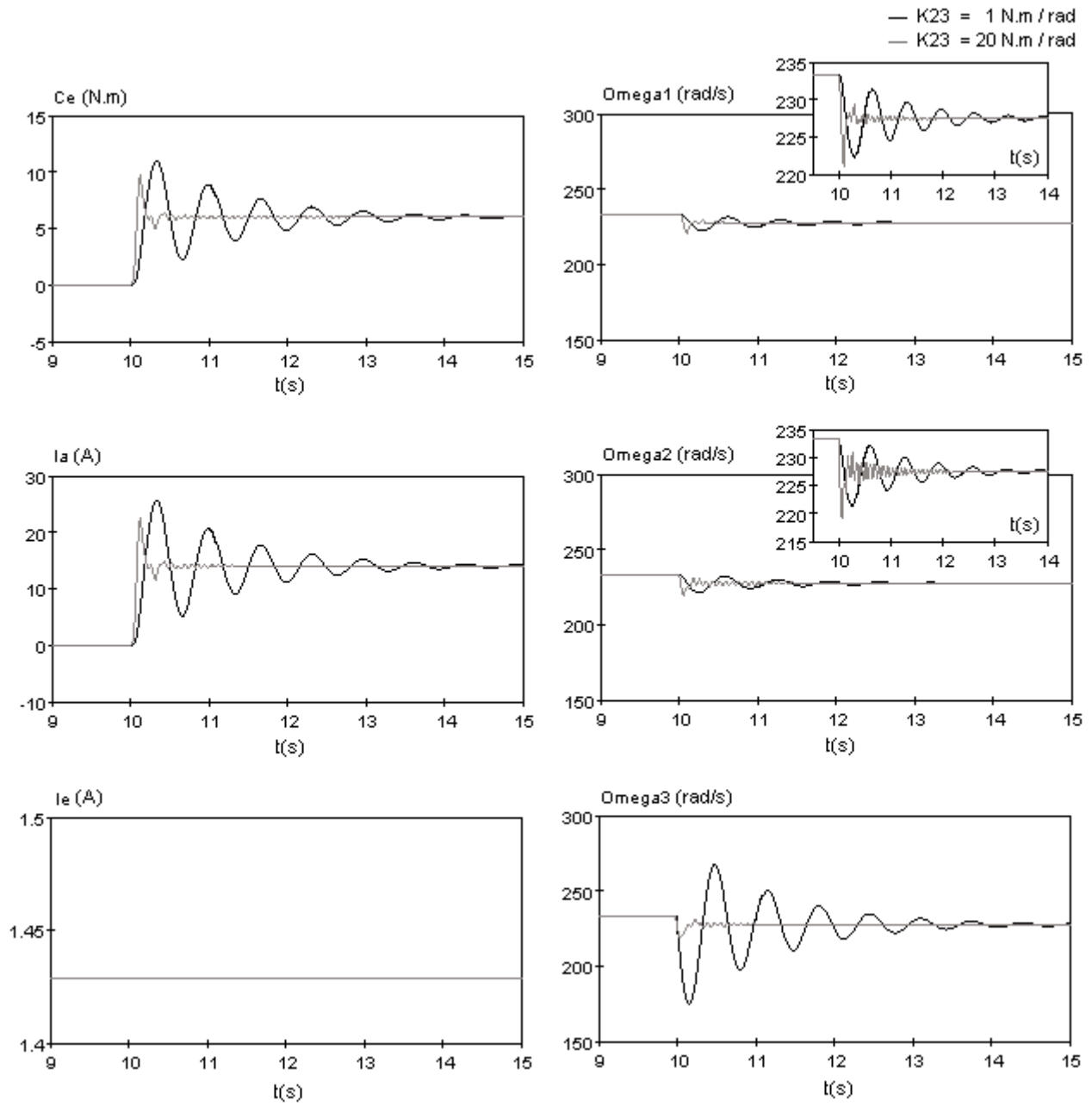


Fig. 1.5.4 : Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation $\Delta Cr_3 = 6 \text{ N.m}$ à $t = 10 \text{ s}$, pour différentes valeurs du coefficient de rigidité K_{23} (Mcc/ EMTP)

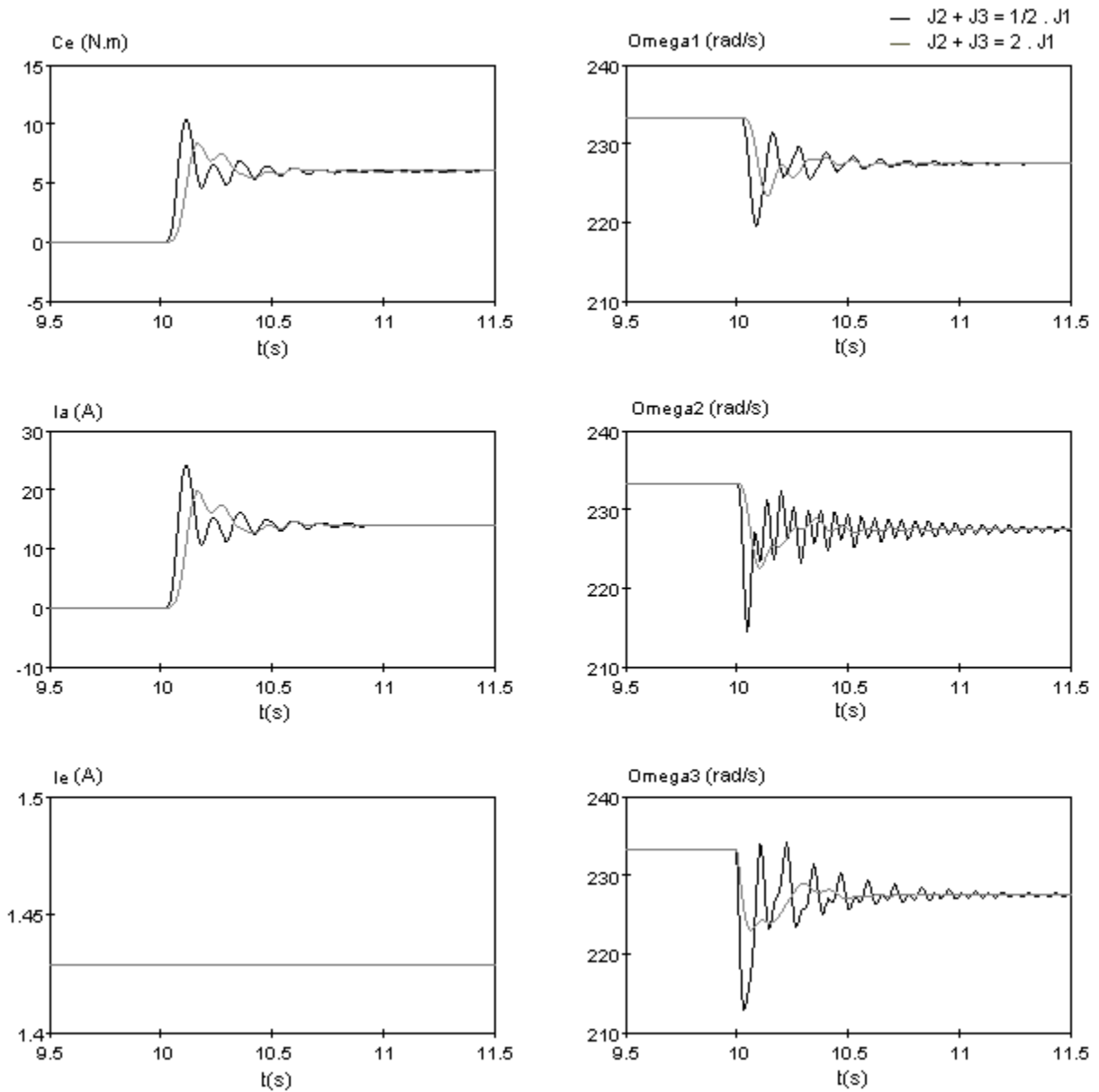


Fig. 1.5.5 : Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation $\Delta C r^3 = 6 \text{ N.m}$ à $t = 10 \text{ s}$, pour différentes valeurs du moment d'inertie $[J_1 + J_2]$ (Mcc/ EMTP).

Les résultats obtenus en utilisant EMTP confirment les résultats obtenus en utilisant Matlab-Simulink et peuvent faire l'objet bien évidemment de la même analyse et commentaires présentés précédemment au paragraphe 1.4, nous n'allons pas insister là-dessus. Il est à noter que pour établir une claire comparaison nous avons gardé les mêmes échelles des courbes relevées à l'aide des deux logiciels dans chaque application. Par ailleurs et étant donné que les résultats obtenus par EMTP et Matlab sont très similaires, nous allons soulever dans le paragraphe suivant avec plus de précision les écarts éventuels au niveau de ces résultats.

1.6 - Comparaison des résultats obtenus par EMTP et Matlab-Simulink

Considérons les paramètres initiaux du système moteur cc et du système mécanique, et une variation $\Delta Cr3=6N.m$ appliquée à $t = 10$ s, et comparons les résultats obtenus par EMTP et Matlab-Simulink. Le but n'est pas vraiment à ce stade de comparer les deux modèles mais de vérifier avec précision s'il y'a des différences entre les deux logiciels de simulation dues au fait que la simulation sous Matlab était effectuée à pas variable (Max step = $1e^{-4}$ s, Min step = $1e^{-5}$ s), alors que la simulation sous EMTP est effectuée à pas fixe (Main time-step (Δt) = $1e^{-4}$ s), la précision choisie pour les deux logiciels est = $1e^{-4}$.

Les résultats obtenus par les deux logiciels de simulation, comme ont montré déjà les figures 1.4.2-1.4.5 et 1.5.2-1.5.5 respectivement sont très similaires. Cette constatation est encore mise en valeur ici par la figure 1.6.1 où nous avons soulevé avec plus de précision la différence entre les deux modes de simulation pour enfin conclure que le changement de la plate-forme de simulation n'avait pas beaucoup d'impact sur les résultats (la différence maximale observée est de l'ordre de 0,4%).

Par ailleurs, les résultats de simulation présentés à la figure 1.6.2 montrent que lorsque nous avons augmenté le pas de calcul (un pas de calcul de EMTP (Δt) = $1e^{-3}$ s et un pas de calcul de Matlab variable (Δt_{max}) = $1e^{-3}$ à (Δt_{min}) = $1e^{-4}$ s), la différence entre les courbes obtenues par Matlab et EMTP s'est fait un peu plus sentir.

Il est à préciser que les résultats présentés aux figures 1.6.1 et 1.6.2 sont définis en terme de pourcentage par rapport aux valeurs atteintes en régime permanent suite à l'application de la variation de charge, à savoir : $Ce = 6 (N.m)$, $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3 = 227,45 (rad/s)$, $Ia = 14 (A)$, $Ie = 1,43 (A)$.

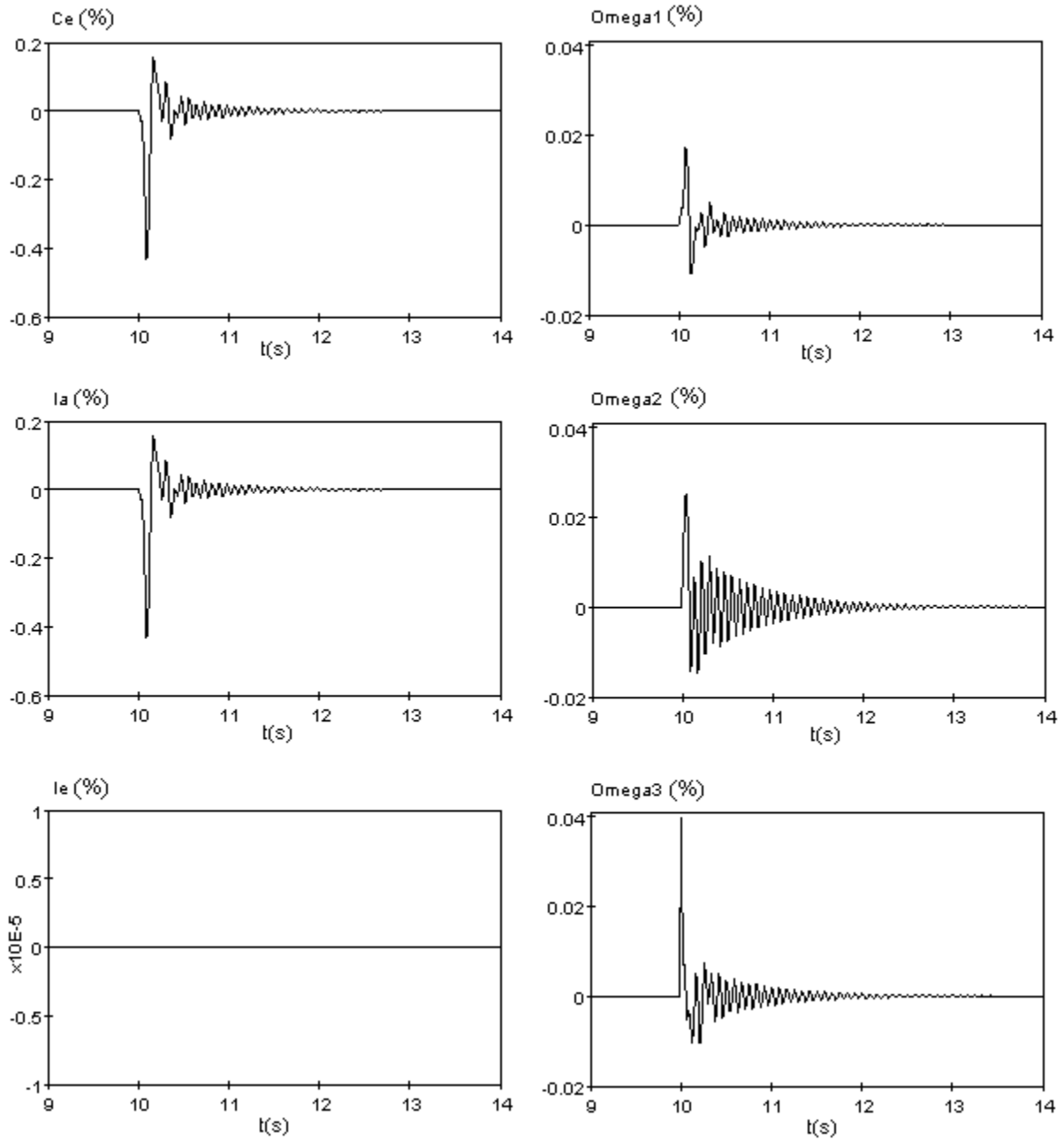


Fig. 1.6.1 : Différence de courbes obtenues par Matlab et EMTP, du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation $\Delta Cr3=6N.m$ à $t=10s$, pour un pas de calcul de EMTP (Δt) = $1e^{-4}s$ et un pas de calcul de Matlab variable de (Δt_{max}) = $1e^{-4}$ à (Δt_{min}) = $1e^{-5}s$ (Mcc)

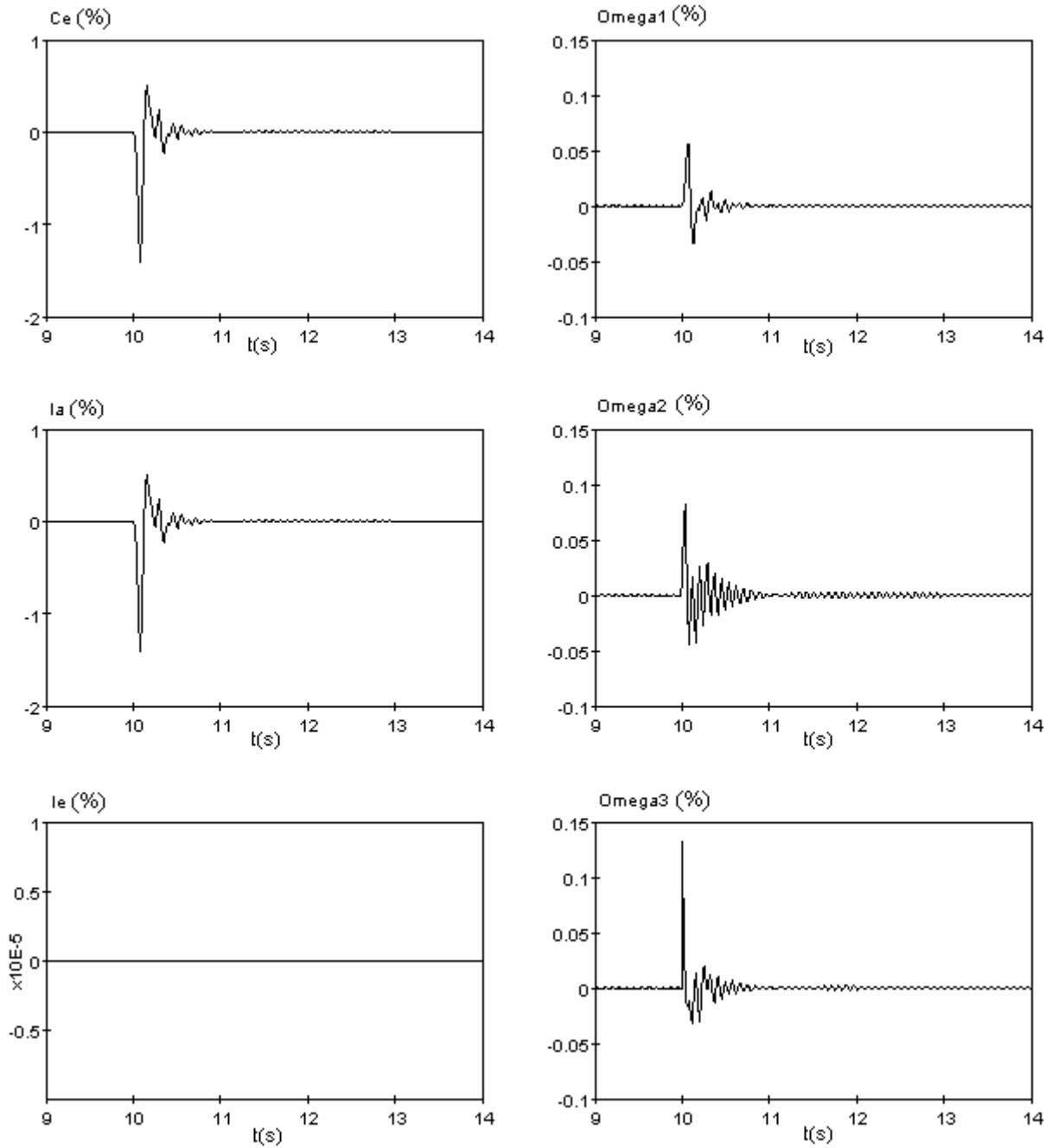


Fig. 1.6.2 : Différence de courbes obtenues par Matlab et EMTP, du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation $\Delta Cr3=6N.m$ à $t = 10s$, pour un pas de calcul de EMTP (Δt) = $1e^{-3}$ s et un pas de calcul de Matlab variable de (Δt_{max}) = $1e^{-3}$ à (Δt_{min}) = $1e^{-4}$ s (Mcc)

Chapitre 2

Modélisation d'entraînement électromécanique multi-masses à base de machine asynchrone

2.1 - Modèle théorique de la machine asynchrone [1]-[2]

Le modèle de la machine asynchrone est déduit de la machine biphasée [1] en supposant que les variables sont exprimées dans un référentiel x - y tournant à la vitesse du champ électrique, les équations de la machine asynchrone sont :

$$\begin{aligned} U_{sx} &= R_s \cdot I_{sx} + s\psi_{sx} - \omega_s \cdot \psi_{sy} \\ U_{sy} &= R_s \cdot I_{sy} + s\psi_{sy} + \omega_s \cdot \psi_{sx} \\ 0 &= R_r \cdot I_{rx} + s\psi_{rx} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{ry} \\ 0 &= R_r \cdot I_{ry} + s\psi_{ry} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rx} \\ Ce &= P \cdot L_{sr} \cdot (I_{sy} \cdot I_{rx} - I_{sx} \cdot I_{ry}) \\ \psi_s &= L_s \cdot I_s + L_{sr} \cdot I_r \\ \psi_r &= L_r \cdot I_r + L_{sr} \cdot I_s \end{aligned}$$

ce système peut être présenté sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} s\psi_{sx} &= U_{sx} - R_s \cdot I_{sx} + \omega_s \cdot \psi_{sy} \\ s\psi_{sy} &= U_{sy} - R_s \cdot I_{sy} - \omega_s \cdot \psi_{sx} \\ s\psi_{rx} &= -R_r \cdot I_{rx} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{ry} \\ s\psi_{ry} &= -R_r \cdot I_{ry} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rx} \\ Ce &= P \cdot L_{sr} \cdot (I_{sy} \cdot I_{rx} - I_{sx} \cdot I_{ry}) \\ I_s &= \frac{L_r \cdot \psi_s - L_{sr} \psi_r}{L_s \cdot L_r - L_{sr}^2} \\ I_r &= \frac{L_s \cdot \psi_r - L_{sr} \psi_s}{L_s \cdot L_r - L_{sr}^2} \end{aligned}$$

où :

$$\begin{aligned} U_{sx}, U_{sy} &: \text{Composantes de la tension statorique exprimée dans le référentiel } x\text{-}y ; \\ I_{sx}, I_{sy} &: \text{Composantes du courant statorique exprimé dans le référentiel } x\text{-}y ; \end{aligned}$$

I_{rx}, I_{ry}	: Composantes du courant rotorique exprimé dans le référentiel $x-y$;
R_s	: Résistance statorique ;
R_r	: Résistance rotorique ;
L_s	: Inductance du stator ;
L_r	: Inductance du rotor ;
L_{sr}	: Inductance mutuelle ;
P	: Nombre de paires de pôles ;
C_e	: Couple électromagnétique ;
ω_s	: Vitesse du champ électrique ;
ω_r	: Vitesse électrique du rotor.

2.2 - Modèle théorique du système mécanique multi-masses

Il s'agit du même modèle adopté au chapitre 1 et dont nous rappelons le principe théorique que voici :

Les équations décrivant le système mécanique sont déduites du modèle d'étude du mouvement

de Lagrange suivant :
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} + \frac{dWd}{dq_i} = Qi ; \quad L = Wc - Wp$$

avec :

Wc : est l'énergie cinétique du système.

Wp : est l'énergie potentielle du système.

Wd : est l'énergie dissipée.

ou encore :
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dWc}{dq_i} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{dWp}{dq_i} \right) - \frac{dWc}{dq_i} + \frac{dWp}{dq_i} + \frac{dWd}{dq_i} = Qi , \text{ avec :}$$

Pour un mouvement de rotation : $q_i = \varphi_i$, $\dot{q}_i = \Omega_i$, $Q_i = C_i$.

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) :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dWc}{d\Omega_i} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{dWp}{d\Omega_i} \right) - \frac{dWc}{d\varphi_i} + \frac{dWp}{d\varphi_i} + \frac{dWd}{d\Omega_i} = Ci$$

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

$$W_c = \sum_{i=1}^n \frac{J_i \cdot \Omega_i^2}{2} ; \quad W_p = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{k_{i,i+1} (\varphi_i - \varphi_{i+1})^2}{2} ; \quad W_d = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\beta_{i,i+1} (\Omega_i - \Omega_{i+1})^2}{2}$$

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

$$\begin{aligned} C e^{-\frac{k_{12}}{s}(\Omega_1 - \Omega_2)} - \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} &= J_1 s \Omega_1 \\ \frac{k_{12}}{s}(\Omega_1 - \Omega_2) - \frac{k_{23}}{s}(\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23}(\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} &= J_2 s \Omega_2 \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ \frac{k_{n-2,n-1}}{s}(\Omega_{n-2} - \Omega_{n-1}) - \frac{k_{n-1,n}}{s}(\Omega_{n-1} - \Omega_n) + \beta_{n-2,n-1}(\Omega_{n-2} - \Omega_{n-1}) - \beta_{n-1,n}(\Omega_{n-1} - \Omega_n) - C_{r,n-1} &= J_{n-1} s \Omega_{n-1} \\ \frac{k_{n-1,n}}{s}(\Omega_{n-1} - \Omega_n) + \beta_{n-1,n}(\Omega_{n-1} - \Omega_n) - C_{rn} &= J_n s \Omega_n \end{aligned}$$

où :

- J_i : Moment d'inertie de la $i^{\text{ème}}$ masse ;
- Ω_i : Vitesse angulaire de la $i^{\text{ème}}$ masse ;
- C_{ri} : Couple résistant appliqué à la $i^{\text{ème}}$ 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 simuler un modèle mécanique à trois (3) masses qui est déduit du système généralisé ci-dessus et qui serait donc décrit par le système d'équations suivant [2]:

$$\begin{aligned} C e^{-\frac{k_{12}}{s}(\Omega_1 - \Omega_2)} - \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} &= J_1 s \Omega_1 \\ \frac{k_{12}}{s}(\Omega_1 - \Omega_2) - \frac{k_{23}}{s}(\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23}(\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} &= J_2 s \Omega_2 \\ \frac{k_{23}}{s}(\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{23}(\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r3} &= J_3 s \Omega_3 \end{aligned}$$

2.3 - Données numériques d'un entraînement 3-masses à base de moteur asynchrone

Nous allons considérer un moteur asynchrone de puissance de $2.2kW$ avec une tension et un courant nominaux de $120 V$ et $12 A$ et un couple nominal $C_n = 12N.m$.

Les paramètres électriques et mécaniques de l'entraînement du moteur asynchrone sont donnés comme suit : $R_s=0.6Ohms$, $R_r=0.4Ohms$, $L_{sr}=0.059H$, $L_s=0.061H$ et $L_r=0.061H$, $J=0.0175kg.m^2$, $\beta_{i,i+1}=0.001Nms/rad$, $k_{i,i+1}=20Nm/rad$ ($i=1, 2$) et $P=2$;

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 nous allons étudier d'autres cas pour analyser l'effet du moment d'inertie sur la réponse du système.

2.4 - Simulation du modèle de l'entraînement 3-masses à base de moteur asynchrone sous Matlab-Simulink

Le modèle tel que développé sous Simulink est le suivant (Fig. 2.4.1) :

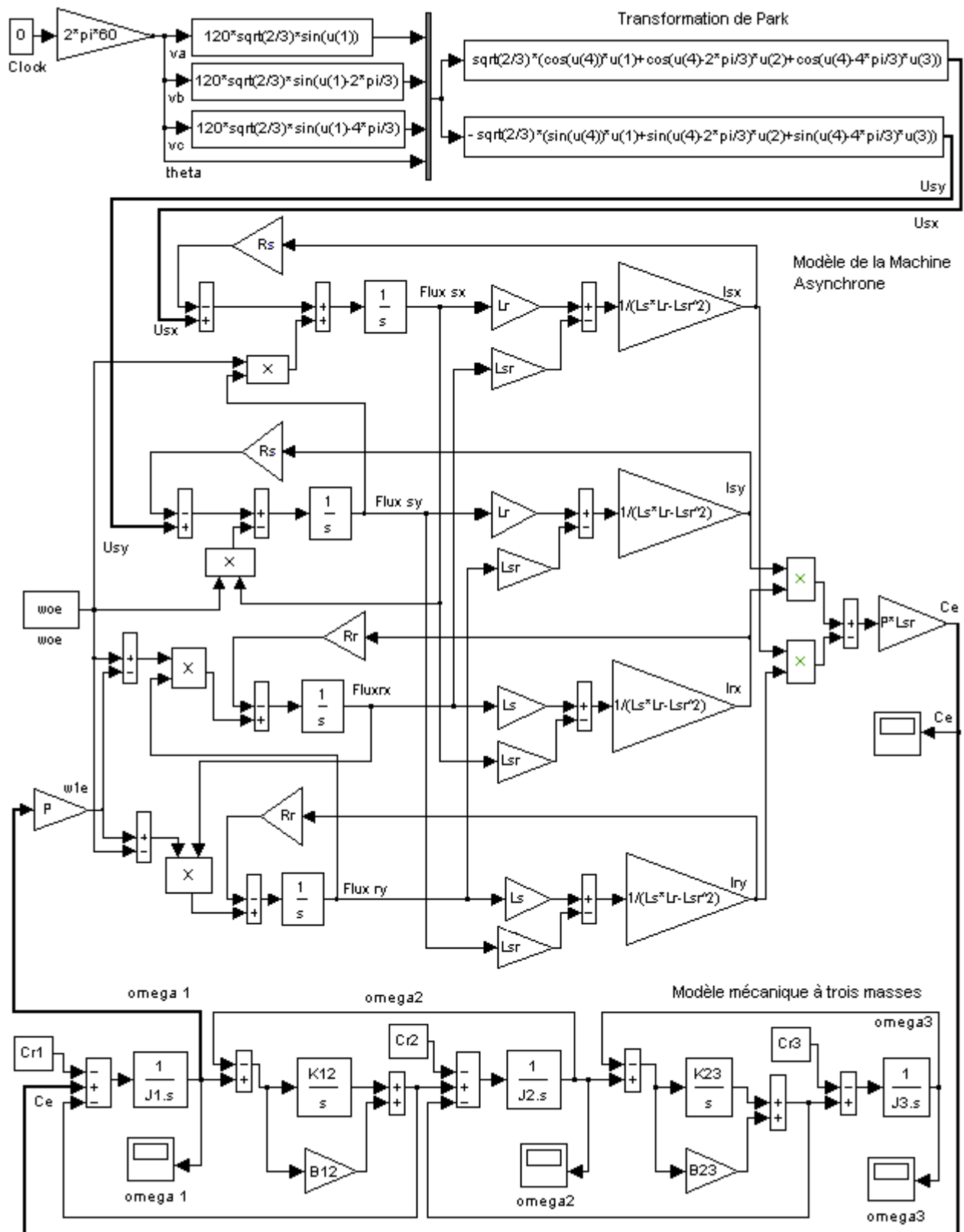


Fig. 2.4.1 : Modèle de simulation développé sous Matlab-Simulink de l'entraînement 3-masses à base de moteur asynchrone

Nous procédons ici de la même manière qu'avec le moteur à courant continu pour présenter une analogie entre les résultats obtenus avec les deux types de moteur. Donc, en utilisant les données numériques données en paragraphe 2.3, nous considérons dans un premier temps un couple de charge (Cr_3) nul, quant aux couples résistants Cr_1 et Cr_2 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 2.4.2 mettent en valeur l'état de démarrage du moteur asynchrone sans système de commande à vitesse variable, situation que nous présentons à titre indicatif mais que nous allons ignorer pour nous pencher sur l'analyse de variations auxquelles 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 dans un entraînement électrique à base de moteur asynchrone.

Nous appliquons donc dans une seconde étape une variation de type échelon du couple de charge au niveau de la troisième masse $\Delta Cr_3=6N.m$ à l'instant $t=10s$. La figure 2.4.3 représente les résultats de simulation de ce premier cas. Les différents cas qui suivront cette première application seront analysés autour de cette variation.

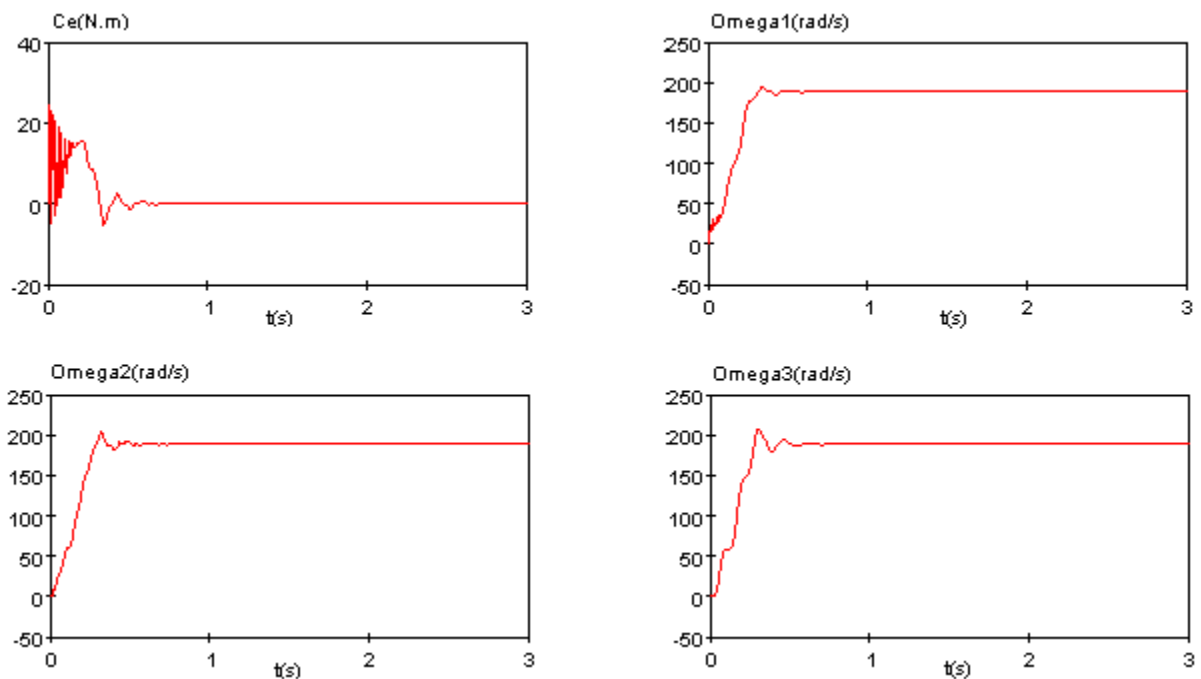


Fig. 2.4.2 : Courbes au démarrage, du couple électromagnétique et des vitesses des trois masses (M-Asynch /Matlab-Simulink)

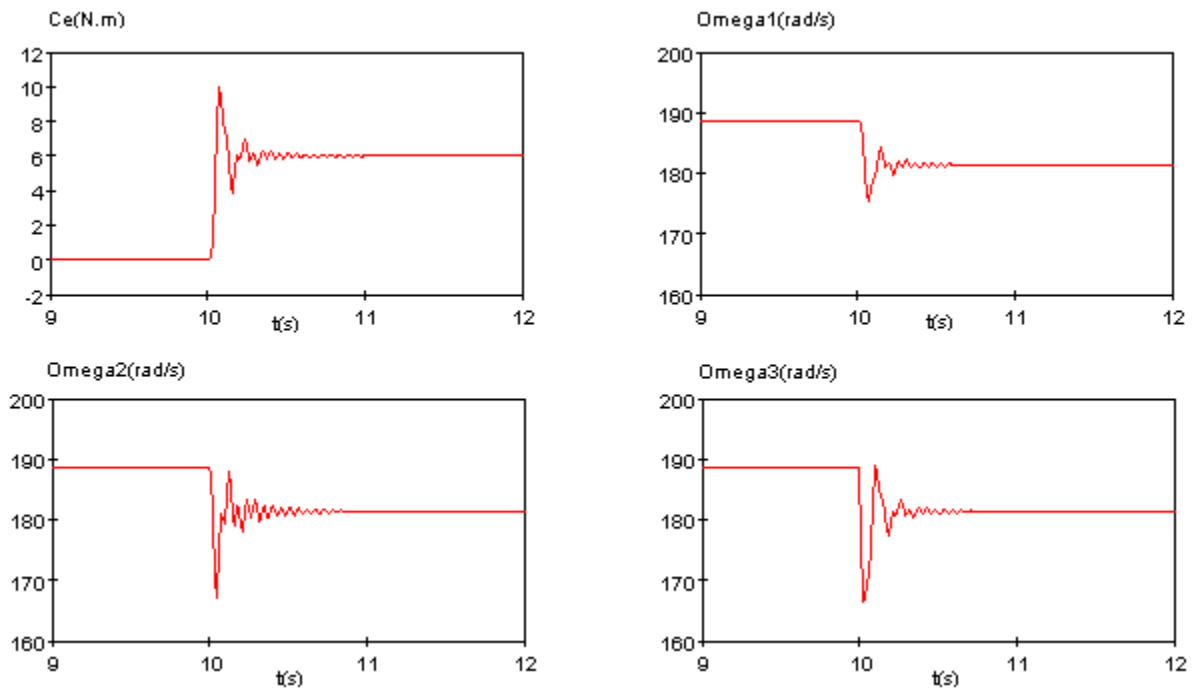


Fig. 2.4.3 : Courbes du couple électromagnétique et des vitesses des trois masses, suite à une variation $\Delta Cr_3=6N.m$ à $t = 10s$ (M-Asynch /Matlab-Simulink)

Dans ce qui suit, comme dans le cas du moteur à courant continu, nous faisons varier le coefficient de rigidité K_{23} pour étudier son effet sur la réponse du système, tous les autres paramètres restent constants. Nous constatons aussi que notre système à 3 masses est sujet aux oscillations (résonance mécanique), différemment du modèle à une masse [1] qui suppose que les liaisons sont parfaitement rigides. Par ailleurs, nous remarquons que plus le coefficient de rigidité K_{23} est important, mieux les oscillations sont amorties (Fig. 2.4.4).

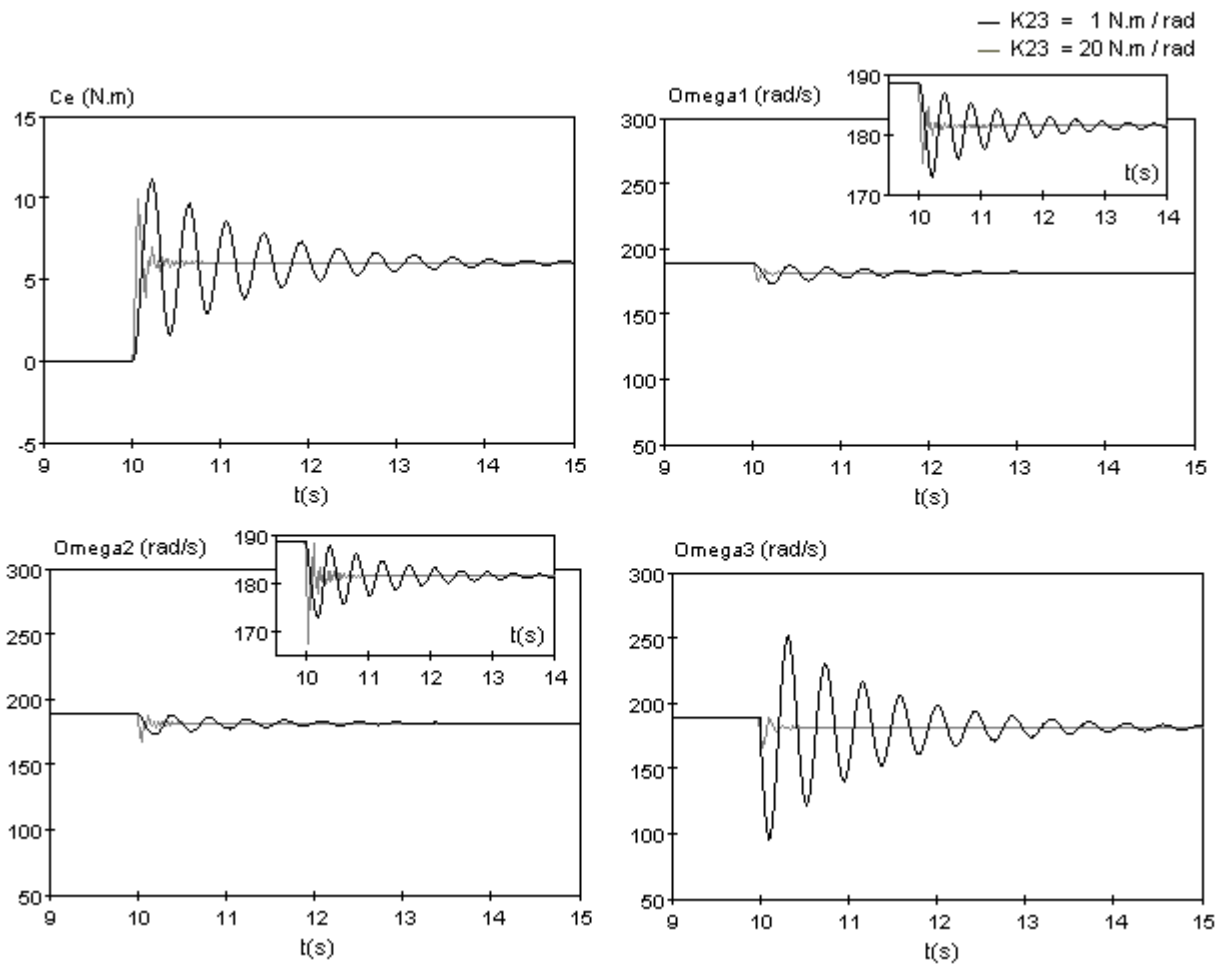


Fig. 2.4.4 : Courbes du couple électromagnétique et des vitesses des trois masses, suite à une variation $\Delta Cr3=6N.m$ à $t=10s$, pour différentes valeurs du coefficient de rigidité K_{23} (M-Asynch /Matlab-Simulink)

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 2.4.5 que lorsque le moment d'inertie de la partie mécanique devient important par rapport à celui du moteur les oscillations sont mieux amorties.

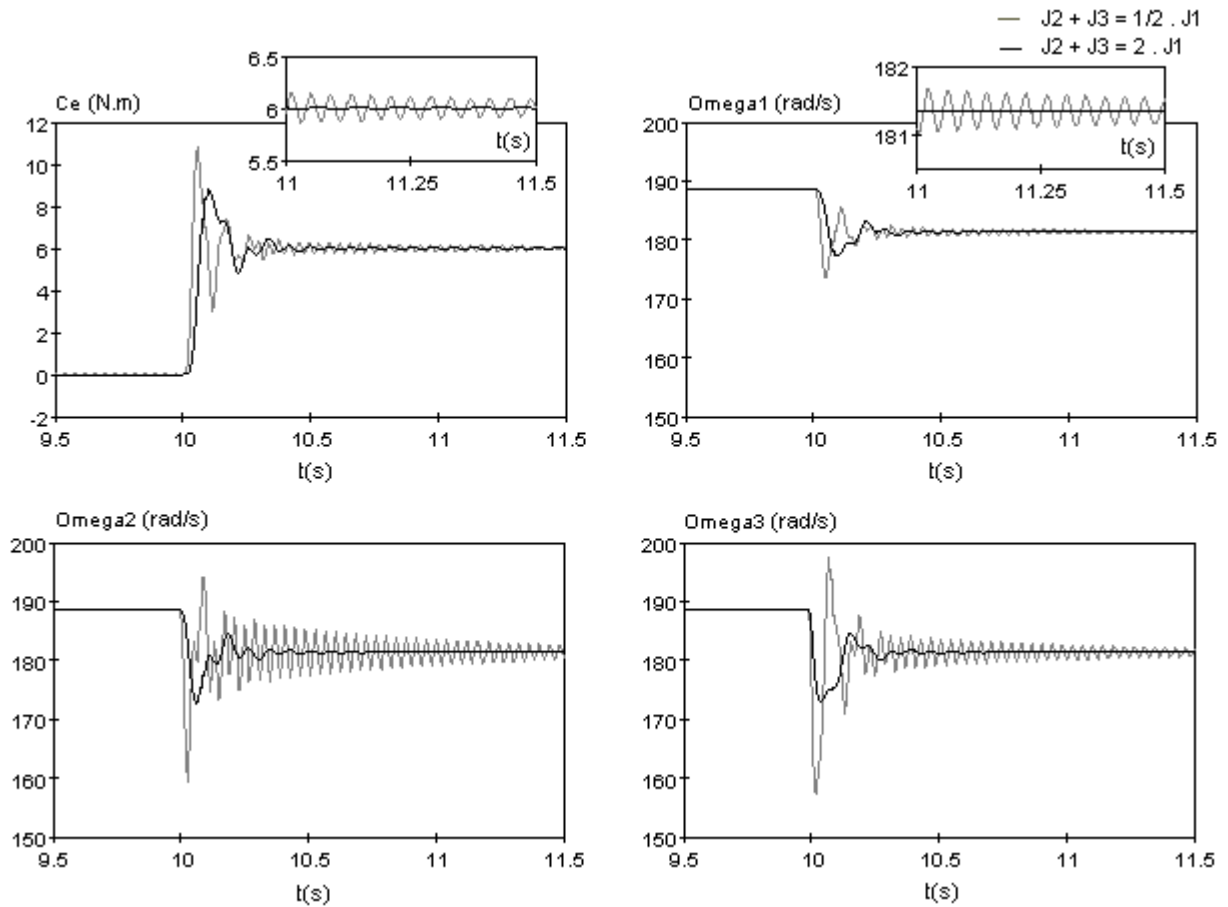


Fig. 2.4.5 : Courbes du couple électromagnétique et des vitesses des trois masses, suite à une variation $\Delta C_r3 = 6 \text{ N.m}$ à $t = 10 \text{ s}$, pour différentes valeurs du moment d'inertie $[J_1 + J_2]$ (M-Asynch / Matlab-Simulink)

2.5 - Simulation du modèle de l'entraînement 3-masses à base de moteur asynchrone sous EMTP

Le schéma de simulation du modèle de la machine asynchrone multimasse développée par l'IREQ est le suivant (fig. 2.5.1) :

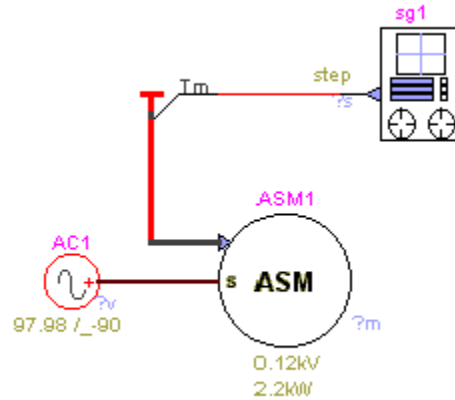


Fig. 2.5.1 : Modèle de simulation de l'entraînement 3-masses à base de moteur asynchrone développé sous EMTP

Le modèle mécanique multi-masses est intégré dans ce modèle il suffit de saisir les données mécaniques du système (de la même manière que les données électriques) dans le bloc spécifié à cet effet, comme représenté ci-dessous :

Mechanical data

Lock rotor for negative speed	<input checked="" type="checkbox"/>
Number of masses	<input type="text" value="3"/>
Index of rotor mass	<input type="text" value="1"/>

Mass data: mechanical parameters for the shaft system						
Mass index i	Fraction of external torque	Moment of inertia	Speed deviation damping	Mutual damping	Spring constant	Absolute speed damping
1	0	0.00875	0	0.001	20	0
2	0	0.004375	0	0.001	20	0
3	0.5	0.004375	0			0

Fig. 2.5.1 (Suite) : Modèle de simulation de l'entraînement 3-masses à base de moteur asynchrone développé sous EMTP (Suite)

En utilisant les données numériques présentées dans le paragraphe 2.3, nous procédons avec le logiciel EMTP de la même manière que dans le paragraphe 2.4 avec le logiciel Matlab-Simulink, et les résultats de simulation seront présentés pour les mêmes cas étudiés précédemment, via les graphiques suivants (Fig. 2.5.2 – 2.5.5).

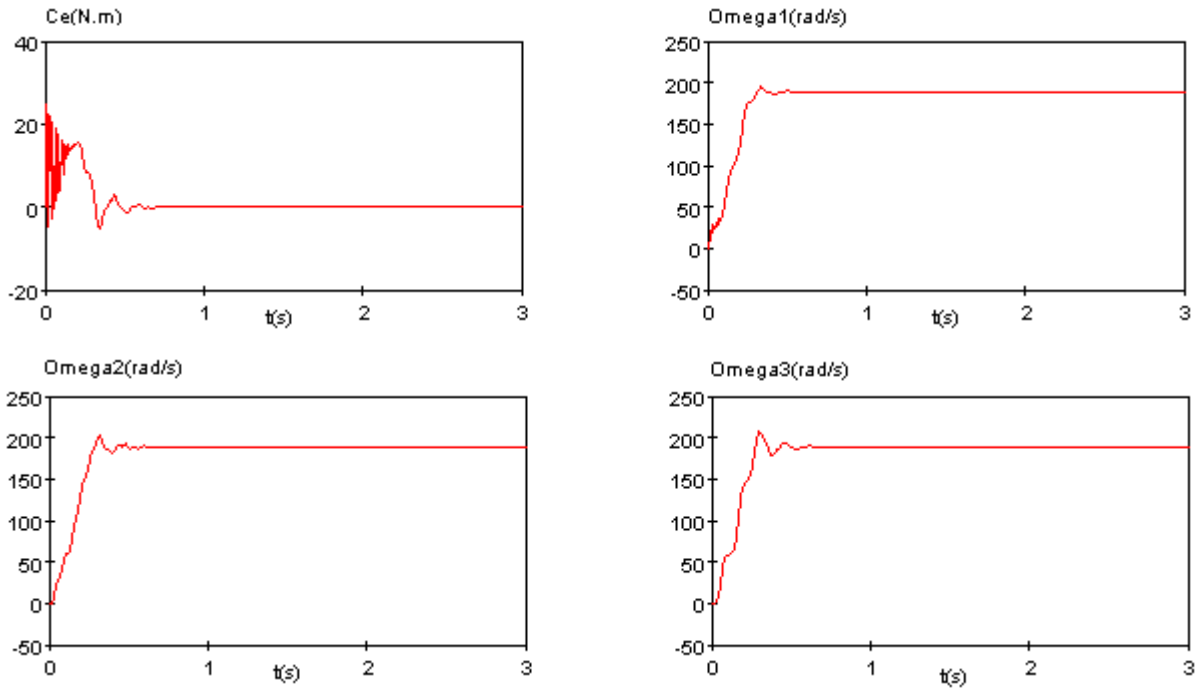


Fig. 2.5.2 : Courbes au démarrage, du couple électromagnétique et des vitesses des trois masses (M-Asynch /EMTP)

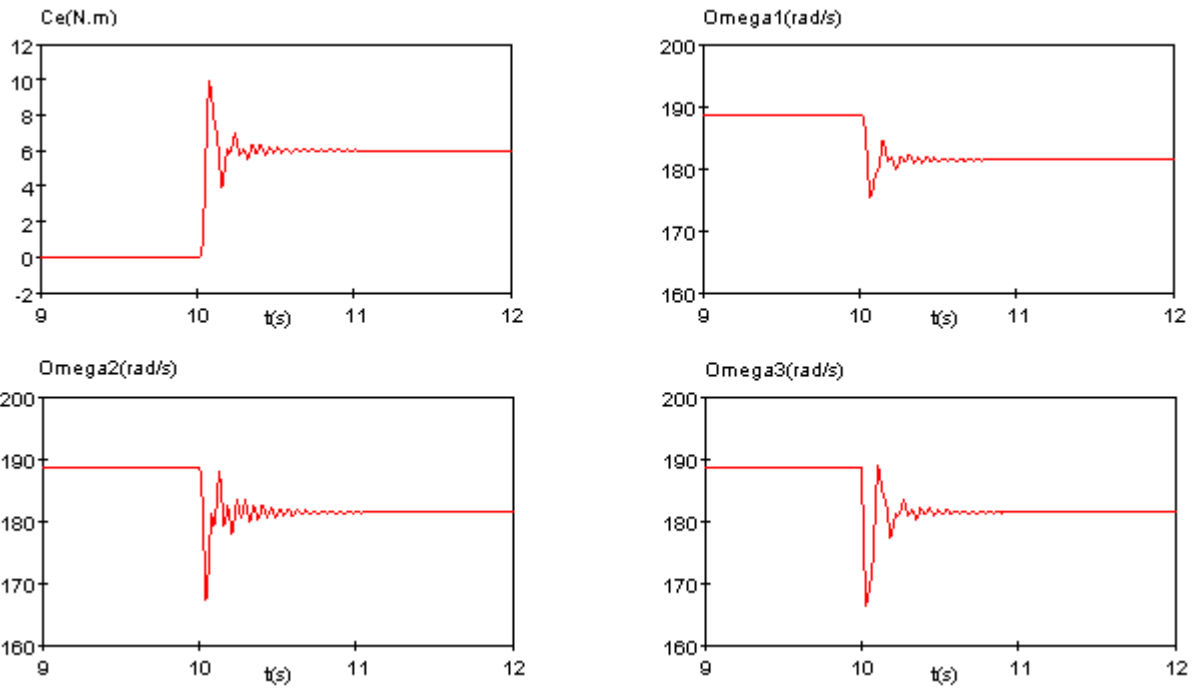


Fig. 2.5.3 : Courbes du couple électromagnétique et des vitesses des trois masses, suite à une variation $\Delta Cr3=6N.m$ à $t = 10s$ (M-Asynch /EMTP)

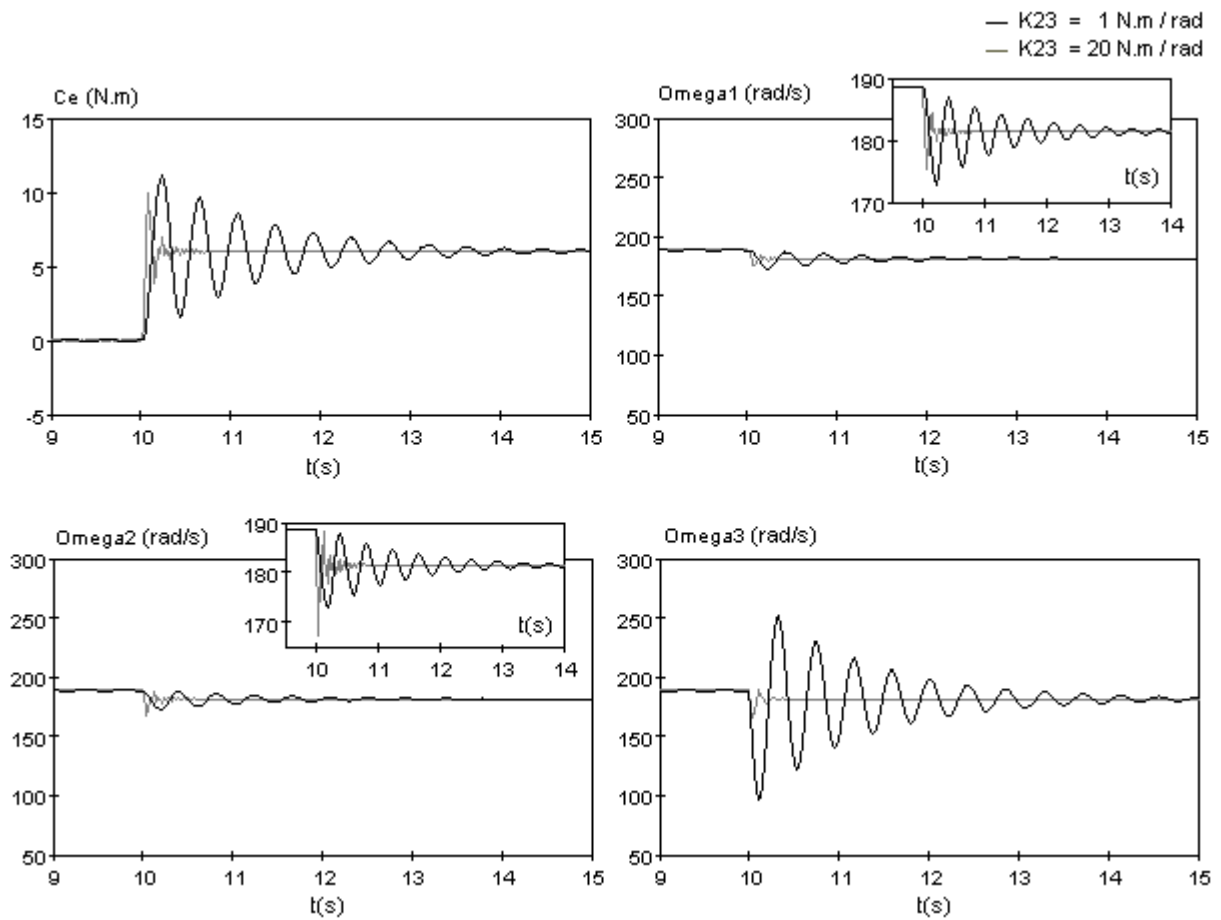


Fig. 2.5.4 : Courbes du couple électromagnétique et des vitesses des trois masses, suite à une variation $\Delta C_r3=6 \text{ N.m}$ à $t = 10 \text{ s}$, pour différentes valeurs du coefficient de rigidité K_{23} (M-Asynch /EMTP)

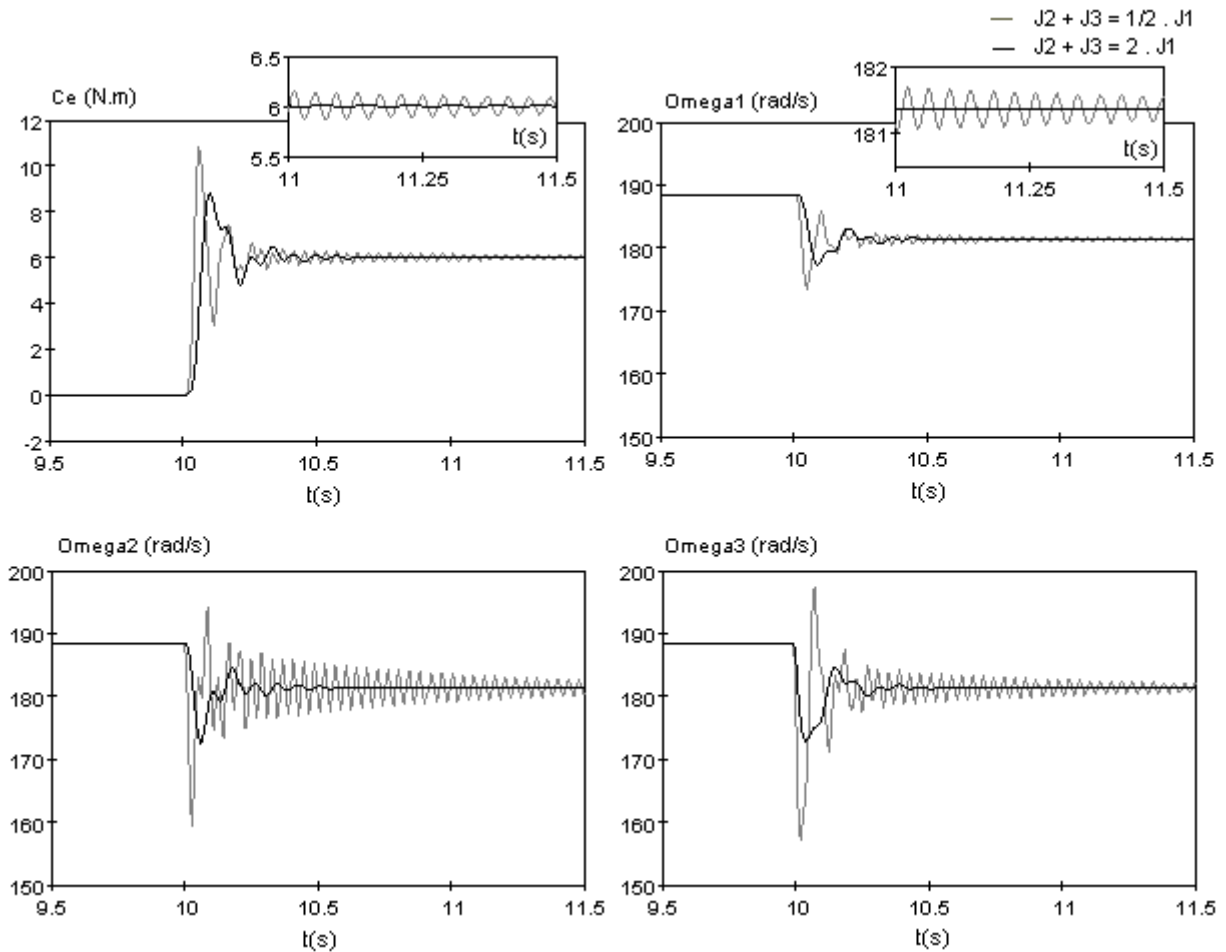


Fig. 2.5.5 : Courbes du couple électromagnétique et des vitesses des trois masses, suite à une variation $\Delta Cr3=6N.m$ à $t=10s$, pour différentes valeurs du moment d'inertie $[J_1+J_2]$ (M-Asynch / EMTP)

Les résultats obtenus en utilisant EMTP confirment les résultats obtenus en utilisant Matlab-Simulink. Il est à noter que pour établir une juste comparaison nous avons gardé les mêmes échelles des courbes relevées à l'aide des deux logiciels dans chaque application. Par ailleurs et étant donné que les résultats obtenus par EMTP et Matlab sont très similaires, nous allons soulever dans le paragraphe suivant avec plus de précision les écarts éventuels au niveau de ces résultats.

2.6.- Comparaison des résultats obtenus par EMTP et Matlab-Simulink

Considérons les paramètres initiaux du système moteur asynchrone et du système mécanique, et une variation $\Delta Cr3=6N.m$ appliquée à $t = 10s$, et évaluons les résultats obtenus à l'aide de EMTP et Matlab-Simulink; le but étant de comparer avec exactitude les deux modèles développés sous EMTP et Matlab-Simulink. A savoir que la simulation sous Matlab était effectuée à un pas variable (Max step = $1e^{-4}$ s, Min step = $1e^{-5}$ s), alors que la simulation sous EMTP est effectuée à pas fixe (Main time-step (Δt) = $1e^{-4}$ s), la précision choisie pour les deux logiciel est = $1e^{-4}$.

Les résultats obtenus par les deux modèles implémentés dans Matlab-Simulink et EMTP, comme ont montré déjà les figures 2.4.2-2.4.5 et 2.5.2-2.5.5 respectivement sont très similaires ce qui peut permettre déjà de conclure que les deux modèles sont identiques, en effet la faible différence entre les deux modèles mise en valeur dans la figure 2.6.1 est due à la différence des modes de simulation, la figure 2.6.2 qui représente des résultats de simulation pour un pas de calcul de EMTP (Δt) = $1e^{-3}$ s et un pas de calcul de Matlab variable de (Δt_{max}) = $1e^{-3}$ à (Δt_{min}) = $1e^{-4}$ s, montre que cette différence a augmenté lorsque nous avons augmenté le pas.

Il est à préciser que les résultats présentés aux figures 2.6.1 et 2.6.2 sont définis en terme de pourcentage par rapport aux valeurs atteintes en régime permanent suite à l'application de la variation de charge, à savoir : $Ce = 6 (N.m)$, $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3 = 181,34 (rad/s)$.

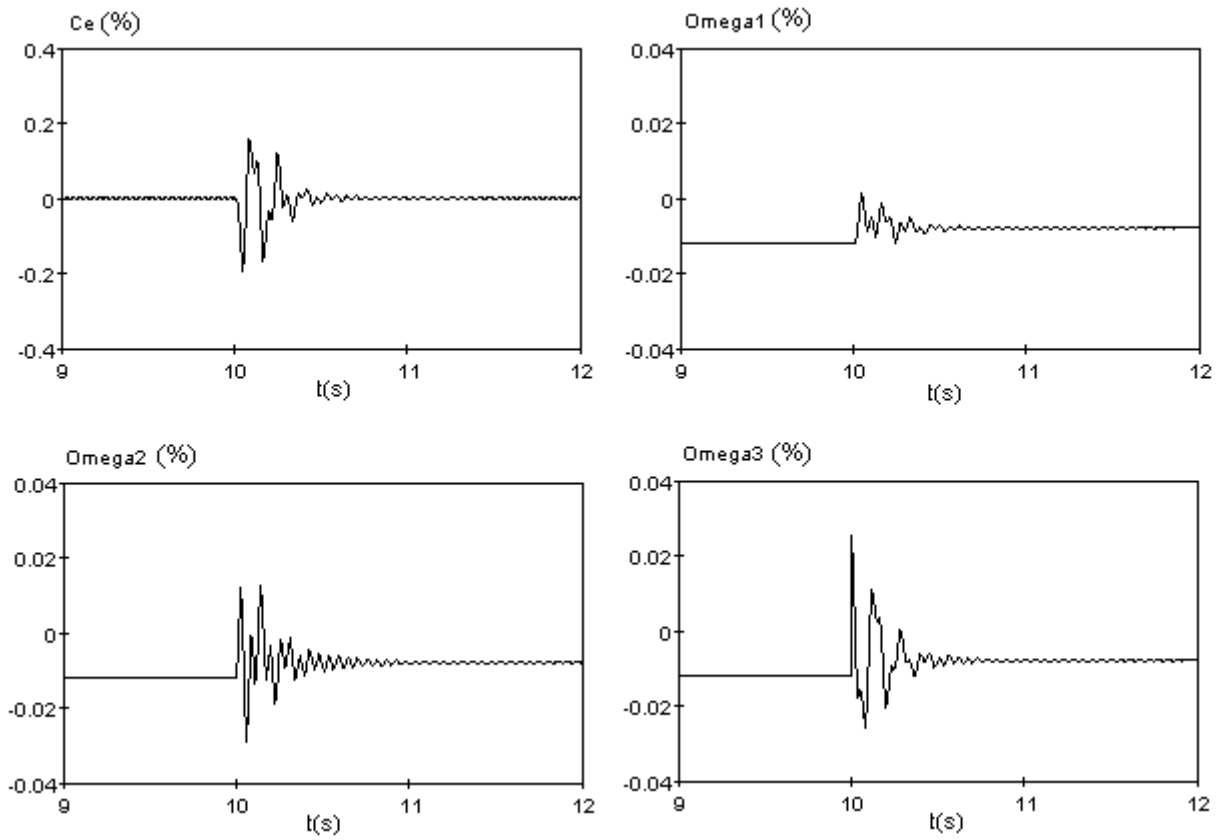


Fig. 2.6.1 : Différence de Courbes obtenues par Matlab et EMTP, du couple électromagnétique et des vitesses des trois masses, suite à une variation $\Delta Cr3 = 6 N.m$ à $t = 10s$, pour un pas de calcul de EMTP $(\Delta t) = 1e^{-4}$ s et un pas de calcul de Matlab variable de $(\Delta t_{max}) = 1e^{-4}$ à $(\Delta t_{min}) = 1e^{-5}$ s (M-Asynch)

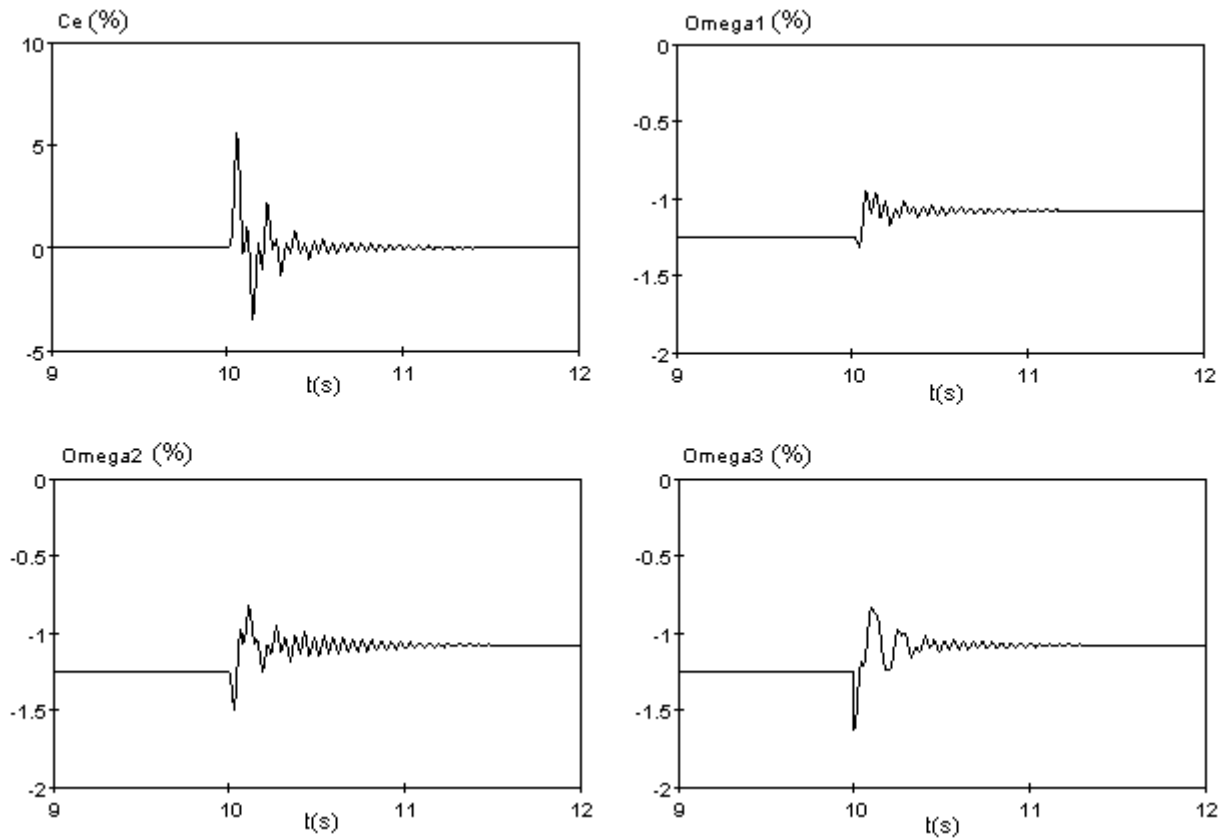


Fig. 2.6.2 : Différence de Courbes obtenues par Matlab et EMTP, du couple Electromagnétique et des vitesses des trois masses, suite à une Variation $\Delta Cr3 = 6 N.m$ à $t = 10$ s, pour un pas de calcul de EMTP $(\Delta t) = 1e^{-3}$ s et un pas de calcul de Matlab variable de $(\Delta t_{\text{max}}) = 1e^{-3}$ à $(\Delta t_{\text{min}}) = 1e^{-4}$ s (M-Asynch)

Chapitre 3

Application de la modélisation multi-masses du générateur asynchrone au domaine des éoliennes

Après validation du modèle multi-masses de la machine asynchrone grâce aux simulations entrepris sous Matlab et EMTP qui a fait l'objet des chapitres précédents, il s'agit maintenant de mettre en valeur le fonctionnement des deux modèles en mode générateur, un modèle d'éolienne à base de machine asynchrone est en effet mis au point et évalué sous Simulink et EMTP, le couple exercé par le vent sur l'éolienne est également modélisé dans ce système.

3.1- Modèle théorique de la turbine à vent :

La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser, cependant des modèles mathématiques simples sont souvent utilisés.

L'équation mathématique suivante représente la relation entre la vitesse du vent et la puissance mécanique extraite [4], [5] :

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot V_w^3, \quad A = \pi \cdot R^2,$$

où :

P_w : La puissance extraite du vent (puissance à la sortie de la turbine)

V_w : La vitesse du vent [m/s]

Ω : La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine [rad/s]

a : L'angle d'attaque de la pale [degré]

C_p : Le coefficient de puissance (sans dimensions)

ρ : La densité de l'air [kg/m³];

R : Le rayon du rotor de la turbine à vent [m]

A : La surface balayée par le rotor (balayée par les pales) [m²]

Le couple exercé par le vent sur la turbine (ou le couple mécanique à la sortie de la turbine) est défini par :

$$T_m = \frac{P_w}{\Omega}$$

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient C_p et différentes expressions ont été proposées. Nous présentons ci-dessous quatre formes déjà utilisées dans différents articles scientifiques [4] - [10] :

$$i) C_p = \frac{1}{2} \cdot (\gamma - 0,022 \cdot a^2 - 5,6) e^{-0,17 \cdot \gamma} ;$$

$$\text{où : } \gamma = \left(\frac{9}{4} \right) \cdot \frac{V_w}{\Omega}, \quad \gamma \text{ est le rapport de vitesse périphérique}$$

$$ii) C_p = (0,44 - 0,0167 \cdot a) \cdot \sin \left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0,3a} \right] - 0,00184(\lambda - 3) \cdot a$$

$$iii) C_p = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda'} - 0,4 \cdot a - 5 \right) e^{\frac{-12,5}{\lambda'}} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot a} - \frac{0,035}{a^3 + 1}$$

$$iv) C_p = 0,73 \left(\frac{151}{\lambda'} - 0,58 \cdot a - 0,002 \cdot a^{2,14} - 13,2 \right) e^{\frac{-18,4}{\lambda'}}$$

$$\text{et} \quad \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda - 0,02 \cdot a} - \frac{0,003}{a^3 + 1}$$

$$\text{où : } \lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_w}, \quad \lambda \text{ est le rapport de la vitesse périphérique}$$

Généralement les articles présentent le coefficient C_p par des graphiques.

Le coefficient C_p est différent d'une turbine à l'autre, en effet les courbes du coefficient de puissance des turbines à vent commerciales sont fournies dans la documentation produite par le fabricant et peuvent être utilisées pour définir une approximation mathématique de la courbe de puissance à l'aide de méthodes d'optimisation numériques.

Cependant, il est jugé souvent non nécessaire de développer différentes approximations de ce coefficient pour tous les types des turbines à vent, puisque les différences entre les courbes des turbines à vent sont généralement faibles [10] et peuvent être souvent négligées dans de nombreuses applications.

Dans ce sens, nous précisons que les courbes de puissance des éoliennes rapides et auxquelles nous allons nous intéresser dans notre application peuvent être approximées par la courbe de la figure 3.1.1 [11].

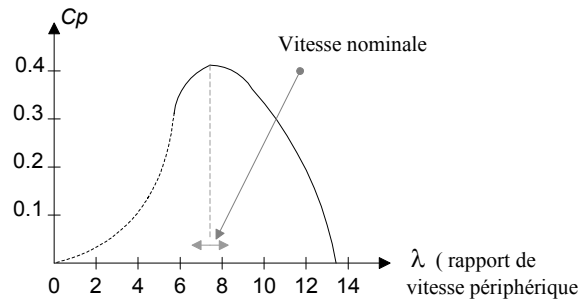


Fig. 3.1.1 : Coefficient de puissance des turbines à vent rapides

Nous aurions pu exploiter la courbe ci-dessus dans le cadre de l'application d'éolienne qui suivra, mais nous disposons également de la courbe de puissance spécifique de l'éolienne objet de notre étude et comme nous allons constater, cette courbe est identifiable à la courbe générale présentée à la figure 3.1.1.

3.2 - Description et données numériques d'un modèle 2-masses d'une éolienne à base de machine asynchrone :

Les turbines à vent utilisées pour la génération de l'électricité sont généralement des machines rapides à deux ou trois pales qui ont les avantages suivants : i) à diamètre égal les éoliennes rapides sont plus légères et donc moins coûteuses que les éoliennes lentes, ii) la boîte à vitesse des éoliennes rapides est plus légère puisque le rapport de réglage de vitesse nécessaire est plus faible, iii) même si le couple de démarrage des éoliennes rapides est faible, il est suffisant pour conduire le générateur en rotation.

Trois types des générateurs sont généralement utilisés : le générateur à courant continu de type shunt, l'alternateur (générateur synchrone) et le générateur à induction (générateur asynchrone). Le générateur asynchrone semble être le plus bon marché et représenter la solution la plus efficace pour les raisons suivantes : i) sa conception n'est pas très coûteuse, ii) son démarrage est facile, iii) sa connexion au réseau est simple, iv) en plus de l'absence d'oscillations quand il est connecté à la grille.

La figure 3.2.1 présente la structure globale du système de l'éolienne utilisé dans cette étude, elle consiste en une turbine à vent à trois pales, un système mécanique à deux masses et une machine asynchrone directement connectée au réseau. Cette configuration est simple et principalement utilisée en pratique.

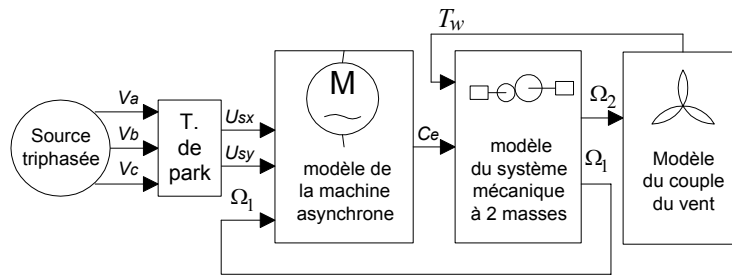


Fig.3.2.1. Structure du système de l'éolienne

Le modèle du générateur asynchrone est le même que celui utilisé au chapitre 2; par ailleurs, le schéma de calcul du couple exercé par le vent sur la turbine avec le schéma de simulation du montage global sont présentés avec toute l'étude de simulation au paragraphe suivant. Les paramètres de tout le système sont fournis dans les tableaux 3-I et 3-II .

Tableau 3.I : Les paramètres du système de l'éolienne [12]

Données de la turbine à vent	
Puissance nominale	$P_n = 180 \text{ kW}$
Diamètre du rotor	$D = 23,2 \text{ m}$
Vitesse du rotor	$\Omega = 42 \text{ tr/min}$
Rapport de la boîte de vitesse	23,75
Nombre de pales	3
<i>Données admises</i>	
Densité de l'air	$\rho = 1 \text{ kg/m}^3$
Données de l'entraînement mécanique à deux masses	
Moment d'inertie de la turbine	$J_T = 102,8 \text{ kgm}^2$
Moment d'inertie du générateur	$J_G = 4,5 \text{ kgm}^2$
Coefficient de rigidité	$K_{1,2} = 2700 \text{ Nm/rad}$
Coefficient d'amortissement	$\beta_{1,2} = 0.1 \text{ Nms/rad}$
<i>Toutes les données sont référées à la plus haute vitesse (vitesse du rotor du générateur)</i>	
Données du générateur asynchrone	
$3\phi, 400\text{-V}, 50\text{-Hz},$	
Nombre de paires de pôles	$p = 3$
Résistance du stator	$R_s = 0,0092\Omega$
Résistance du rotor <i>(référée au stator)</i>	$R_r = 0,0061\Omega$
Inductance de fuite du stator	$L_{ls} = 186\mu\text{H} \quad (L_s = L_{ls} + L_m)$
Inductance de fuite du rotor <i>(référée au stator)</i>	$L_{lr} = 427\mu\text{H} \quad (L_r = L_{lr} + L_m)$
Inductance de magnétisation	$L_m = 6,7 \text{ mH} \quad (L_{sr} = L_m)$

Tableau 3.II : Données de la courbe du coefficient de puissance

V_W (m/s)	C_p (-)	λ (-)
5.3100	0.3200	9.5492
5.7700	0.3450	8.7879
6.2600	0.3790	8.1001
6.7500	0.4140	7.5121
7.2500	0.4360	6.9940
7.7500	0.4470	6.5428
8.2500	0.4470	6.1462
8.7400	0.4450	5.8016
9.2400	0.4380	5.4877
9.7400	0.4280	5.2060
10.2400	0.4150	4.9518
10.7400	0.3970	4.7213
11.2400	0.3750	4.5112
11.7300	0.3560	4.3228
12.2300	0.3340	4.1461
12.7300	0.3130	3.9832
13.2300	0.2910	3.8327
13.7300	0.2650	3.6931
14.0000	0.2518	3.6219
15.0000	0.2047	3.3804
16.0000	0.1687	3.1692
17.0000	0.1406	2.9827
18.0000	0.1185	2.8170
19.0000	0.1007	2.6688
20.0000	0.0864	2.5353
21.0000	0.0746	2.4146
22.0000	0.0649	2.3048
23.0000	0.0568	2.2046
24.0000	0.0500	2.1128

3.3 - Simulation du système de l'éolienne à base de machine asynchrone sous Matlab-Simulink

Le traçage de la courbe dont les données sont présentées au tableau 3.II nous a permis de constater que l'expression du coefficient de puissance C_p de notre éolienne peut être approchée par l'équation numérique (iii) présentée au paragraphe 3.1, à savoir :

$$C_p = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda'} - 0,4.a - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda'}} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0,08.a} - \frac{0,035}{a^3 + 1},$$

et ce pour $a = 0$.

La figure 3.3.1 nous montre le résultat de superposition de la courbe réelle et la courbe obtenue à partir de l'approximation numérique.

À partir de l'équation numérique, la fonction non-linéaire C_p était implémentée sous Matlab-Simulink pour calculer le couple du vent comme montre le schéma de la figure 3.3.2. L'avantage d'un model mathématique représentatif du coefficient de puissance est de faciliter l'entreprise de simulations en mode dynamique surtout lorsque les paramètres dont dépend la puissance de la turbine changent dans le temps comme la variation de l'angle d'attaque de la turbine suite à la variation de la vitesse du vent.

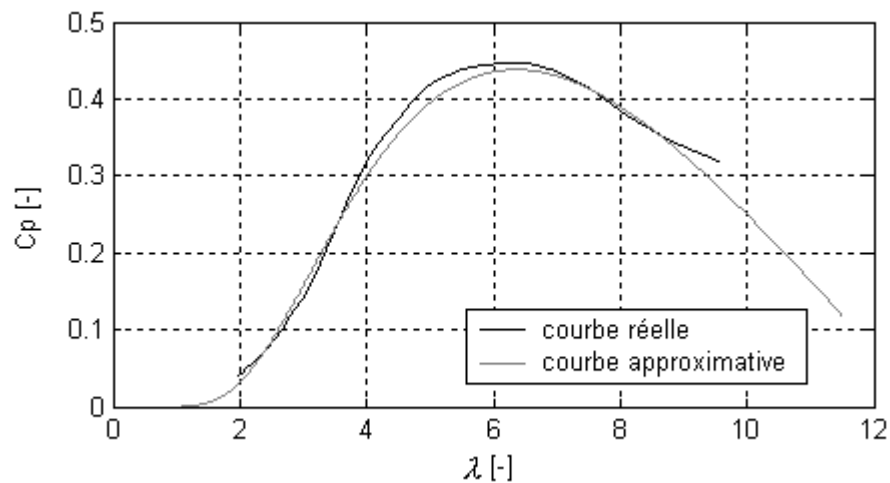


Fig.3.3.1 : Courbes réelle et approximative du coefficient de puissance C_p

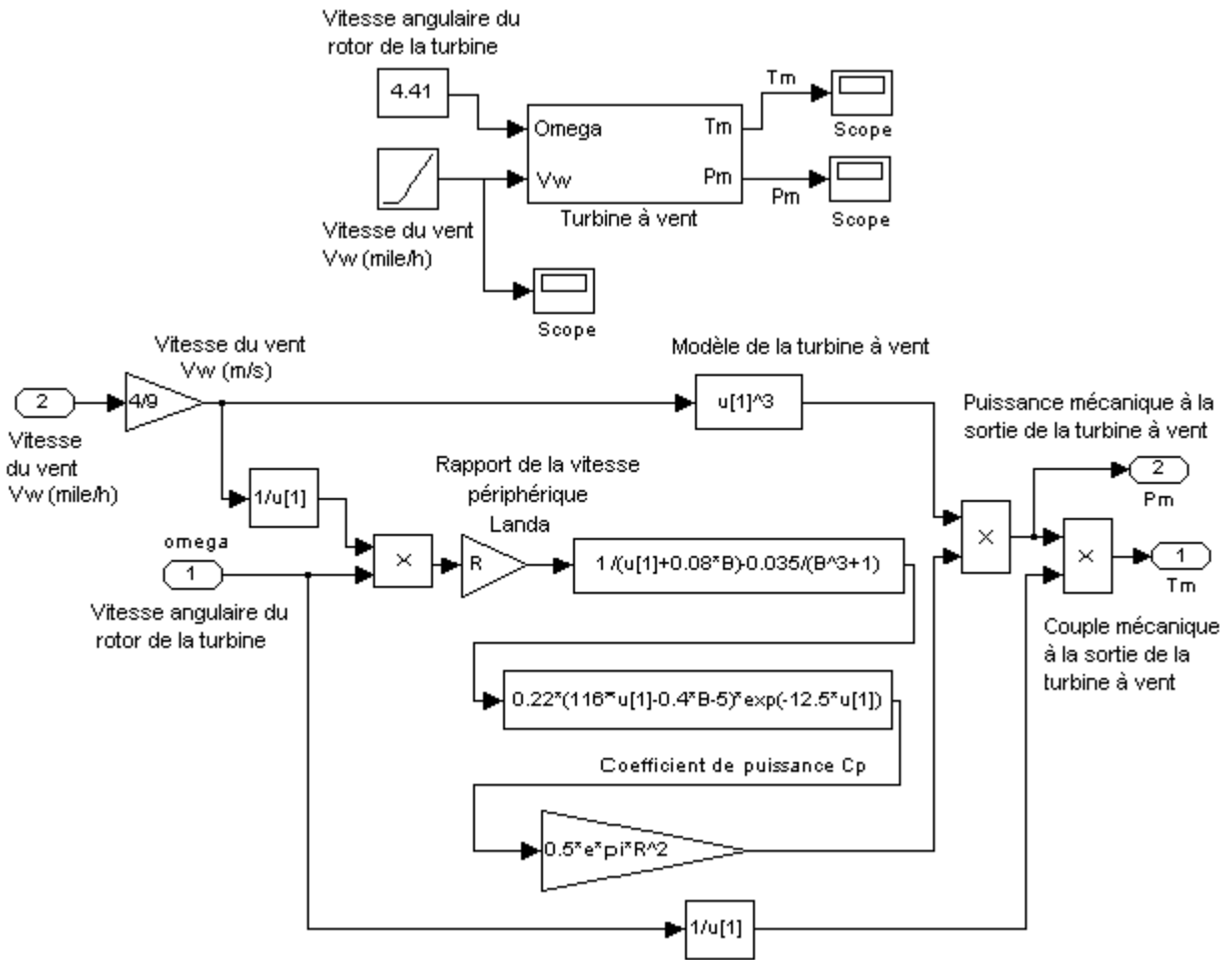


Fig.3.3.2 : Modèle de la turbine à vent (iii) développé sous Matlab-Simulink

Dans un premier temps nous allons analyser ce modèle séparément, nous considérons donc la variation de la vitesse du vent ainsi que la variation de l'angle d'attaque de l'éolienne (α), la vitesse du rotor de la turbine est considérée constante et égale à $\frac{2\pi f}{23,75.p} = 4,41(\text{rad/s})$, il

s'agit d'une approximation car en réalité la vitesse en mode de fonctionnement générateur est légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme. La figure 3.3.3 présente les courbes du couple, de la puissance ainsi que du coefficient de puissance de la turbine en fonction de λ qui est le rapport de vitesse périphérique, et ce pour différentes valeurs de l'angle d'attaque de l'éolienne. Nous constatons que quand l'angle (α) augmente la puissance maximale ainsi que le couple maximal à la sortie de la turbine augmentent aussi, par contre la valeur maximale de la courbe du coefficient de puissance diminue quand l'angle (α) augmente.

Pour un angle $a = 0$ (valeur dont nous allons travailler par la suite, pour l'étude du système mécanique à deux masses), le maximum de puissance extraite du vent correspond à $\lambda \approx 3$ et la valeur maximale du coefficient C_p correspond à $\lambda \approx 6$; si nous choisissons de travailler initialement entre ces deux valeurs, c'est à dire avec $\lambda = 5$, sachant que $\lambda = R.\Omega/V_W$ avec $R = 11.6m$ et $\Omega \approx 4,41(rad/s)$, à la valeur $\lambda = 5$ correspondra une vitesse de vent $V_W \approx 10m/s \approx 23(mile/h)$.

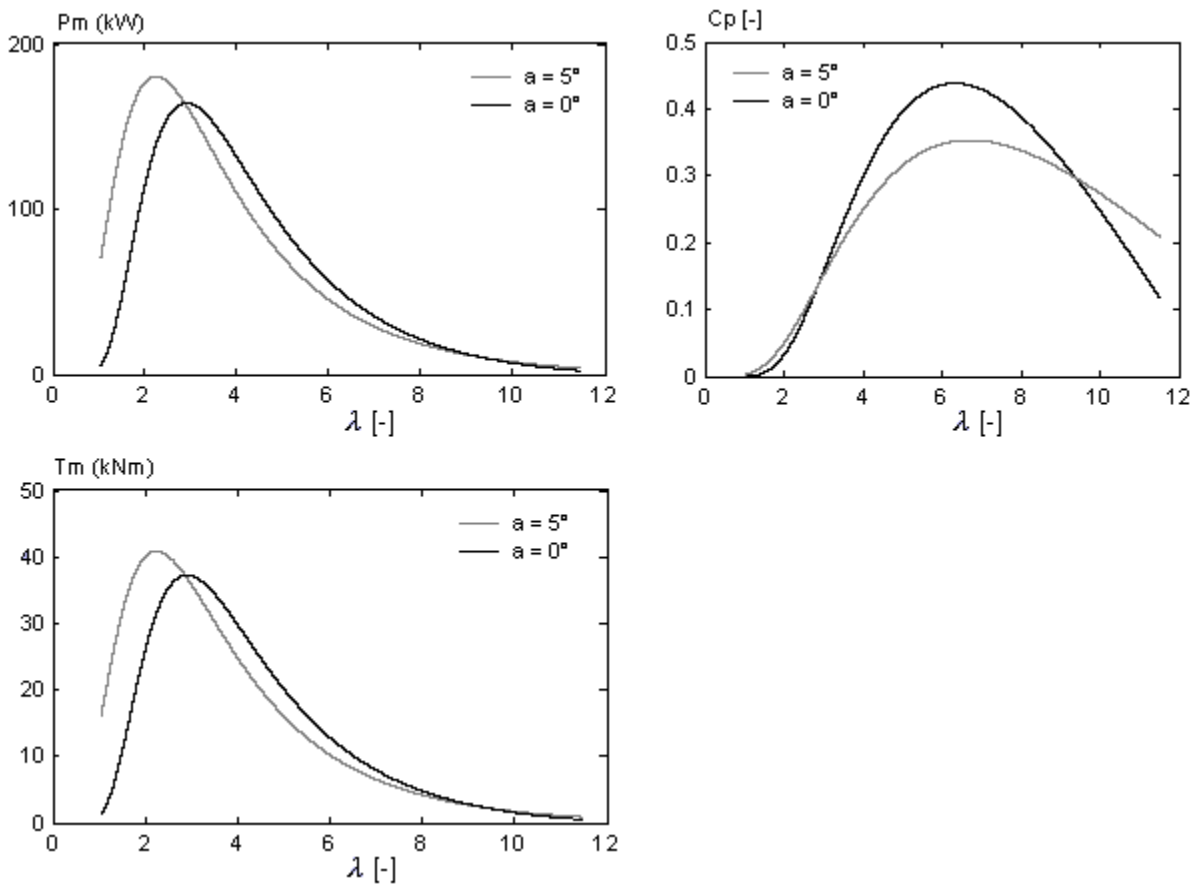


Fig.3.3.3 : Caractéristiques de la puissance et du couple et à la sortie de la turbine, ainsi que du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse périphérique λ , pour différentes valeurs de l'angle d'attaque des pales

Le modèle de tout le système composé de la machine asynchrone, de la turbine à vent ainsi que du système mécanique à deux masses, tel que développé sous Matlab-Simulink est le suivant (Fig. 3.3.4) :

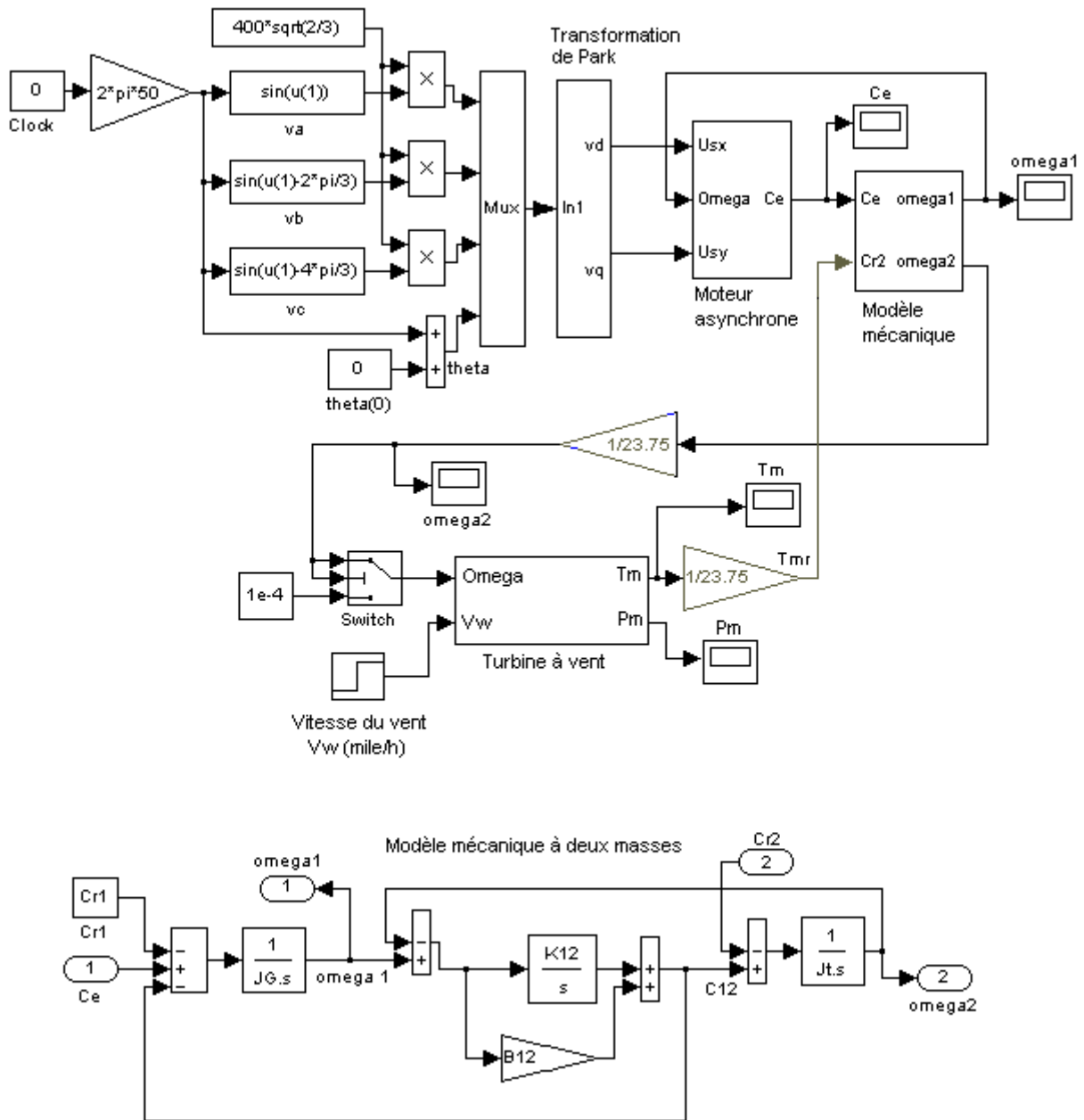


Fig.3.3.4 : Schéma de simulation développé sous Matlab-Simulink du système de l'éolienne composé de la machine asynchrone, de la turbine à vent et du système mécanique à deux masses.

Les courbes de simulation obtenues à l'aide du modèle de la figure 3.3.4 sont présentées ci-dessous, il est à préciser que nous avons dû diminuer le pas de calcul pour minimiser le temps demandé par ces simulations.

La figure 3.3.5 montre l'état au démarrage du système de l'éolienne pour un angle d'attaque des pales : $a = 0^\circ$ et une vitesse du vent constante ' $V_W = 23\text{mi/h}$ '. En pratique cette situation doit être traitée par des commandes adaptées ce qui ne représente pas l'objectif de ce projet; Par ailleurs, nous avons essayé de soulever dans cette figure une comparaison entre le comportement du modèle à deux (2) masses et le comportement du même modèle avec une représentation rigide à une (1) masse. Les courbes présentées à la figure 3.3.6 sont obtenues avec un angle d'attaque des pales : $a = 0^\circ$, la vitesse du vent est considérée constante ' $V_W = 23\text{mi/h}$ ' jusqu'à l'instant $t = 40\text{s}$ où une variation $\Delta V_W = 3\text{mi/h}$ a été appliquée, nous avons donc négligé toute perturbation du vent jusqu'à l'instant $t = 40\text{s}$ et après cet instant. Les mêmes conditions de simulation ont été considérées pour l'essai relatif à la figure 3.3.7 avec la différence que les perturbations du vent ont été prises en compte dans ce deuxième cas, Nous avons représenté ces perturbations par un signal aléatoire variant de -1mi/h à $+1\text{mi/h}$ que nous avons superposé à la valeur de base de la vitesse du vent.

Ceci dit nous avons tenu compte dans les simulations relatives à la figure 3.3.8 d'un deuxième phénomène qui n'est pas dû à la variation de la vitesse du vent mais aux variations de la pression du vent ou encore du couple exercé par le vent sur la turbine dues aux passages des pales devant la tour. En effet, nous avons deux types d'éoliennes : i) les éoliennes à empennage qui sont orientées afin que l'hélice soit toujours face au vent, c'est le rôle de l'empennage qui fait pivoter l'ensemble autour de l'axe vertical, ii) et les éoliennes auto-orientables dont le rotor de la turbine est situé par rapport à la tour vent arrière; dans le premier cas l'effet de sillage est évité, dans le deuxième cas le passage de la pale devant la tour cause une baisse momentanée de la puissance du vent, et par conséquent celle du couple appliqué par le vent sur la turbine comme montré à la figure 3.3.9. étant donné que l'approximation du coefficient C_p ne tient pas compte de telles variations, le problème est contourné par l'intégration indirecte de ces variations dans le modèle de calcul du couple à l'entrée ou à la sortie de la turbine.

Par référence à la figure 3.3.9, si nous admettons que la largeur de la tour est $W = 15^\circ \text{méc} = 0,2618(\text{rad})$; et que le rotor de la turbine tourne à une vitesse légèrement supérieur à $\Omega \approx 4,41(\text{rad/s})$, soit : $\Omega \approx 4,45(\text{rad/s}) = 0,71(\text{tr/s})$, autrement dit la durée d'un tour du rotor sera $T = 1,4120(\text{s})$. Pour une éolienne à trois pales, le passage de la pale devant la tour se produira après chaque $T = 0,471(\text{s})$, donc la baisse momentanée du couple produit par la turbine sera une fonction périodique de période $T = 0,471(\text{s})$, alors que la durée de la baisse sera égale à $p = \frac{0,2618(\text{rad}) \cdot 1(\text{s})}{4,45(\text{rad})} \approx 0.06\text{s}$. L'introduction de cette fonction périodique dans le modèle du calcul du couple a donné lieu aux résultats de simulation de la figure 3.3.8.

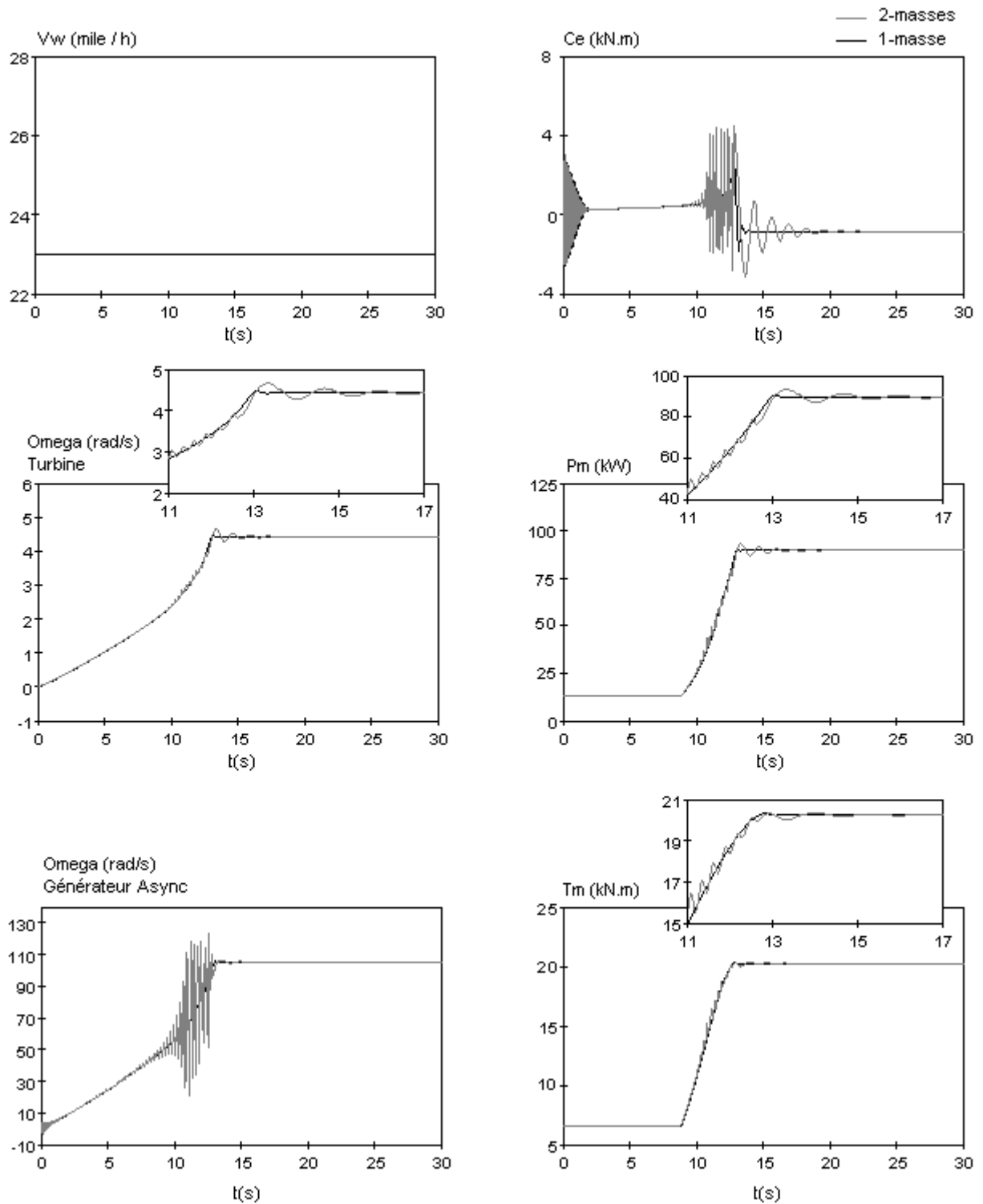


Fig.3.3.5 : Courbes au démarrage de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse du générateur pour une vitesse du vent constante : $V_w = 23 \text{ mi/h}$, quand les perturbations sont négligées.

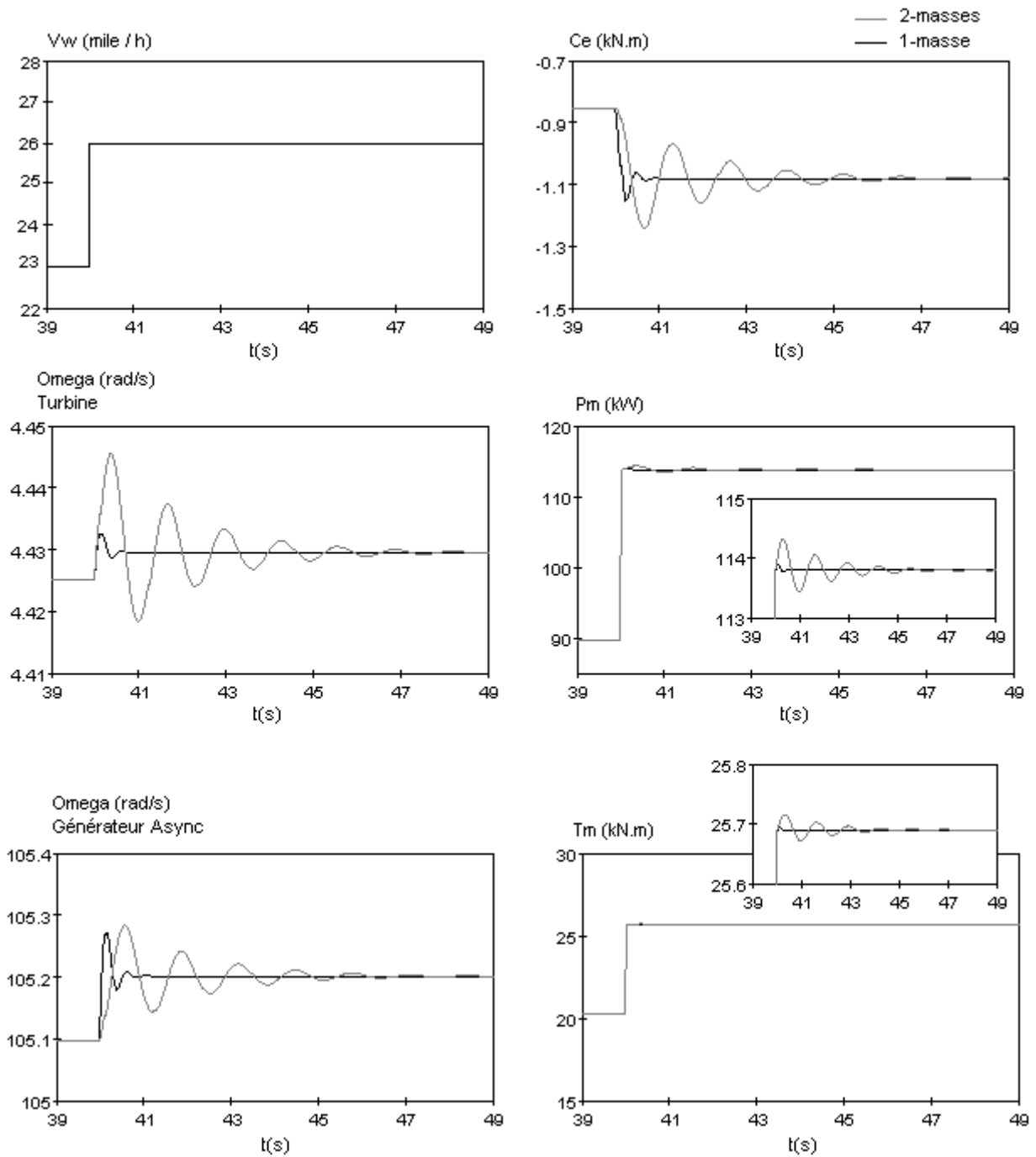


Fig.3.3.6 : Courbes de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse du générateur, pour une variation de la vitesse du vent $\Delta V_w = 3 \text{ mi/h}$ (de $V_w = 23 \text{ mi/h}$ à $V_w = 26 \text{ mi/h}$) à $t = 40 \text{ s}$, quand les perturbations sont négligées.

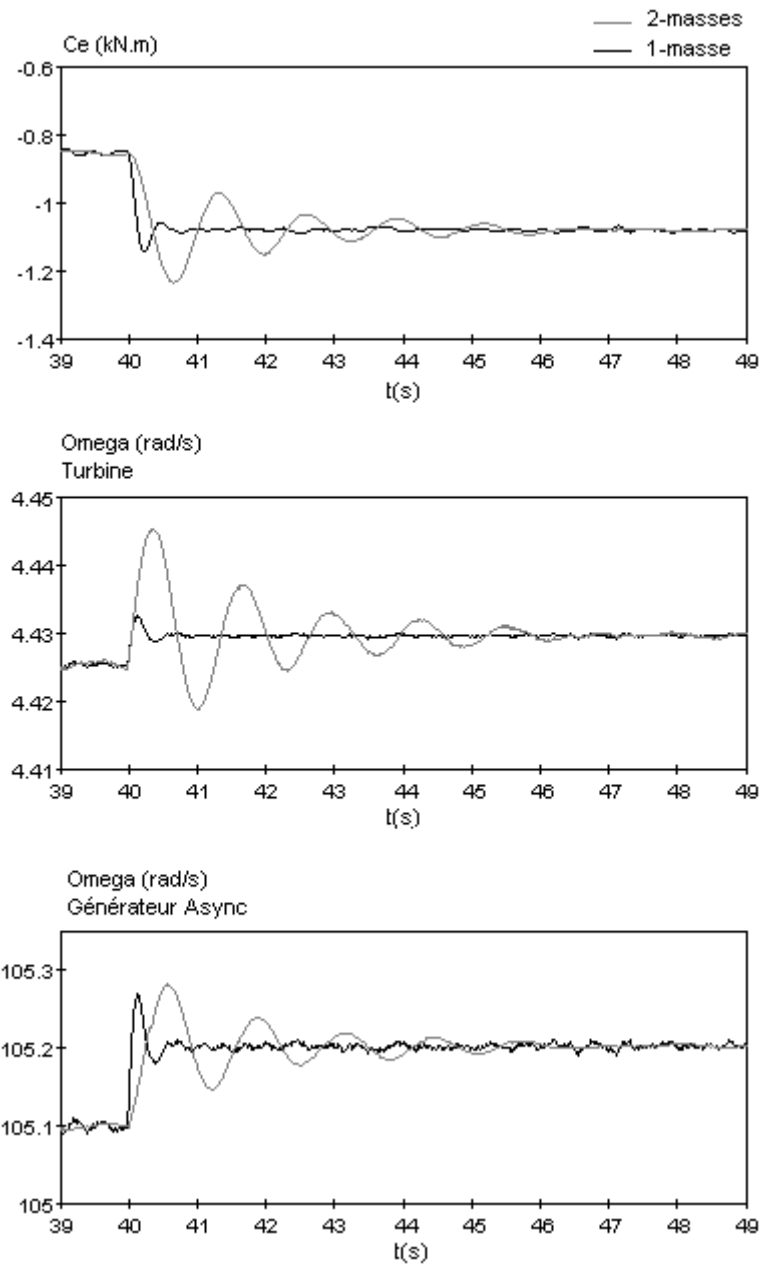


Fig.3.3.7 : Courbes de la vitesse de la turbine, du couple électromagnétique et de la vitesse du générateur pour une variation de la vitesse du vent $\Delta V_W = 3 \text{ mi/h}$ (de $V_W = 23 \text{ mi/h}$ à $V_W = 26 \text{ mi/h}$) à $t = 40 \text{ s}$, quand les perturbations du vent sont considérées.

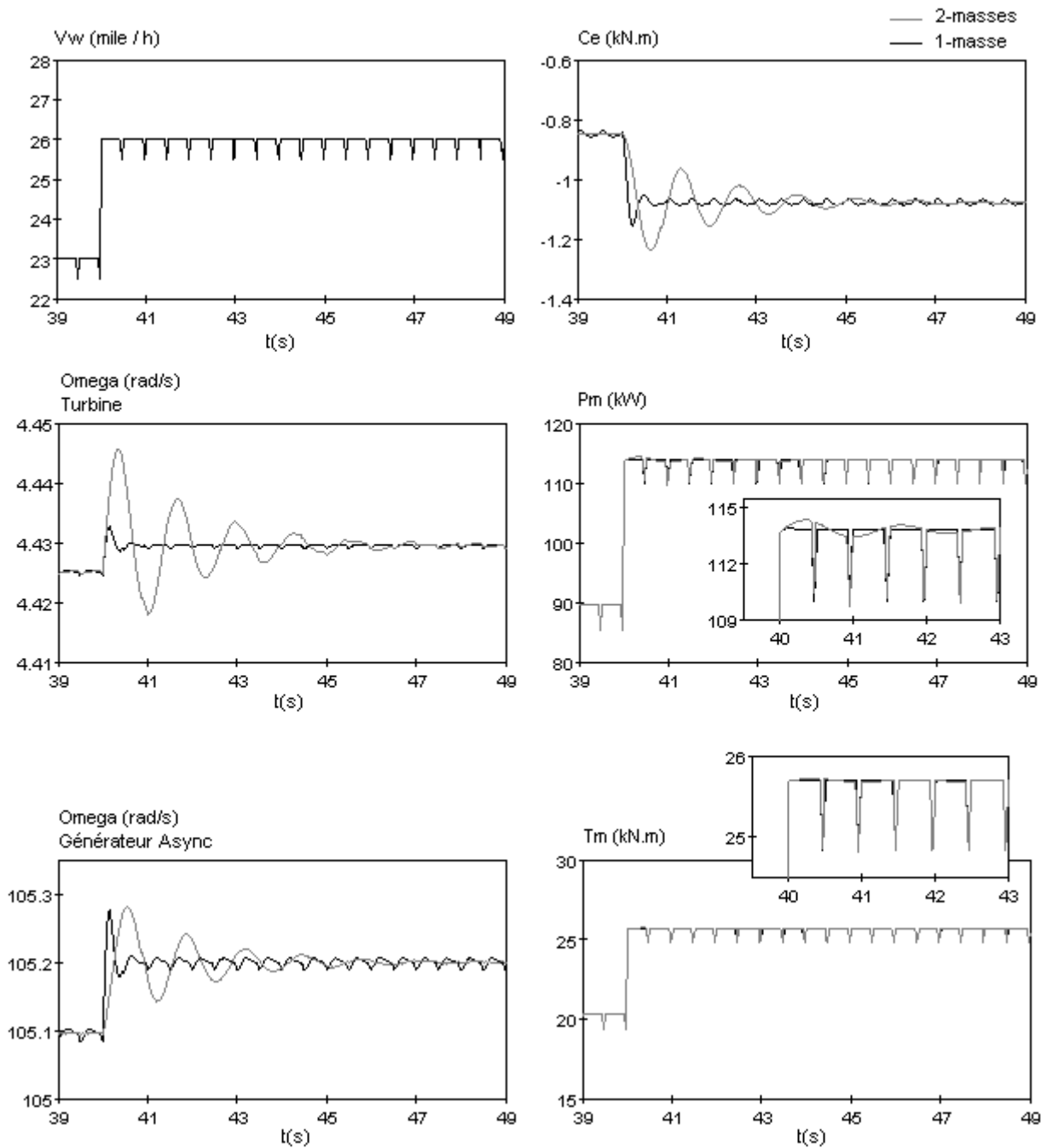


Fig.3.3.8 : Courbes de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse du générateur pour une variation de la vitesse du vent $\Delta V_W = 3 \text{ mi/h}$ (de $V_W = 23 \text{ mi/h}$ à $V_W = 26 \text{ mi/h}$) à $t = 40 \text{ s}$, quand les variations momentanées de la pression du vent, dues au passage des pales devant la tour, sont considérées.

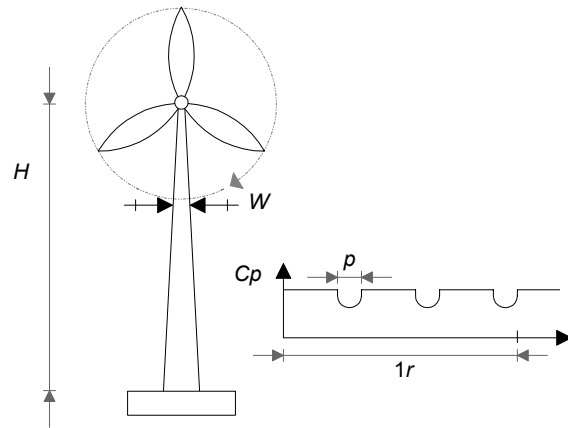


Fig.3.3.9 : Représentation de la baisse momentanée de la puissance extraite du vent, due au passage de la pale devant la tour

3.4 - Validation du système de l'éolienne à base de machine asynchrone sous EMTP :

Le modèle de tout le système (génératrice asynchrone + turbine) déjà développé sous Matlab-Simulink, est développé maintenant sous EMTP, il est représenté à la figure 3.4.1.

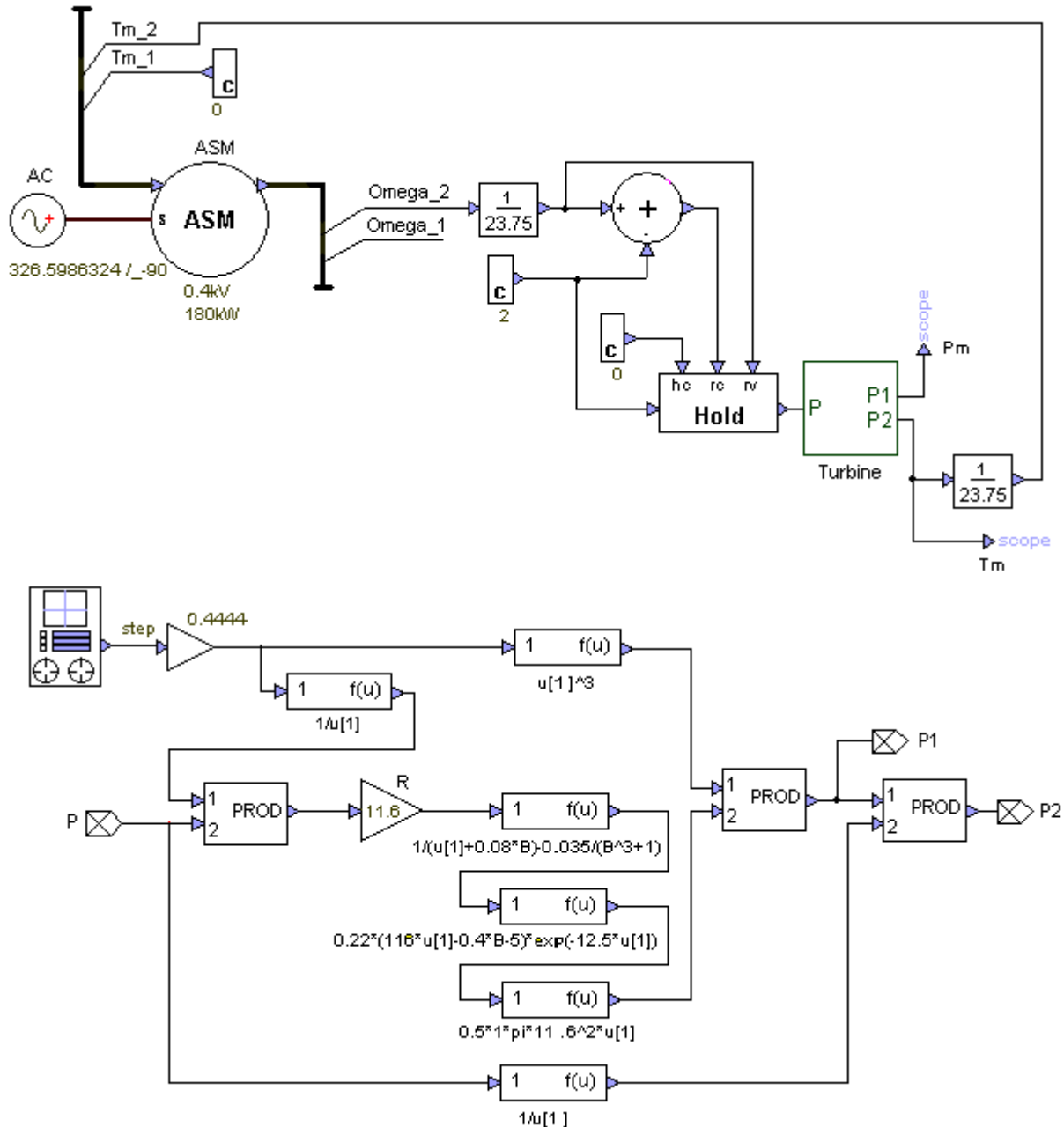


Fig.3.4.1 : Schéma de simulation développé sous EMTP du système de l'éolienne à deux masses composé de la machine asynchrone et de la turbine à vent

Nous présentons les résultats de simulation obtenus à l'aide du modèle développé sous EMTP via les figures 3.4.2 et 3.4.3, nous constatons que nous obtenons des résultats similaires à ceux obtenus précédemment à l'aide de Matlab-Simulink.

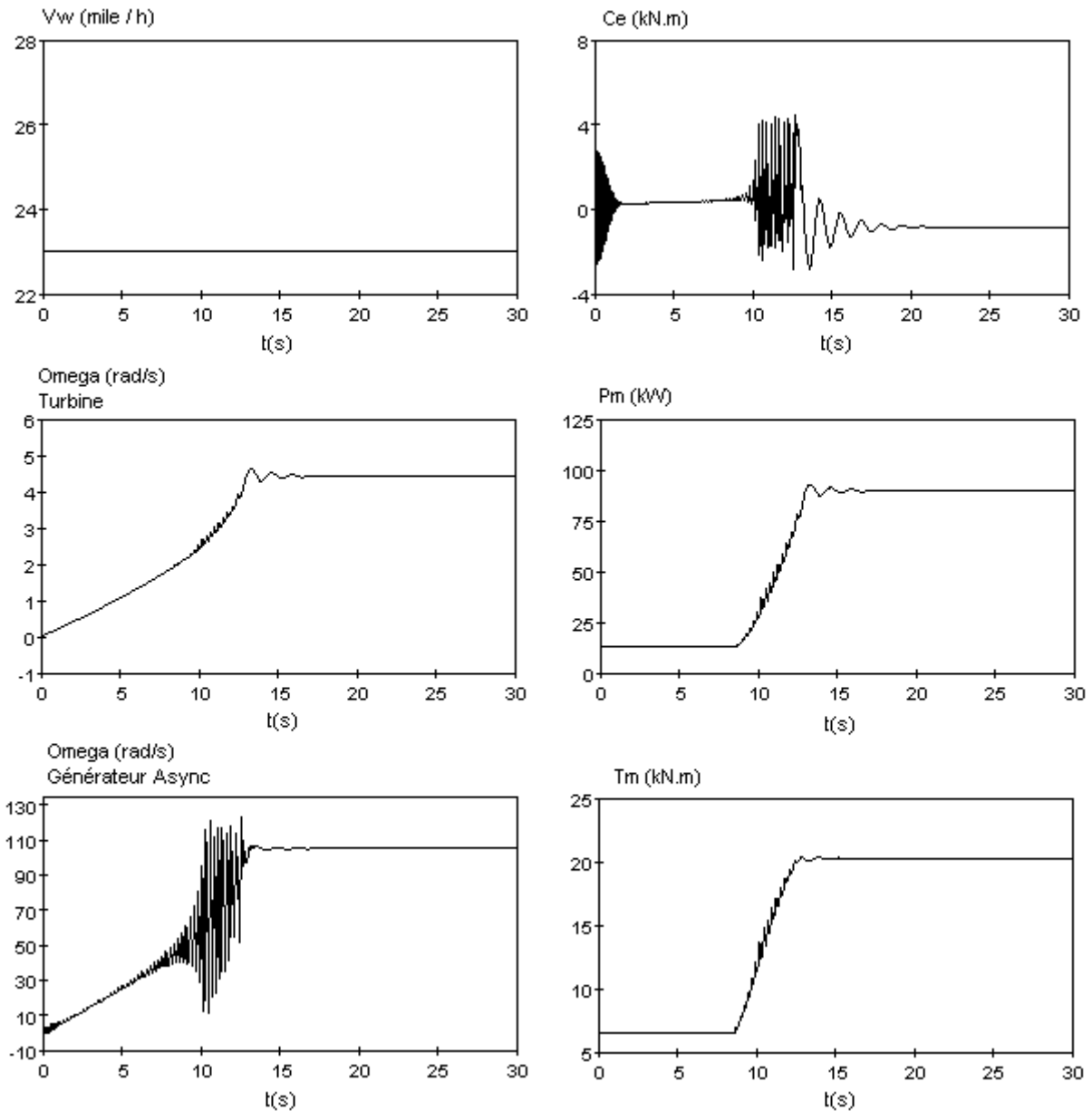


Fig.3.4.2 : Courbes au démarrage de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse du générateur pour une vitesse du vent constante $V_w = 23\text{mi/h}$, quand les perturbations sont négligées

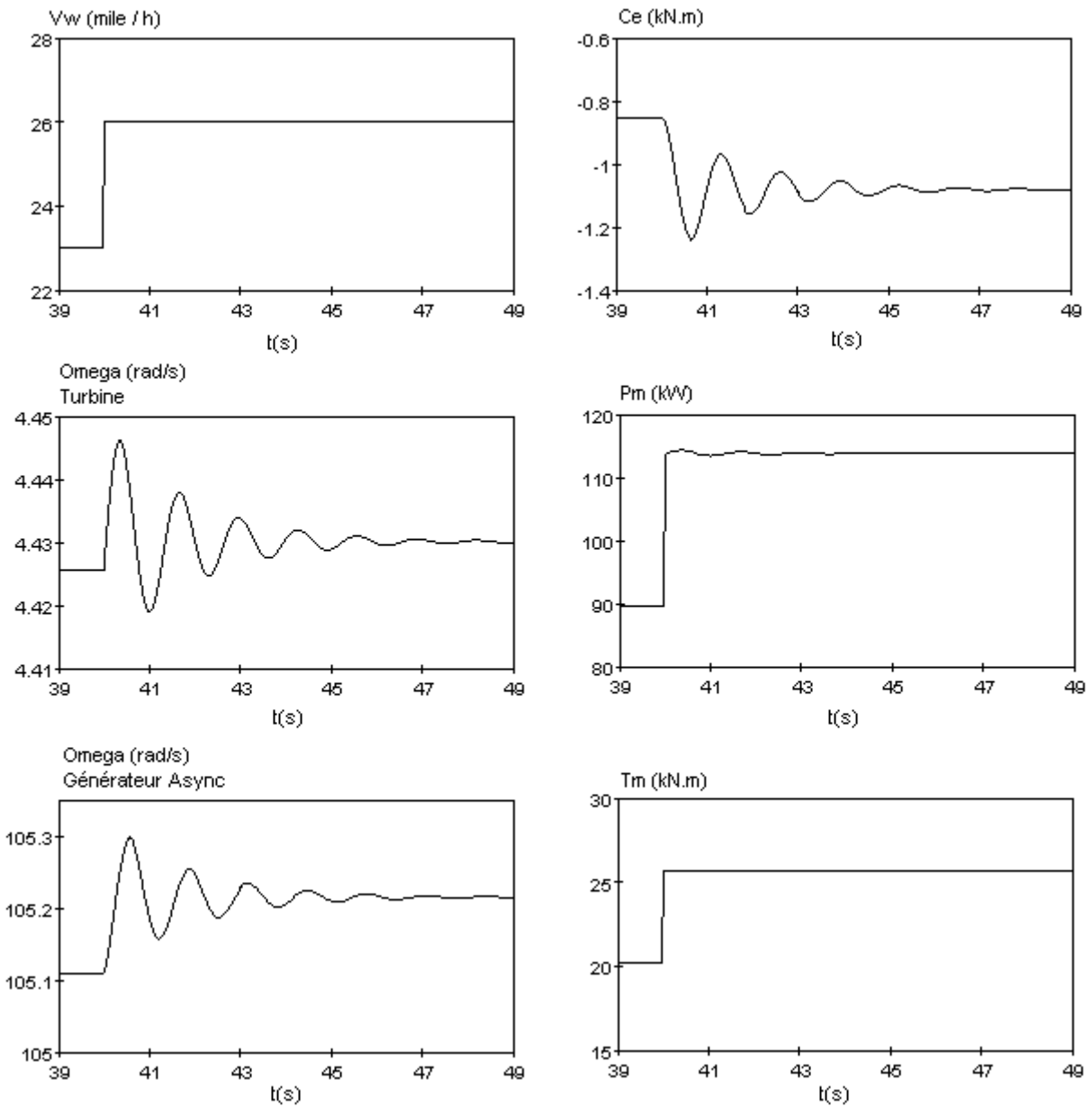


Fig.3.4.3 : Courbes de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse du générateur pour une variation de la vitesse du vent $\Delta V_w = 3 \text{ mi/h}$ (de $V_w = 23 \text{ mi/h}$ à $V_w = 26 \text{ mi/h}$) à $t = 40 \text{ s}$, quand les perturbations sont négligées.

À l'aide des figures 3.4.4 et 3.4.5 nous cherchons à comparer les courbes obtenues à l'aide de Matlab et EMTP, A savoir que la simulation sous Matlab était effectuée à pas variable (Max step = $1e^{-3}$ s, Min step = $1e^{-4}$ s), alors que la simulation sous EMTP était effectuée à pas fixe (Main time-step (Δt) = $1e^{-4}$ s), la précision choisie pour les deux logiciel est = $1e^{-4}$. Nous constatons d'après les figures en question qu'il existe une certaine différence entre les courbes obtenues par les deux simulateurs due au pas de calcul. Par ailleurs il reste à préciser que l'écart reste très négligeable (l'écart maximal constaté est de l'ordre de 0,1%).

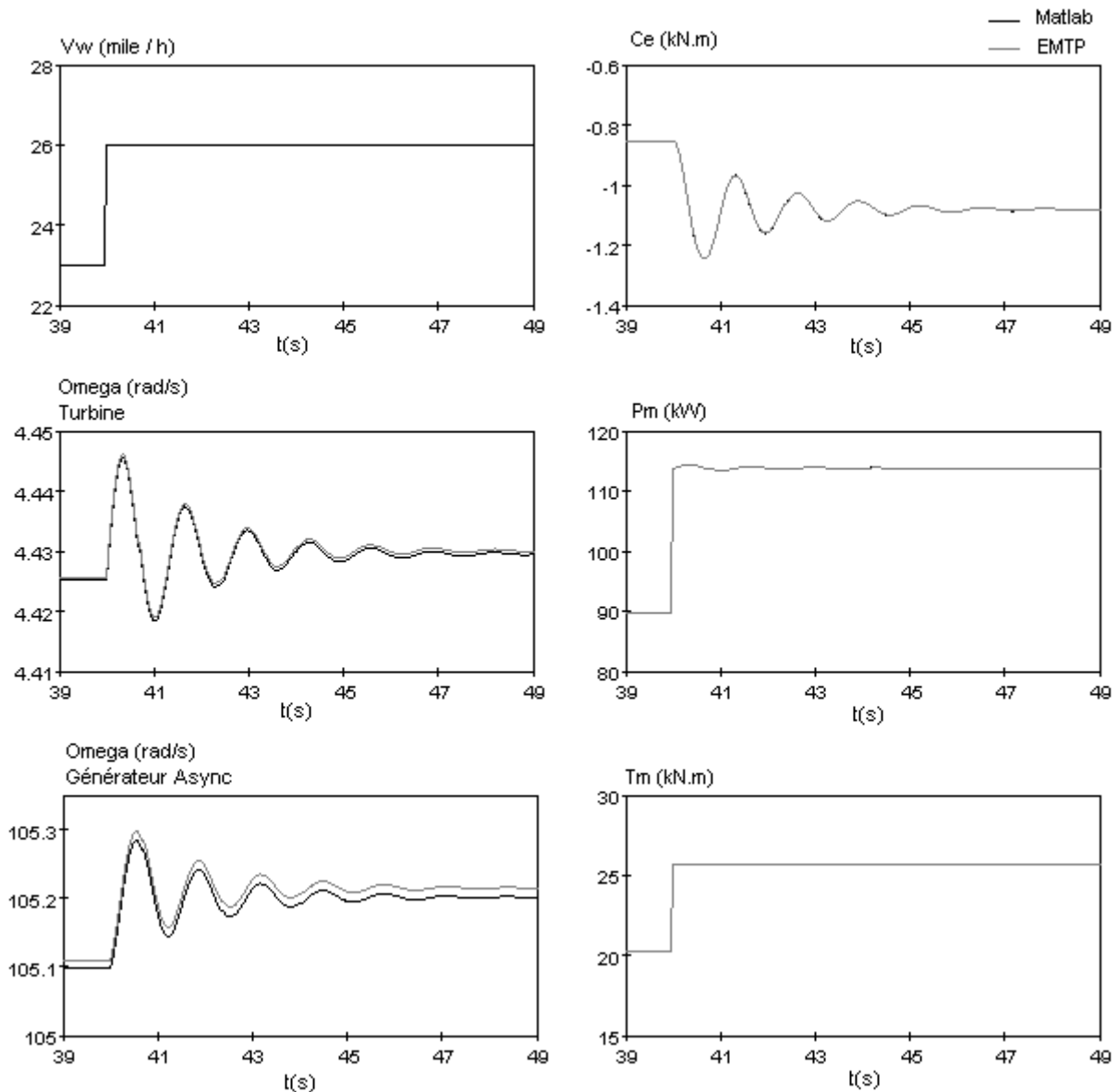


Fig. 3.4.4 : Comparaison de courbes obtenues par Matlab et EMTP de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse du générateur pour une variation $\Delta V_w = 3 \text{ mi/h}$ de la vitesse du vent à $t = 40 \text{ s}$, pour un pas de calcul de EMTP (Δt) = $1e^{-4}$ s et un pas de calcul de Matlab variable de (Δt_{max}) = $1e^{-3}$ à (Δt_{min}) = $1e^{-4}$ s.

Il est à préciser que les résultats présentés à la figure 3.4.5 sont définis en terme de pourcentage par rapport aux valeurs atteintes en régime permanent suite à la variation de la vitesse du vent, à savoir : $C_e = -1,1 (kN.m)$, $\Omega_T = 4,43 (rad/s)$, $\Omega_G = 105,2 (rad/s)$, $P_m = 114 (kW)$, $T_m = 25,7 (kN.m)$.

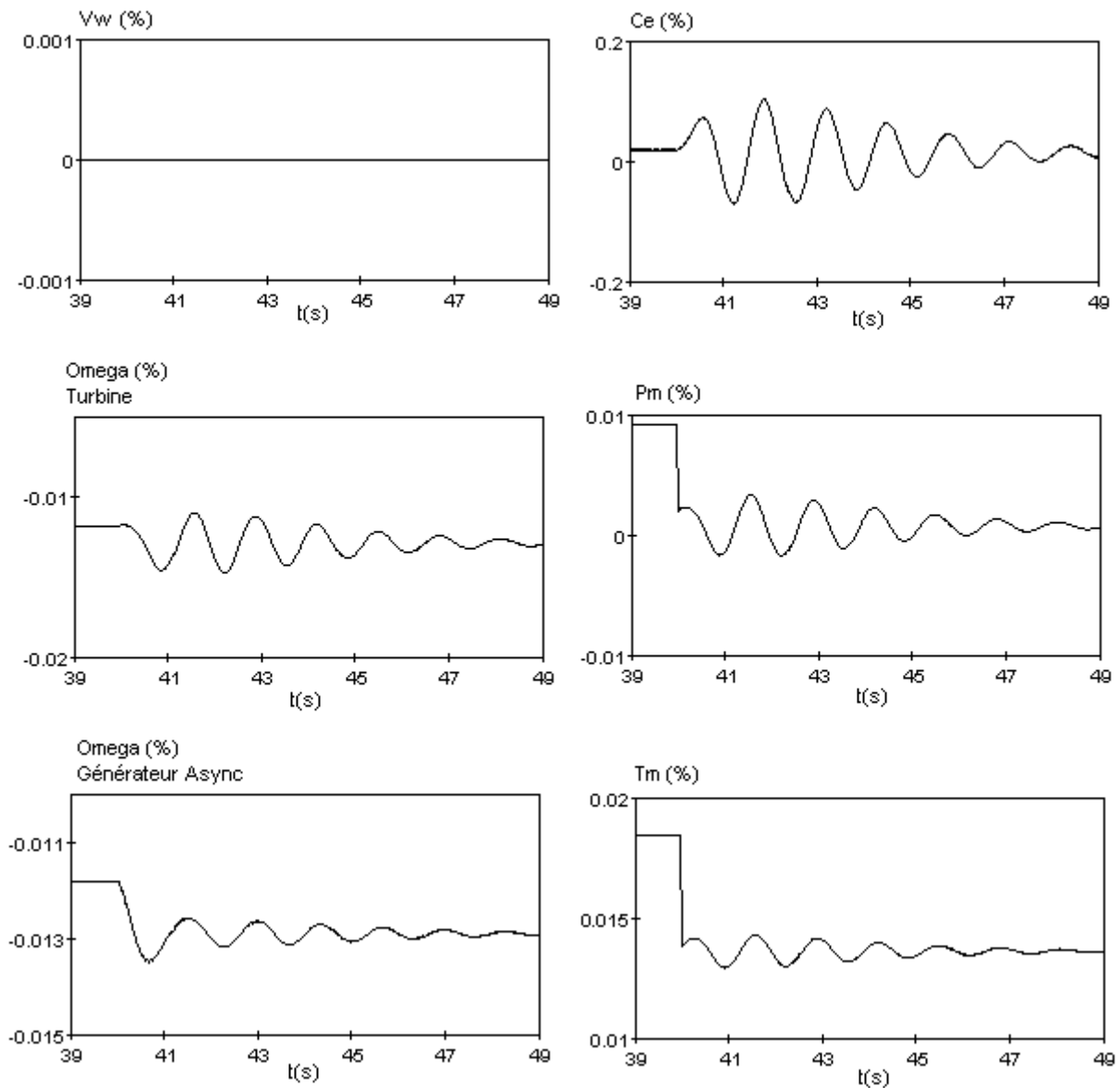


Fig. 3.4.5 : Différence de courbes obtenues par Matlab et EMTP de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse du générateur pour une variation de la vitesse du vent $\Delta V_w = 3 \text{ mi/h}$ à $t = 40 \text{ s}$, pour un pas de calcul de EMTP $(\Delta t) = 1 \text{ e}^{-4} \text{ s}$ et un pas de calcul de Matlab variable de $(\Delta t_{\text{max}}) = 1 \text{ e}^{-3}$ à $(\Delta t_{\text{min}}) = 1 \text{ e}^{-4} \text{ s}$.

Conclusion

Dans le cadre de ce projet nous avons procédé en premier lieu à l'étude du modèle d'un système électromécanique multi-masses à base d'un moteur à courant continu et ce l'aide de deux logiciels différents, à savoir : les logiciels EMTP et Matlab-Simulink et nous avons conclu tenant compte des résultats de comparaison obtenus que pour un pas de calcul choisi assez faible, les différences entre les deux environnements de simulation Matlab et EMTP, quoique les simulations effectuées sous EMTP est à pas fixe alors que les simulations effectuées sous Matlab étaient à pas variable, sont légères. Par la suite une étude comparative entre les deux modèles de la machine asynchrone, celui développé par l'IREQ et celui développé dans le cadre de ce projet sous Matlab-Simulink, a permis de valider le premier modèle, à savoir le modèle développé par l'IREQ et intégré dans la librairie du logiciel EMTP.

Par ailleurs, dans le cadre des deux applications relatives au modèle du système électromécanique multi-masses à base du moteur asynchrone et celui à base du moteur à courant continu, nous avons montré qu'un système électromécanique multi-masses est sujet au phénomène de résonance du au couplage élastique entre la machine électrique et le système de traitement mécanique, et nous avons mis en évidence l'importance de la contribution des moments d'inertie des différentes parties du système ainsi que de la contribution des valeurs des coefficients de rigidité entre ces différents éléments, dans l'amortissement de la résonance mécanique.

En dernier lieu, une application pratique au domaine des éoliennes a mis en valeur le fonctionnement en mode générateur des deux modèles à base de machine asynchrone. À cet effet, nous tenons à signaler que des difficultés réelles ont été constatées lors de la mise au point d'un modèle multi-masses d'éolienne, vu la complexité du mécanisme et la rareté d'information sur le sujet. En particulier, la définition du couple exercé par le vent sur la turbine a nécessité une recherche considérable afin de saisir la différence entre les différents modèles mathématiques proposés dans la littérature et les adapter convenablement à l'application d'éolienne traitée dans le présent projet; une nouvelle méthode de calcul du couple de la turbine dans un mode de simulations dynamiques, a été donc développée. Les résultats de simulation obtenus à l'aide des deux logiciels suscités nous ont permis en plus de la validation des deux modèles en mode générateur, de mettre en évidence le phénomène vibratoire du système d'éolienne à deux masses, à noter que l'élasticité liée au multiplicateur de vitesse est une source d'ennui majeur qui rend le rotor de la machine asynchrone à la merci des soubresauts mécaniques des pales. Nous avons tenu compte aussi dans l'analyse du comportement de l'éolienne de la variation continue et aléatoire du vent, ainsi que du phénomène de la baisse momentanée de la pression du vent lorsque chaque pale passe devant la tour.

Finalement, il serait important de mentionner que ce projet m'a permis d'acquérir une expérience enrichissante dans le domaine des machines électriques grâce aux échanges que j'ai eu avec mes encadrants, et aussi de me familiariser avec le logiciel EMTP, un logiciel dont je peux me servir dans mes travaux futurs. Ceci dit, cette étude pourrait être complétée en développant un système de commande avancé de la turbine qui adapte les variations de l'angle

d'attaque de la pale aux variations du vent pour pouvoir contrôler la puissance générée en temps réel.

Des recherches bibliographiques peuvent être surtout effectuées en vue d'une classification des éoliennes utilisées actuellement à travers le monde, et ce en tenant compte de leurs différents paramètres à savoir : la puissance nominale générée, le moment d'inertie, les dimensions des pales, la hauteur de la tour, la plage de variation de l'angle d'attaque de la turbine, la vitesse du vent ou le site adaptés, etc.) ces données sont très utiles pour compléter des informations qui font souvent défaut au niveau des publications. Une même classification s'avère utile aussi dans le domaine des machines électriques, ou peut être limitée aux machines asynchrones. Ceci permettrait d'acquérir un certain sens pratique dans ce domaine.

Bibliographie

- [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. Roye, 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.
- [9] J.G. Slootweg, H. Polinder, and W.L. Kling, « Initialization of wind turbine models in power system dynamics simulations », Paper accepted for presentation at PPT 2001, 2001 IEEE Porto Power Tech Conference 10th – 13th September, Porto, Portugal.
- [10] J.G. Slootweg, S.W.H. de Haan, H. Polinder, and W.L. Kling, « General Model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations », IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, February 2003, pp.144-151.
- [11] Désiré Le Gourières, « Wind power plants, theory and design », Pergamon Press, First edition 1982.
- [12] Tomas Petru, and Torbjörn Thiringer « Modeling of Wind Turbines for Power System Studies », IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 4, November 2002, pp.1132-1139.