

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique*

Université Mentouri - Constantine –



Département d'électrotechnique

MÉMOIRE

Présenté pour obtenir

LE GRADE DE MAGISTER EN ÉLECTROTECHNIQUE

Option : **Modélisation et commande des machines électriques**

*Par*

**CHERFIA NAÏM**

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique –Constantine-

*Thème*

# *Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens*

Soutenu le : 07/ 06 / 2010 devant la commission d'examen :

Président : M<sup>r</sup> : Bouzid Aissa Professeur Univ.Constantine

Rapporteur: M<sup>r</sup> : Kerdoun Djallel Maître de conférences Univ.Constantine

Examineur: M<sup>r</sup> :Khezzar Abdelmalek Professeur Univ.Constantine

Examineur : M<sup>r</sup> :Mehasni Rabia Maître de conférences Univ.Constantine

*Université Mentouri Constantine, Algérie*

# *Dédicaces*

*A mes très chers parents;*

*A mes frères et ma sœur;*

*A toute ma famille ;*

*A tous mes amis;*

*A tous mes collègues;*

*A tous ceux que j'ai connu durant toutes mes études;*

*A tous ceux pour qui je compte et qui comptent pour moi;*

*Je dédie ce travail.*

# Remerciement

*Avant tous, Nous remercions en premier lieu notre dieu de nous donner la santé et la patience pour avoir terminé ce travail.*

*Je remercie très vivement monsieur Kerdoun Djallel, Maître de conférences à l'Université Mentouri de Constantine, de m'avoir confié le sujet, et de l'aide précieuse qu'il a toujours bien voulu m'apporter. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.*

*J'adresse mes chaleureux remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et ce mémoire :*

*Monsieur Bouzid, Professeur à l'Université Mentouri de Constantine, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de mémoire.*

*Monsieur Khezzer, Professeur à l'université de Constantine, qui m'a fait l'honneur de participer à ce jury en qualité d'examineur de mémoire.*

*Monsieur Mehasni, Maître de conférences à l'université de Constantine, qui m'a fait l'honneur de participer à ce jury en qualité d'examineur de mémoire.*

*Mes vifs remerciements vont également à l'ensemble des enseignants de l'institut d'électrotechnique de l'université de Constantine pour la formation qu'ils nous ont assuré au long de notre cursus universitaire.*

*Mes vifs remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, en particulier.*

*Je tiens à remercier mes parents car ce travail représente un petit fruit de leur souffrance et qui sans eux je ne pouvais traverser ces longues années d'études et de travail. Je ne saurais terminer sans remercier mes frères et ma sœur ainsi que toute la famille pour leurs encouragements soutenus et surtout pour leur soutien moral.*

# **Sommaire**

<b>Introduction générale.....</b>	<b>7</b>
<b>Chapitre 1 : Etat de l’art des installations éoliennes.....</b>	<b>10</b>
1.1 Production éolienne .....	11
1.2 Définition de l’énergie éolienne .....	12
1.3 Principe de fonctionnement d’une éolienne .....	12
1.4 Les différents types d’éoliennes .....	13
1.4.1 Les éoliennes à axe vertical .....	13
1.4.2 Les éoliennes à axe horizontal .....	13
1.4.2.a Principaux composants d’une éolienne à axe horizontal.....	14
1.5 Conversion de l’énergie éolienne.....	16
1.5.1 Loi de BETZ.....	16
1.5.2 Caractéristiques de puissance de rotor.....	20
1.6 Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l’énergie éolienne.....	24
1.6.1 Types de machines électriques .....	24
1.6.1.1 Générateur synchrone.....	25
1.6.1.2 Générateur asynchrone.....	26
1.6.1.2.a Machine asynchrone à cage d’écureuil .....	26
1.6.1.2.b Machine asynchrone à double alimentation .....	28
1.6.1.2.b.1 Structure des machines asynchrones à double alimentation .....	29
1.6.1.2.b.1.a Double alimentation par le stator .....	30
1.6.1.2.b.1.b Double alimentation par le stator et le rotor .....	31
1.6.1.2.b.2 Applications des machines asynchrones à double alimentation.....	32
1.6.1.2.b.3 Fonctionnement en génératrice à vitesse variable .....	32

1.6.1.2.b.4 Fonctionnement à vitesse fixe.....	34
1.6.1.2.b.5 Intérêt de la MADA .....	35
1.7. Conclusion.....	36
<b>Chapitre 2 : Modélisation d’entraînement électromécanique multi-masses.....</b>	
2.1 Équations du mouvement.....	38
2.2 Schéma équivalent à trois masses.....	40
2.3 Schéma équivalent à deux masses.....	41
2.4 Schéma équivalent à une masse.....	42
2.5 Importance de l'analyse de modèles multi-masses.....	43
2.6 Association moteur électrique .....	44
2.6.1 Modèle biphasé de moteur.....	47
2.6.2 Modèle du moteur à courant continu – charge.....	51
2.6.3 Modèle du moteur asynchrone – charge.....	53
2.6.4 Modèle du moteur asynchrone – charge.....	55
2.7 Conclusion.....	57
<b>Chapitre 3 : Simulation d’entraînement électromécanique multi-masses.....</b>	<b>58</b>
3.1 Simulation du moteur à c.c. à partir du modèle de trois masses.....	59
3.2 Simulation de la machine asynchrone à partir du modèle de trois masses.....	66
3.3 Simulation de la machine MADA à partir du modèle de trois masses.....	71
3.4 Conclusion.....	79
<b>Chapitre 4 : Application de la modélisation multi masses des générateurs asynchrone et asynchrone à double alimentation au domaine des éoliennes.....</b>	<b>80</b>
4.1 Modèle théorique de la turbine à vent.....	81
4.2 Description et données numériques d’un modèle 2-masses d’une éolienne à base de machine asynchrone.....	84
4.3 Simulation du système de l’éolienne à base de machine asynchrone sous Matlab-Simulink .....	84
4.4 Description et données numériques d’un modèle 2-masses d’une éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation.....	88

4.5 Simulation du système de l'éolienne à base de machine asynchrone double alimentation sous Matlab-Simulink .....	88
4.7 Conclusion.....	93
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>94</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>96</b>

## Introduction Générale



L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins en énergie électrique considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, plusieurs pays sont tournés vers une nouvelle forme d'énergie dite "renouvelable", cette énergie est l'énergie éolienne. Elle a été l'une des croissances les plus rapides de sources d'énergie dans le monde.

Au cours des deux dernières décennies il y a eu de nombreux progrès technologiques dans l'industrie éolienne, qui ont fait d'elle une source d'énergie plus fiable et plus rentable. En jours actuels, la production d'énergie éolienne est commercialisable et les systèmes de puissance sont de plus en plus pénétrables en cette dernière.

En outre, la production d'énergie éolienne a été de plus en plus acceptée par les investisseurs et plus de parcs éoliens sont en cours de construction, car ce secteur est devenu rentable. Le coût de l'énergie du vent a diminué au point où il y a des endroits que le prix de l'énergie éolienne est compétitif par rapport aux sources classiques d'énergie, même sans incitation [1].

L'énergie éolienne a non seulement un impact économique dans notre société, mais aussi un grand objectif environnemental et social. L'utilisation de cette énergie réduit les combustions des combustibles fossiles et des émissions conséquentes. Elle réduit également la dépendance des pays à la consommation du pétrole, en créant des emplois pour sa construction, son exploitation et son entretien.

La technologie moderne d'éoliennes a été accomplie avec l'aide de beaucoup de secteurs, tels que la science des matériaux, l'informatique, l'aérodynamique, les méthodes d'analyse, les essais, et de l'électronique de puissance. Sans l'aide de ces domaines, le développement rapide des nouvelles technologies ne serait pas possible. Un domaine relativement nouveau pour les éoliennes est l'électronique de puissance.

L'électronique de puissance permet une synchronisation entre l'éolienne et le réseau, l'exploitation de la turbine éolienne à vitesse variable, et l'augmentation de la production d'énergie du système. En outre, elle fournit des moyens pour transférer l'énergie à destination et en provenance des unités de stockage, permettant le stockage de l'excédent de cette dernière pour une utilisation ultérieure.

Les turbines modernes sont plus fiables et efficaces, leur bruit a été réduit de manière significative par rapport à leurs prédécesseurs. Bien que beaucoup d'améliorations aient été

apportées, il faut plus de travail à effectuer pour améliorer leur pénétration avec le réseau d'énergie éolienne, réduire leur coût de fabrication et d'installation, et améliorer leur efficacité pour toutes les vitesses du vent.

Le développement de nouvelles stratégies de commande pour maximiser l'obtention de la puissance à partir de l'efficacité de la turbine de vent et d'augmentation fera à production d'électricité de vent une source plus fiable de l'énergie à l'avenir.

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule autour de 4 chapitres principaux.

Dans le premier chapitre de ce mémoire un état de l'art de l'énergie éolienne sera présenté. Il s'agit d'une étude assez détaillée du système éolien et des différentes structures existantes (les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable et leur constitution).

On aborde la définition de la vitesse du vent à travers les équations et les concepts physiques, ainsi que les différents types des génératrices utilisées dans la chaîne de conversion et les différentes architectures possibles.

Dans le chapitre suivant, nous effectuons l'étude et la modélisation d'entraînement électromécanique multi-masses, composé d'une machine électrique et d'une charge mécanique interconnectée par un arbre flexible. Ce modèle multi-masse reflétant la complexité du mécanisme entraîné est indispensable pour l'étude de nombreux systèmes industriels.

Dans le chapitre trois, on fait une validation du module multi-masse des machines électriques à l'aide du logiciel Matlab. Le logiciel Matlab est un moyen efficace et économique pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes.

Dans le dernier chapitre, il s'agit de d'évaluer sous Simulink et de mettre en valeur le fonctionnement des deux modèles en mode générateur : un premier d'éolienne à base de machine asynchrone et un deuxième à base de machine asynchrone à double alimentation ; le couple exercé par le vent sur l'éolienne est également modélisé dans ce système.

**État de l'art des installations éoliennes**

Une éolienne est une installation qui convertit la puissance de vent en énergie électrique, donc le maximum d'énergie émis ne dépend pas seulement de la machine mais aussi des limites de la vitesse du vent. Les éoliennes convertissent l'énergie du vent en énergie électrique. D'autre part, elles convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique. L'électricité produite par les éoliennes est utilisée pour les circuits de charge de batterie, les systèmes de production d'énergie résidentiels, les systèmes de production distribuée, et les grands réseaux de services publics. Les différents éléments des éoliennes sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou axe horizontal), les structures de ces capteurs sont de plus en plus performantes.

Une éolienne doit comporter:

- un système de contrôle électrique (machine électrique associée à la commande).
- Un système de contrôle mécanique (orientation des paliers de l'éolienne, orientation de la nacelle).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différents types de génératrices.

La dernière partie de ce chapitre illustre les différentes structures des machines asynchrones à double alimentation, leur principe de fonctionnement, leurs applications et leur intérêt.

## **1.1 Production éolienne**

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion allemande, scandinave et espagnole, on comptait en 2000 environ 15000 MW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance éolienne installée dans le monde. En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre de 70000 MW [2].

## 1.2 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur (Fig.1.1).

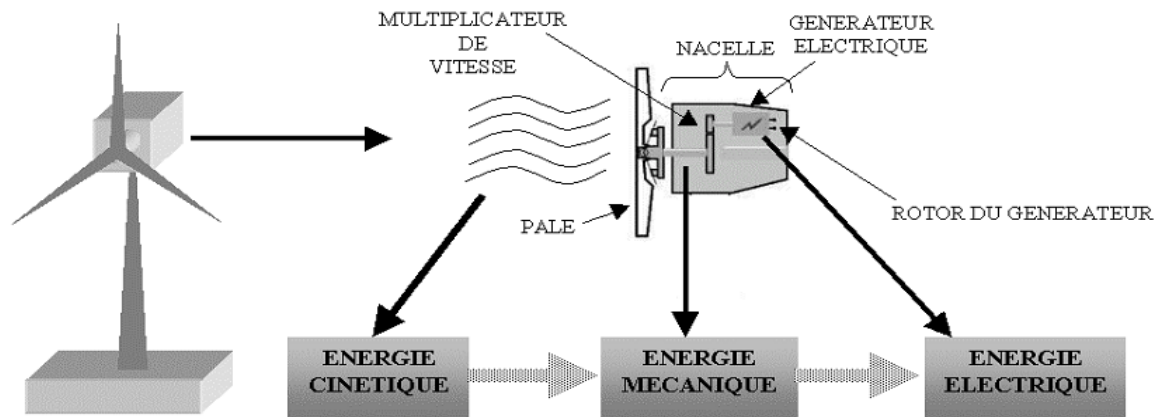


Figure 1.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent [3]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [4].

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

## 1.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice.

## 1.4 Les différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, on classe les éoliennes en deux types :

### 1.4.1 Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance [4]. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mat qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [5].



Figure 1.2 Eolienne à axe vertical [8]

### 1.4.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [6]. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [7].



Figure 1.3 Eolienne à axe horizontal [8]

#### **1.4.2.a Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal**

On présente les différents composants d'une éolienne à axe horizontal étant le sujet de notre étude (Fig. 1.4) [8].

- 1- Pales en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stall (décrochage aérodynamique). Freins aérodynamiques d'extrémité pivotants.
- 2- Moyeu du rotor en fonte.
- 3- Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
- 4- Paliers du rotor à double rangée de billes.
- 5- Arbre lent du rotor en acier haute résistance.
- 6- Multiplicateur de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).
- 7- Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
- 8- Accouplement avec la génératrice de type flexible.
- 9- Génératrice (800/200 kW) asynchrone refroidie à l'eau.
- 10- Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur - génératrice.
- 11- Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmettant les signaux au système de contrôle de la turbine.
- 12- Système de contrôle surveillant et pilotant la turbine.
- 13- Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.
- 14- Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
- 15- Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.

16- Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.

17- Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

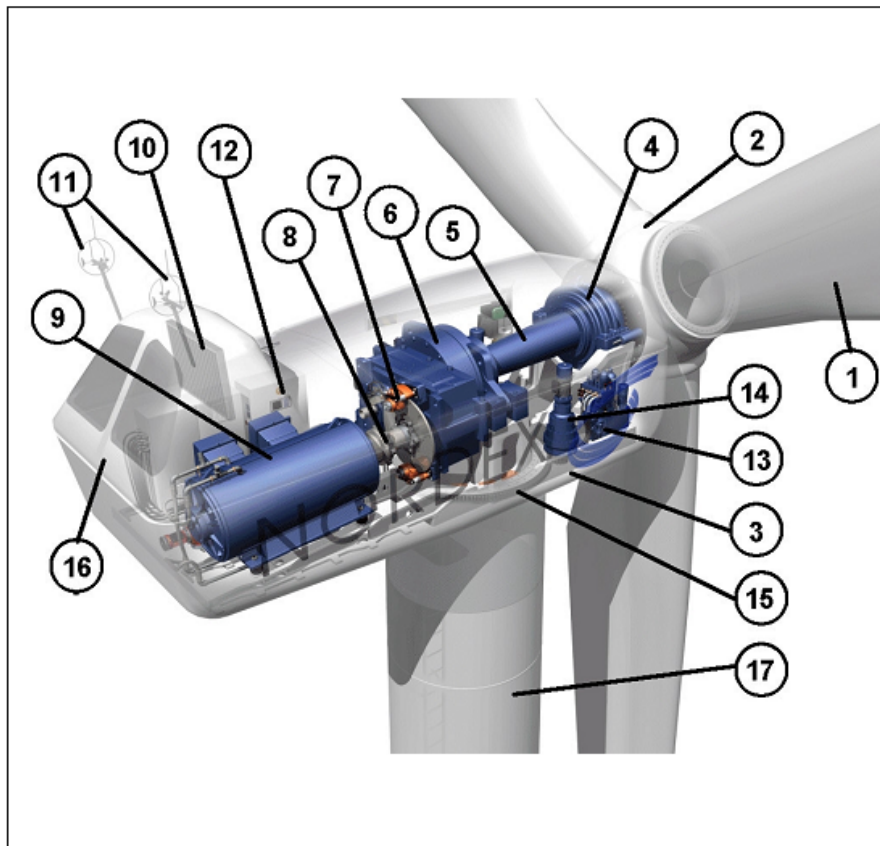


Figure 1.4 Principales composantes de l'éolienne à axe horizontal [8]

En général, l'éolienne à axe horizontal est constituée de trois éléments principaux : La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [9].

➤ **La tour** : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.

➤ **La nacelle** : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :

- ✓ Arbre.
- ✓ Multiplicateur.
- ✓ Roulements.
- ✓ Le frein à disque permettant d'arrêter le système en cas de surcharge.
- ✓ Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une MADA.



✓ Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).

➤ **Les pales** : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.

➤ **Le moyeu** : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.

## 1.5 Conversion de l'énergie éolienne

### 1.5.1 Loi de BETZ

Les pales d'une éolienne tire l'écoulement d'énergie à partir de l'air mobile, qui convertit cette dernière en énergie de rotation et la fournit par l'intermédiaire d'une unité mécanique d'entraînement au rotor d'un générateur électrique. L'énergie cinétique en air d'un objet de la masse  $m$  se déplaçant avec la vitesse  $v$  est égale à [19], [20]:

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2; \quad (Nm) \quad (1.1)$$

La puissance de l'air en mouvement, si nous supposons la vitesse constante du vent, est la suivante :

$$P_{mt} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2; \quad (W) \quad (1.2)$$

Où :  $\dot{m}$  - le taux de écoulement (débit) de la masse par seconde.

Lorsque l'air passe à travers une zone  $A$ , telle que la surface balayée par les pales du rotor, la puissance dans l'air peut être estimé par :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3; \quad (W) \quad (1.3)$$

Où :  $\rho$  - la densité de l'air. Elle varie avec la pression de l'air et la température, dans le travail on prend  $\rho = 1.225 \text{ kg} / \text{m}^3$ .

L'équation ci-dessus estime combien de puissance se trouve dans le vent, mais quelle quantité de cette puissance peut être obtenue à partir du flux d'air avec un convertisseur de puissance? L'énergie mécanique qui est obtenu du convertisseur à partir du flux d'air sera égale à la différence des puissances du flux d'air avant et après le convertisseur [10] :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot A_1 \cdot v_1^3 - \frac{1}{2} \rho \cdot A_2 \cdot v_2^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot (A_1 \cdot v_1^3 - A_2 \cdot v_2^3); \quad (W) \quad (1.4)$$

Où :  $A_1$  et  $A_2$  - les sections transversales avant et après le convertisseur ;

$v_1$  et  $v_2$  - la vitesse du vent avant et après le convertisseur.

Comme le flux d'air passe par le convertisseur, la vitesse du vent doit diminuer derrière le convertisseur de d'énergie éolienne et le flux massif reste invariable. Par conséquent,

$$\rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2; \left(\frac{Kg}{s}\right) \quad (1.5)$$

Ainsi,

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot (v_1^2 - v_2^2); (W) \quad (1.6)$$

De l'équation (1.6), on peut remarquer que la puissance mécanique maximale se produit lorsque  $v_2$  est nulle. Si  $v_2$  est égale à zéro, l'air a été porté à un arrêt complet par le convertisseur, qui n'est pas physiquement possible. Si la vitesse de sortie derrière le convertisseur est zéro, alors la vitesse d'apport doit être zéro, que implique qu'il n'y a pas de débit par le convertisseur. Par conséquent, la puissance mécanique débitée du flux d'air doit être exprimé d'une autre équation. En utilisant la loi de la conservation des impulsions, la force exercée par le vent sur le convertisseur est :

$$F = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2); (N) \quad (1.7)$$

La transmission mécanique extraite est :

$$P_m = F \cdot v' = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \cdot v'; (W) \quad (1.8)$$

En comparant l'équation 1.4 et 1.8 on peut obtenir la relation pour la vitesse du flux  $v'$  :

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2); \left(\frac{m}{s}\right) \quad (1.9)$$

Ainsi la vitesse du flux d'air à travers le convertisseur est égale à la moyenne de  $v_1$  et de  $v_2$ .

La puissance mécanique du convertisseur peut alors être exprimé en tant que:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2); (W) \quad (1.10)$$

Si l'on compare cette puissance mécanique de sortie avec la puissance dans le flux d'air qui circule à travers la même surface transversale de la section  $A$ , le rapport entre la puissance mécanique débitée par le convertisseur et la puissance contenue dans le flux d'air qui traverse la même zone est appelée le "coefficient de puissance"  $C_p$  et peut être représentée comme suit:

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (1.11)$$

Le coefficient de puissance peut également être exprimé en termes de rapport de vitesse  $v_1 / v_2$  :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right| \left| 1 - \frac{v_2}{v_1} \right| \quad (1.12)$$

Si on trace l'équation (2,12) on remarque que la valeur maximale idéale du coefficient de puissance  $C_p$ , donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne se

produit quand  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{1}{3}$  (voir la fig. 1.5), donc le  $C_p$  devient :

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.593$$

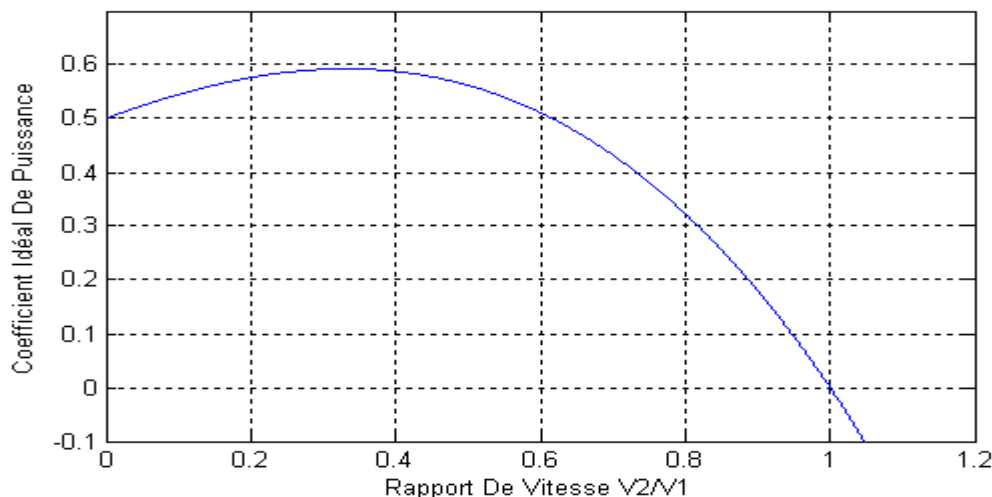


Figure 1.5 Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse du vent

Ceci a été dérivé la première fois par A. Betz, c'est pourquoi on l'appelle le "facteur de Betz" ou "limite de Betz" [1], [10], [11]. Cette valeur est la valeur théorique maximale du coefficient de puissance, donc, l'efficacité théorique maximale qu'un convertisseur d'énergie éolienne peut avoir est 59,3%. Il est bien de mentionner que cette valeur du coefficient de puissance a été obtenue pour un idéal convertisseur de flux sans frottement.

Dans des cas réels, l'éolienne aura toujours un plus petit coefficient maximum de puissance que le facteur de Betz; à cause des pertes aérodynamiques qui dépendent de la conception du rotor et de la construction (nombre de pales, poids, rigidité, etc..). Le coefficient de puissance et l'efficacité d'un système d'éoliennes sont différents. L'efficacité d'une éolienne inclut la perte dans la transmission mécanique, la production d'électricité, les pertes du convertisseur, etc., où le coefficient de puissance est l'efficacité de convertir la puissance du vent en puissance mécanique dans l'arbre du rotor. La figure 1.6 montre un diagramme avec les pertes d'un système de la turbine éolienne [12].

Le coefficient de puissance est généralement donné comme fonction du rapport de vitesse en bout de pale d'hélice  $\lambda$  et l'angle d'attaque de pale  $\beta$ . L'angle d'attaque est l'angle entre le plan de la rotation et l'accord du plan latitudinal de la pale [13]. Le rapport de vitesse en bout d'une éolienne est défini comme :

$$\lambda = \frac{u}{v_1} = \frac{\Omega_1 \cdot R}{v_1} \quad (1.13)$$

Où :  $u$  - la vitesse tangentielle d'attaque de la pale ;  $\Omega_1$  - la vitesse angulaire du rotor ;  $R$  - le rayon du rotor en mètres ;  $v_1$  - la vitesse du vent.

La caractéristique du coefficient de puissance par rapport au rapport de la vitesse en extrémité est présentée par la figure 1.7. Cette caractéristique est un élément principal dans la caractérisation des convertisseurs d'énergie éolienne [14].

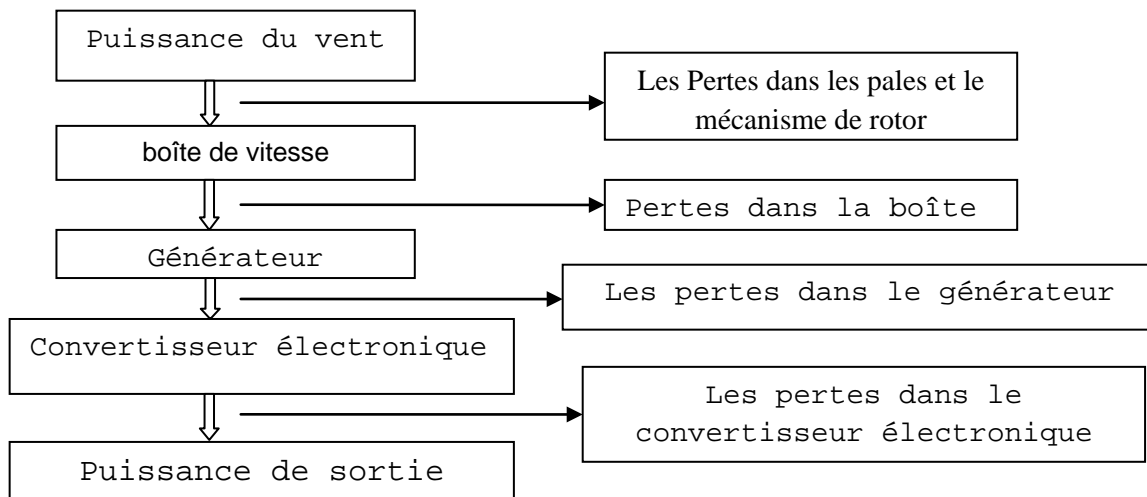


Figure 1.6 Débit de puissance et les pertes

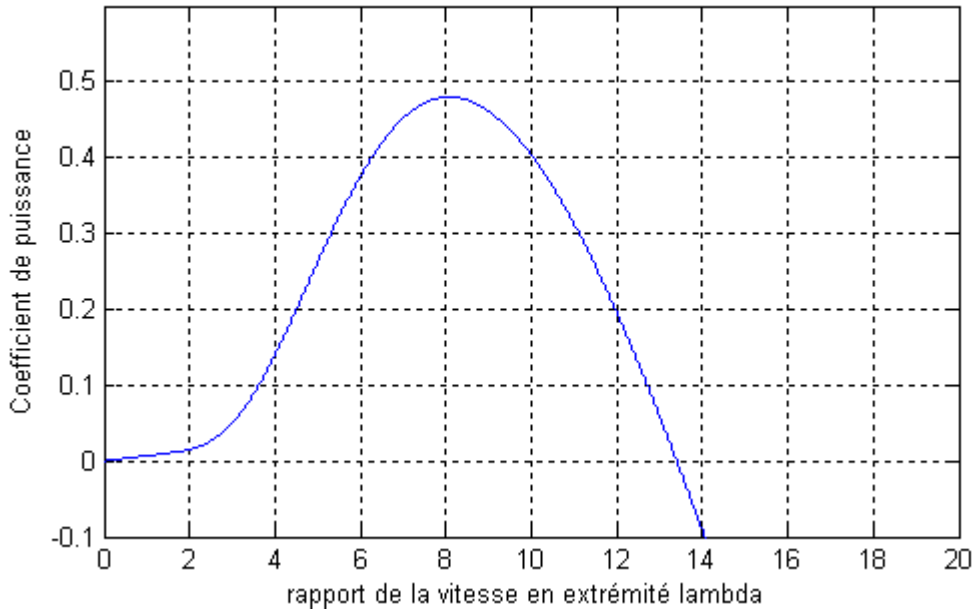


Figure 1.7 Coefficient de puissance  $C_p - \lambda$

### 1.5.2 Caractéristiques de la puissance du rotor

En utilisant le coefficient de puissance, la puissance mécanique sur le rotor peut être calculée comme fonction de la vitesse du vent:

$$P_R = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (1.14)$$

Où:  $A$  - le secteur balayé du rotor ( $m^2$ );  $V_w$  - la vitesse du vent ( $m/s$ );  $C_p$  - le coefficient de puissance du rotor;  $\rho$  - la densité de l'air ( $kg/m^3$ );  $P_R$  - la puissance du rotor ( $W$ ).

Le coefficient de puissance peut être obtenu par des zones d'information ou en rapprochant le coefficient en utilisant la fonction analytique. Dans ce mémoire, la fonction analytique du coefficient de puissance a été employée pour modéliser la turbine de vent comme suit [13]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( C_2 \frac{1}{\Lambda} - C_3 \beta - C_4 \beta^x - C_5 \right) e^{-C_6 \frac{1}{\Lambda}} \quad (1.15)$$

Les coefficients  $C_1 - C_6$  et  $x$  peuvent être différents pour de diverses turbines. Ils dépendent du rotor de l'éolienne et de la conception des lames. Le paramètre  $\frac{1}{\Lambda}$  est défini comme:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^2} \quad (1.16)$$

Pour la simulation les valeurs suivantes étaient choisies pour les coefficients  $C_1 - C_6$  :

$C_1 = 0.5, C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4 = 0, C_5 = 5, C_6 = 21$ . Puisque  $C_4 = 0$ ,  $x$  ne sera pas utilisé.

De l'équation (1.14), la puissance mécanique extraite du vent est une fonction de la vitesse du vent et du coefficient de puissance. Si nous supposons que le vent est constant, la puissance mécanique devient uniquement une fonction du coefficient de puissance. La puissance mécanique peut alors être exprimée comme suit :

$$P_R = C_p \cdot P_0 \quad (1.17)$$

Où :  $P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3$  - valeur constante.

En supposant que la vitesse du vent et l'angle de pas des pales sont constants, le coefficient de puissance devient une fonction de la vitesse du rotor  $\Omega_R$ . Par conséquent, la puissance mécanique peut être exprimé comme :

$$P_R = C_p(\Omega_R) \cdot P_0 \quad (1.18)$$

Donc :

$$P_R(\Omega_R) = \frac{1}{2} \cdot C_p\left(\frac{\Omega_2 \cdot R}{K \cdot V_1}\right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_w^2 \quad (1.19)$$

Avec :

$\Omega_2$  - la vitesse de rotation après multiplicateur ;  $K$  - le rapport du multiplicateur de vitesse.

La figure 1.8 montre la puissance mécanique par rapport à la vitesse du rotor de générateur pour la conception de turbines éoliennes ci-dessus. Il est important de mentionner que chaque conception de turbine de vent aura une puissance différente par rapport au graphique de la vitesse du rotor. En outre, le coefficient de puissance de chaque éolienne sera déterminé conformément à leur conception des lames et l'angle de tangage (fig. 1.9).

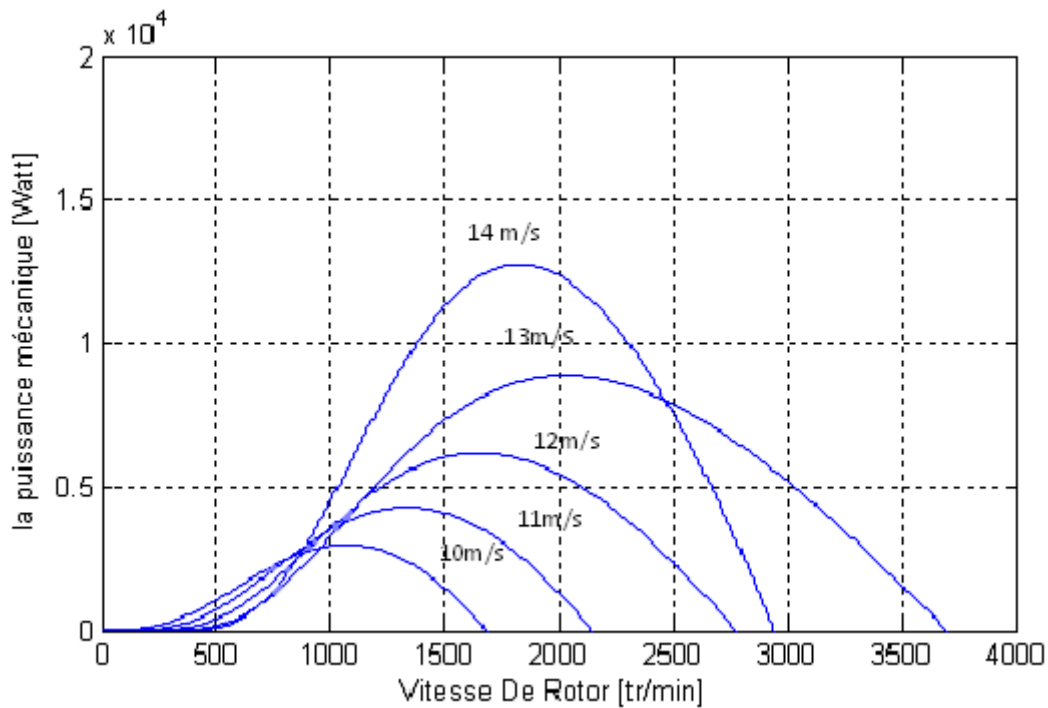


Figure 1.8 Caractéristiques typiques de puissance par rapport à la vitesse d'une éolienne

La puissance extraite du vent est maximisée lorsque  $C_p$  est maximisée. Cette valeur optimale de  $C_p$  se produit pour une valeur définie du rapport de vitesse d'extrémité  $\lambda$ . Pour chaque vitesse du vent il y a une vitesse optimale du rotor, où la puissance maximale est extraite du vent. Par conséquent, si la vitesse du vent est supposée être une constante, la valeur de  $C_p$  dépend de la vitesse du rotor de l'éolienne ainsi, en contrôlant la vitesse du rotor on contrôle la puissance de la sortie de la turbine. En outre, pour chaque vitesse de vent il y'a une vitesse du rotor qui donnera la puissance maximale, rendant le système monotone.

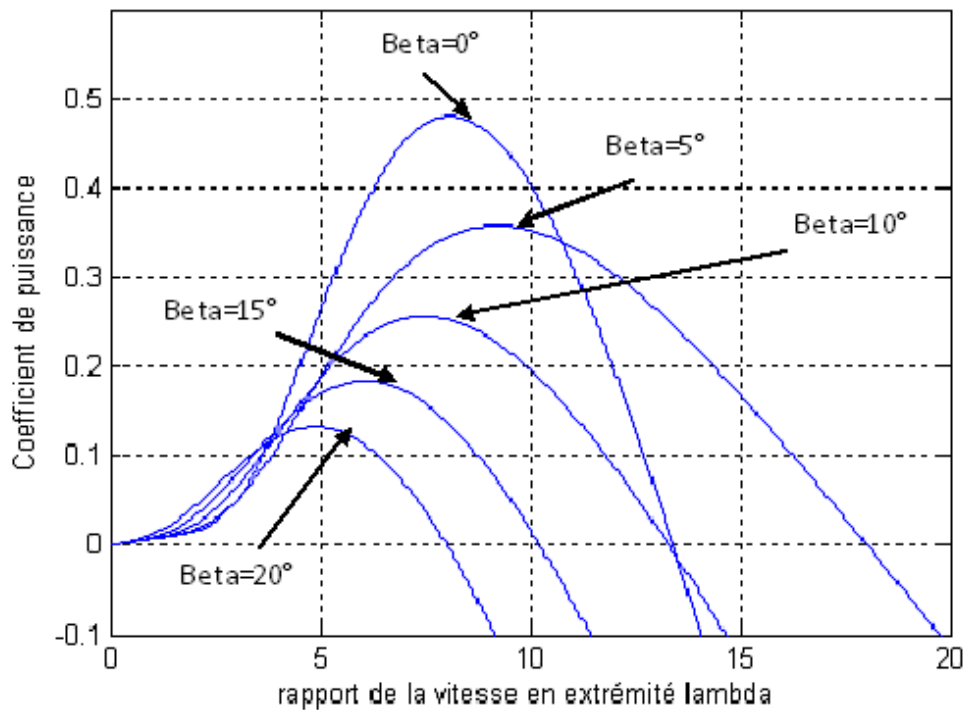


Figure 1.9 Caractéristique  $C_p - \lambda$  des éoliennes pour les différentes valeurs de l'angle de tangage

Il est très important d'étudier les caractéristiques du couple par rapport à la vitesse de rotation d'une turbine à vent. La connaissance des caractéristiques de la turbine éolienne permettra de faire correspondre correctement la charge et faire fonctionner le générateur dans sa région stable.

La caractéristique typique couple - vitesse d'une éolienne moderne à axe horizontal est illustrée dans la figure 1.10 [18] , [21].

Le profil de la courbe couple - vitesse est obtenu de la relation suivante:

$$T_m = \frac{P_R}{\Omega_R} \quad (1.20)$$

Où :  $T_m$  - le couple mécanique dans le rotor ;  $P_R$  et  $\Omega_R$  - la puissance mécanique du rotor et la vitesse angulaire du rotor en conséquence. Comme on peut le voir sur les figures 1.8 et 1.10, le point de la puissance maximale ne correspond pas au point du couple maximal.



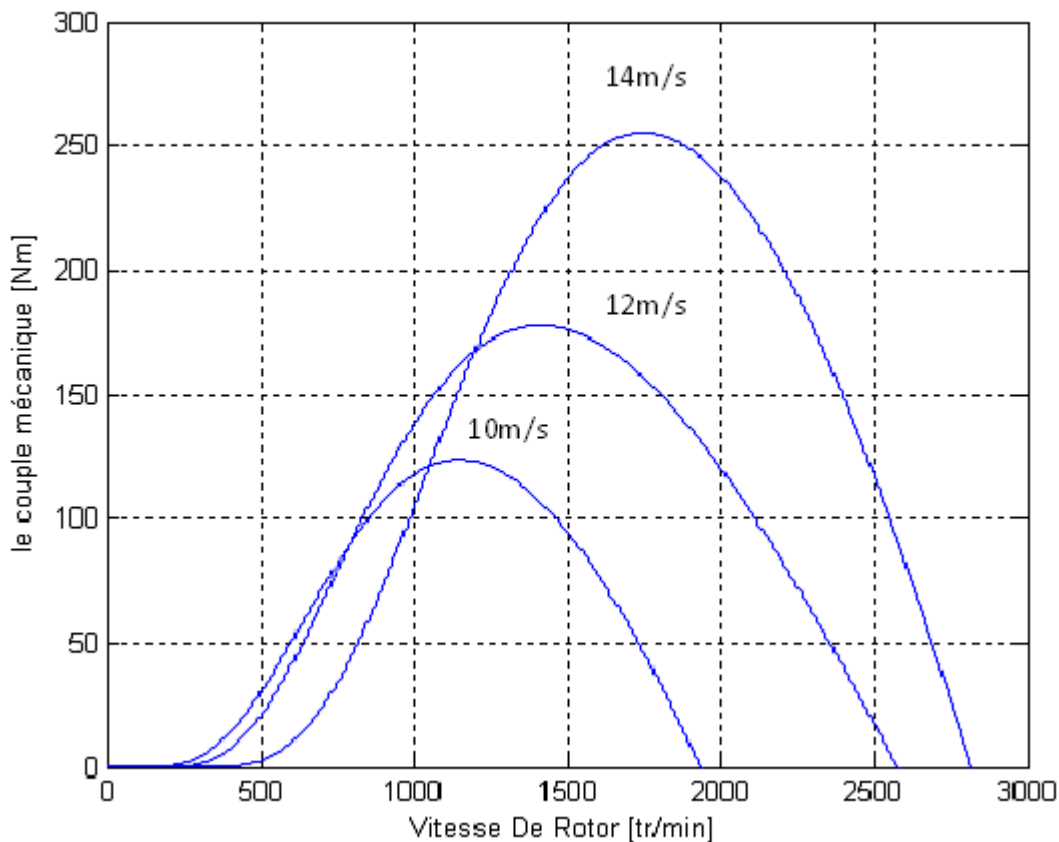


Figure 1.10 Caractéristiques couple-vitesse d'une éolienne pour différentes vitesses de vent

La puissance de sortie est un produit du couple et de la vitesse, c'est pourquoi en contrôlant bien le générateur, les caractéristiques de la charge peuvent être choisies de telle façon pour produire une puissance maximale à toutes les vitesses du vent. Afin de commander la turbine de vent pour rapporter une puissance maximale pour les différentes vitesses de vent, on utilise des circuits de l'électronique de puissance.

## 1.6 Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques.

On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs.

### 1.6.1 Types de machines électriques

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

### 1.6.1.1 Générateur synchrone

C'est le type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (figure 1.11), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (figure 1.12).

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de s'en passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance.

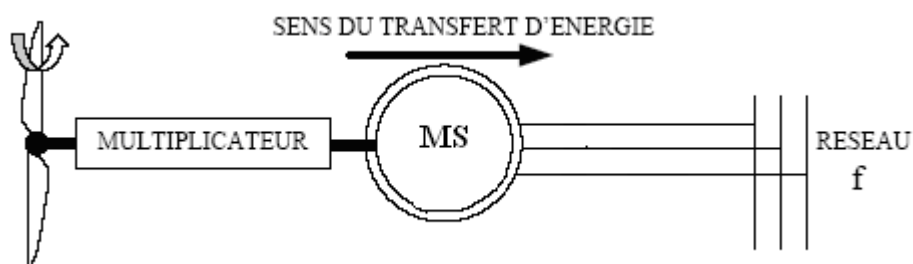


Figure 1.11 Machine synchrone connectée directement au réseau

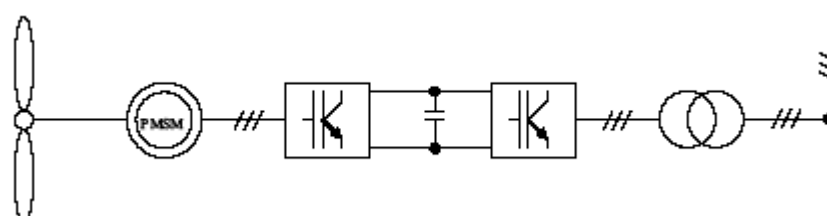


Figure 1.12 Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance

### 1.6.1.2 Générateur asynchrone

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Ceci explique, pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

#### 1.6.1.2.a Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct.

Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

A titre d'exemple, la caractéristique couple - vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure 1.13 [3].

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point  $g=0$ ), dans le cas de la caractéristique suivante (Fig.1.13), la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.

Le dispositif, le plus simple et le plus couramment utilisé, consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (figure 1.14).

La machine à un nombre de paire de pôles fixe doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau ; si

le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance de la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure (1.14), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

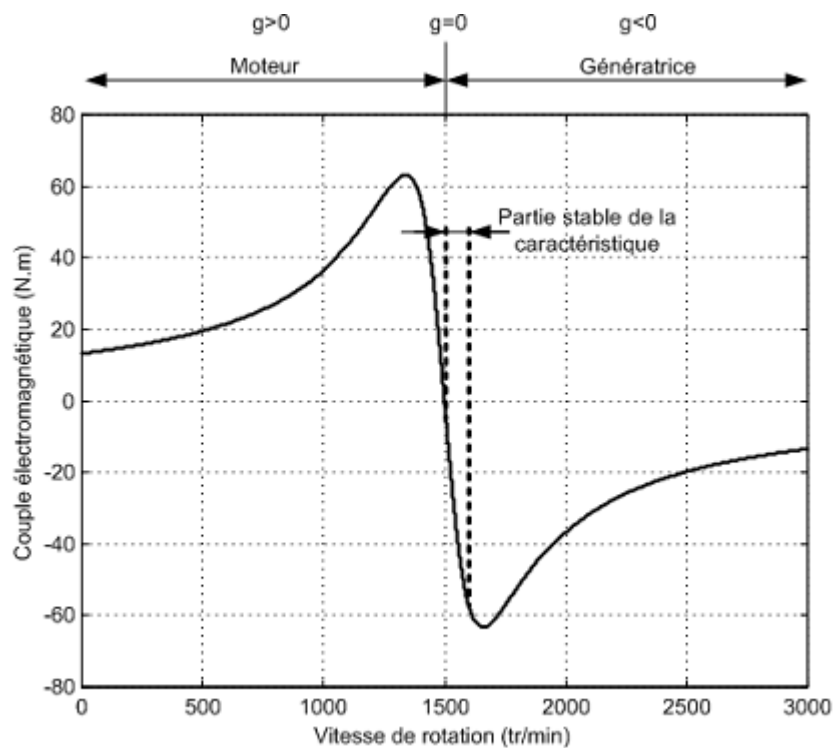


Figure 1.13 Caractéristique couple - vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles [3]

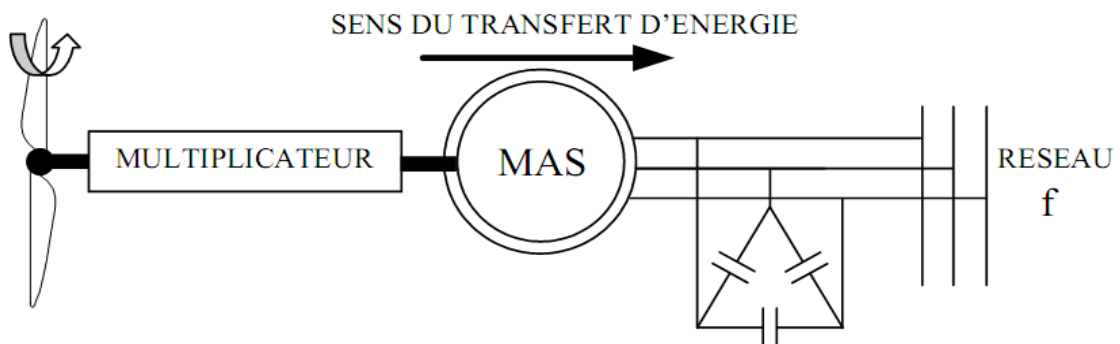


Figure 1.14 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau [3]

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée, car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (figure 1.15).

L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par création d'un bus continu intermédiaire.

Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée.

Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes. Une étude économique approfondie est nécessaire avant d'adopter ce type d'installation.

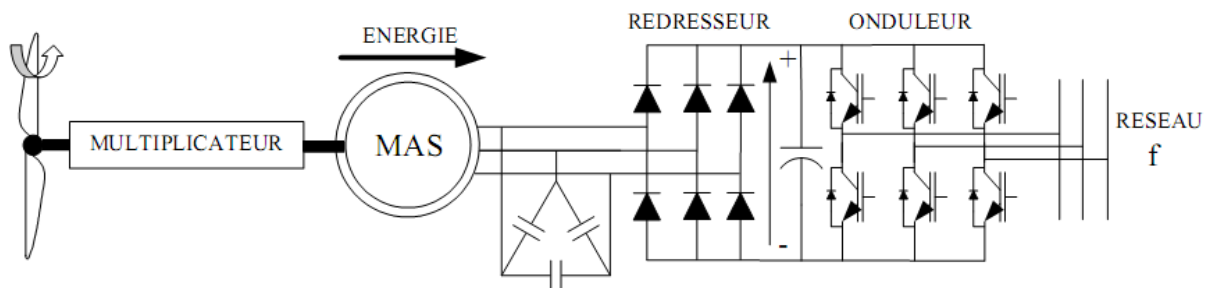


Figure1.15 Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance[3]

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsque elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées.

Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

### 1.6.1.2.b Machine asynchrone à double alimentation

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable.

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur.

A la place du rotor à cage d'écureuil ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement.

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1 MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

#### 1.6.1.2.b.1 Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements.

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure 1.16).

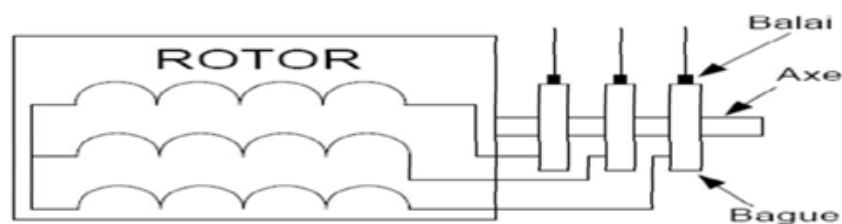


Figure 1.16 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [3]

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse.

Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le

réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage), le rendement de la machine est ainsi amélioré, c'est le principe de la cascade hypo synchrone.

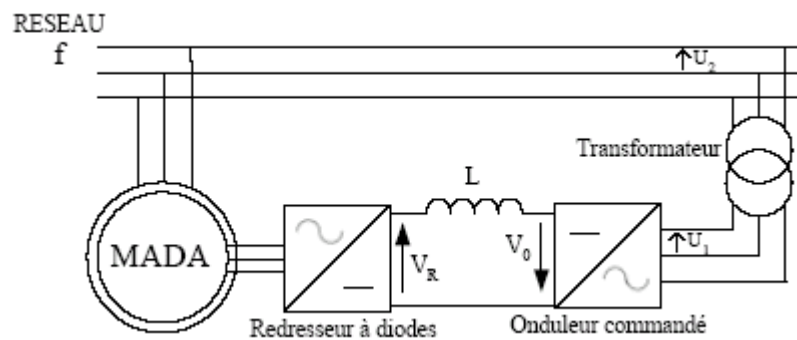


Figure1.17 Cascade hypo synchrone [3]

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

#### 1.6.1.2.b.1.a Double alimentation par le stator

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (figure1.18).

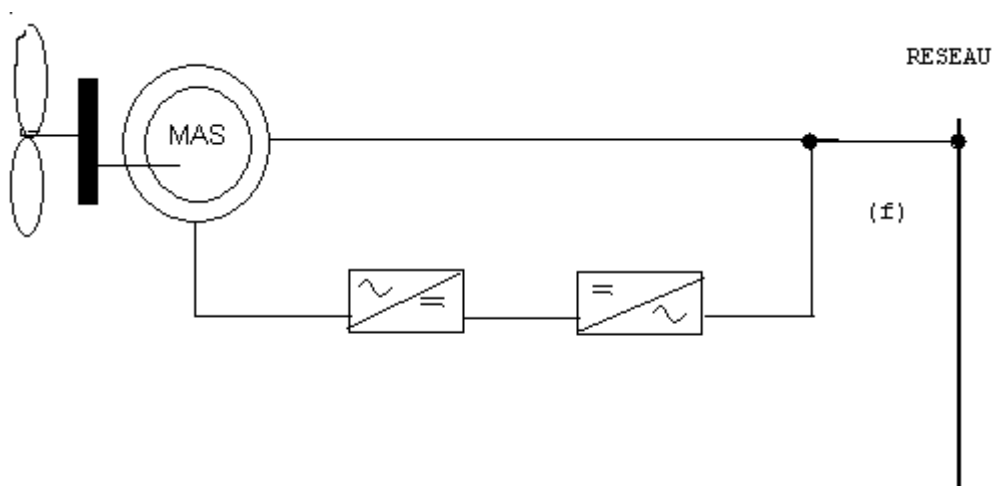


Figure1.18 Machine asynchrone à double bobinage statorique [16]

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation. Ce dernier possède un autre nombre de paire de pôles que celui du premier bobinage. L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une

partie du courant nominal de la génératrice y circule. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs d'électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine; le coût s'en trouve réduit.

Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation permet de contrôler le flux statorique de la machine; le glissement peut être ainsi contrôlé et donc la vitesse de la génératrice. En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également. Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu.

Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive. Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers.

#### 1.6.1.2.b.1.b Double alimentation par le stator et le rotor

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (figure1-19).

Pour expliquer le principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance  $P$  est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie  $(1 - g) \cdot P$  est retrouvée sous forme de puissance mécanique; le reste  $g \cdot P$  sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence  $g \cdot f$ . Ces grandeurs de fréquence variable sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc  $(1 + g) \cdot P$ ; les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (figure1.20). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

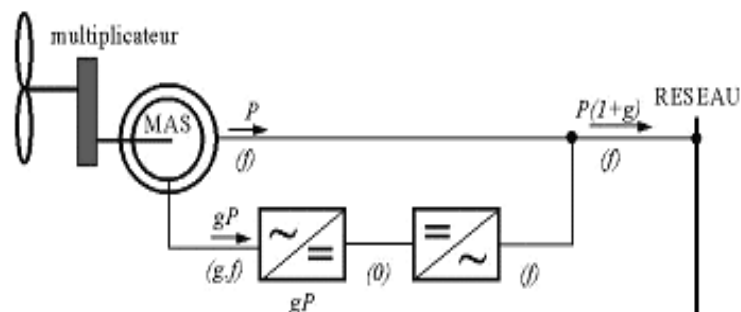


Figure1.19. Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor [16]



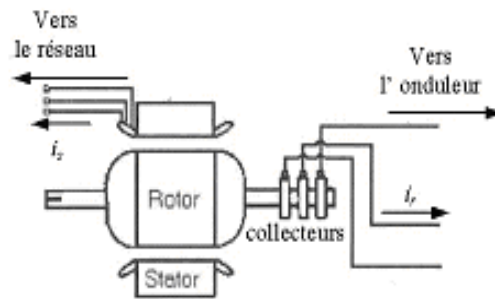


Figure1.20 Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné  
avec des bagues collectrices [17]

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement.

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend de cette configuration.

#### 1.6.1.2.b.2 Applications des machines asynchrones à double alimentation

La première application de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse.

Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé.

Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine.

L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques.

Ce dispositif est par conséquent économique, et contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse.

#### 1.6.1.2.b.3 Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

La figure (1.18) donne la configuration de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au

réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure de Scherbius *PWM*),  $P_{RES}$  - la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau,  $P_S$  - la puissance transitant par le stator,  $P_R$  - la puissance transitant par le rotor, et  $P_{MEC}$  - la puissance mécanique.

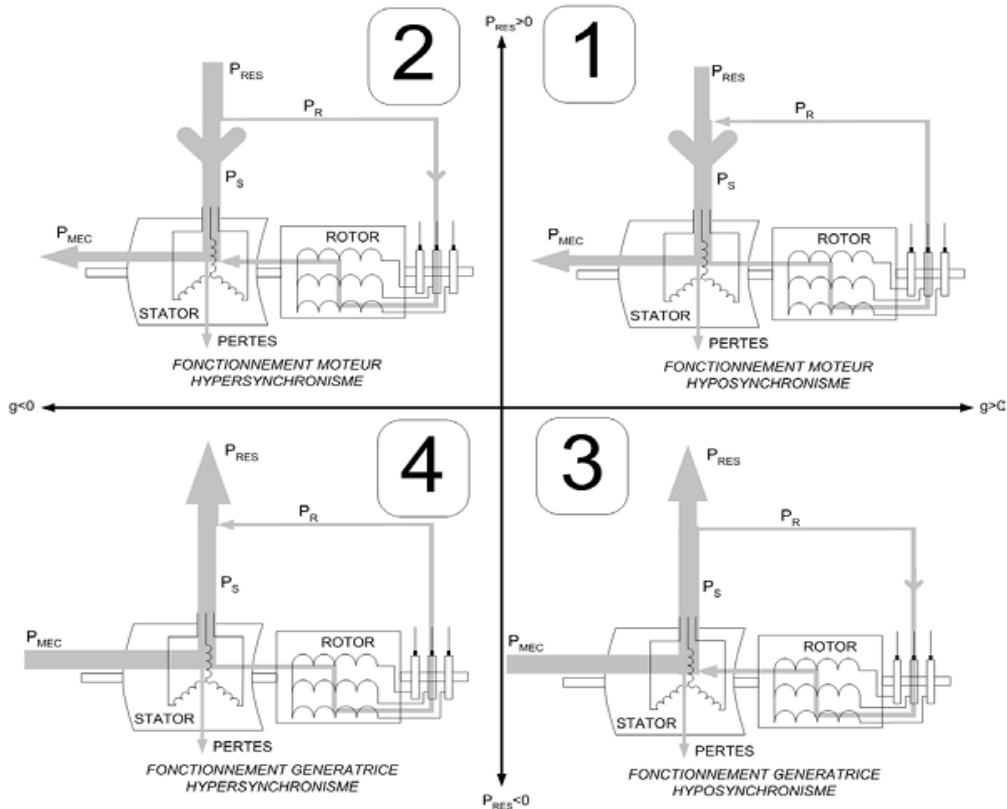


Figure 1.21 Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [3]

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau : c'est la cascade hypo synchrone.

En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et elle est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique.

En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau.

Une partie de cette puissance qui correspond à  $g.P_{MEC}$  est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet, si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas  $\pm 30\%$  en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale ; le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est-à-dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine .

Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbation que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage [3].

#### 1.6.1.2.b.4 Fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique plus simple ;
- plus grande fiabilité ;
- peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne ;
- pas besoin de système électrique de commande ;
- moins cher.

Il existe plusieurs types de génératrices utilisées dans le fonctionnement à vitesse variable représentés par le tableau suivant :

Génératrices utilisées	Caractéristiques
Machine asynchrone autonome	Nécessité de capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine.
Machine asynchrone à cage débitant sur un réseau	Obligation de fonctionner au voisinage du synchronisme.
Machine à double alimentation ou MADA	Autorise le fonctionnement à vitesse variable
Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	Bon rendement, faibles puissances, adaptée aux faibles vitesses mais prix élevé.
Machine à réluctance variable (MRV)	Permettant de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse.

#### **1.6.1.2.b.5 Intérêt de la MADA**

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante.

Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [16].

## **1.7 Conclusion**

Une description de l'énergie éolienne a été présentée dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme : les méthodes de description du gisement éolien ; les exemples d'architectures qu'on a commencé par les différents capteurs (à axe horizontal, vertical), et les caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal ; le rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Les machines électriques, leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien ont été présentées.

A la fin de ce chapitre, on s'est intéressé à la structure de la machine asynchrone à double alimentation, son application et son intérêt.

**Modélisation d'entraînement électromécanique  
multi-masses**

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.

## 2.1 Equations du mouvement

Le mouvement d'un mécanisme est généralement décrit par l'équation de Lagrange (Gérardin, Rixen 1992) :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial W_d}{\partial \dot{q}_i} = Q_i ; L = W_c - W_p \quad (2.1)$$

Où:  $W_c$  - l'énergie cinétique du système ;

$W_p$  - l'énergie potentielle du système ;

$W_d$  - l'énergie dissipée.

Ou encore:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_c}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_p}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_c}{\partial q_i} + \frac{\partial W_p}{\partial q_i} + \frac{\partial W_d}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (2.2)$$

Pour un mouvement de rotation :

$$q_i = \varphi_i, \dot{q}_i = \Omega_i, Q_i = C_i$$

$\varphi_i, \Omega_i$  - respectivement les déplacements et les vitesses angulaires de l'élément  $i$  ;

$C_i$  - le couple appliqué à l'élément  $i$ .

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

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_c}{\partial \Omega_i} \right) - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_p}{\partial \Omega_i} \right) - \frac{\partial W_c}{\partial \varphi_i} + \frac{\partial W_p}{\partial \varphi_i} + \frac{\partial W_d}{\partial \Omega_i} = C_i \quad (2.3)$$

Le nombre d'équations décrivant le système est égal au nombre d'éléments dans le schéma équivalent. Ce nombre peut être réduit par les méthodes de transformation.

Ainsi, les énergies cinétique, potentielle et dissipée respectivement d'une partie mécanique à  $n$  éléments reliés les uns aux autres par  $n - i$  liaisons élastiques sont :

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

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

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

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 [15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_e - k_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} = J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} \\ k_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - k_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23}(\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} = J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ k_{n-2,n-1}(\varphi_{n-2} - \varphi_{n-1}) - k_{n-1,n}(\varphi_{n-1} - \varphi_n) + \beta_{n-2,n-1}(\Omega_{n-2} - \Omega_{n-1}) - \\ \quad \quad \quad - \beta_{n-1,n}(\Omega_{n-1} - \Omega_n) - C_{r,n-1} = J_{n-1} \frac{d\Omega_{n-1}}{dt} \\ k_{n-1,n}(\varphi_{n-1} - \varphi_n) + \beta_{n-1,n}(\Omega_{n-1} - \Omega_n) - C_{r,n} = J_n \frac{d\Omega_n}{dt} \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Où:  $k_{i,i+1}$  - le coefficient (rigidité) entre les éléments  $i$  et  $i + 1$  ;

$\beta_{i,i+1}$  - le coefficient d'amortissement entre les masses  $i$  et  $i + 1$ .



## 2.2 Schéma équivalent à trois masses

Pour un schéma équivalent à trois masses (figure 2.1), les équations du mouvement s'écrivent : [24], [25]

$$\begin{cases} C_e - k_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} = J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} \\ k_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - k_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23}(\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} = J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} \\ k_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + \beta_{23}(\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r3} = J_3 \frac{d\Omega_3}{dt} \end{cases} \quad (2.5)$$

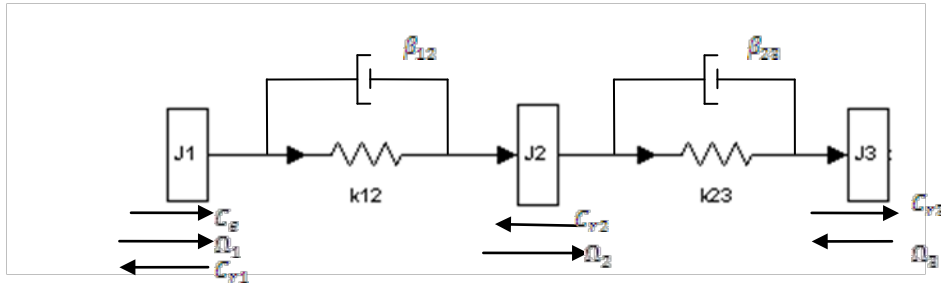


Figure 2.1 Schéma équivalent à trois masses

Les équations du mouvement obtenues précédemment permettent d'analyser à l'aide de diagrammes structuraux la partie mécanique d'un entraînement électrique. En passant dans le domaine de Laplace (c'est à dire en posant  $\frac{d}{dt} = s$ ), le système d'équations (2.2) devient :

$$\begin{cases} C_e - \frac{k_{12}}{s}(\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} = J_1 s \Omega_1 \\ \frac{k_{12}}{s}(\Omega_1 - \Omega_2) - \frac{k_{23}}{s}(\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23}(\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} = J_2 s \Omega_2 \\ \frac{k_{23}}{s}(\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{23}(\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r3} = J_3 s \Omega_3 \end{cases} \quad (2.6)$$

On obtient alors le diagramme structural du système à trois masses (figure 2.2). Le couple moteur  $C$  est la grandeur de commande. Les couples résistants  $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$  et  $C_{r3}$  constituent les perturbations appliquées au système.

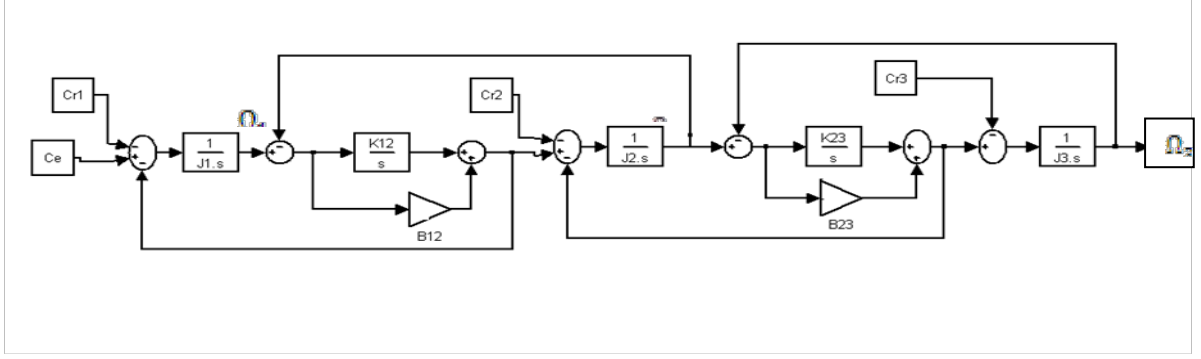


Figure 2.2 Diagramme structurel d'une partie mécanique à trois masses

En procédant à des transformations successives du diagramme structurel, on peut établir les relations entre le couple moteur  $C$  et les vitesses  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  et  $\Omega_3$  des différentes masses et en négliger le facteur d'amortissement. Ces relations se traduisent sous forme de fonctions de transfert,  $W_2(s)$  et  $W_3(s)$  [15].

$$\begin{aligned}
 W_1(s) &= \frac{\Omega_1(s)}{C(s)} \\
 &= \frac{J_2 J_3 s^4 + [k_{23}(J_2 + J_3) + k_{12} J_3] s^2 + k_{12} k_{23}}{s \{ J_1 J_2 J_3 s^4 + [k_{23} J_1 (J_2 + J_3) + k_{12} J_1 (J_1 + J_2)] s^2 + k_{12} k_{23} (J_1 + J_2 + J_3) \}} \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_2(s) &= \frac{\Omega_2(s)}{C(s)} \\
 &= \frac{k_{12} s^2 + k_{12} k_{23}}{s \{ J_1 J_2 J_3 s^4 + [k_{23} J_1 (J_2 + J_3) + k_{12} J_1 (J_1 + J_2)] s^2 + k_{12} k_{23} (J_1 + J_2 + J_3) \}} \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_3(s) &= \frac{\Omega_3(s)}{C(s)} \\
 &= \frac{k_{12} k_{23}}{s \{ J_1 J_2 J_3 s^4 + [k_{23} J_1 (J_2 + J_3) + k_{12} J_1 (J_1 + J_2)] s^2 + k_{12} k_{23} (J_1 + J_2 + J_3) \}} \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

### 2.3 Schéma équivalent à deux masses

Pour un système représenté par un schéma équivalent à deux masses (figure 2.3), les équations fondamentales du mouvement sont:

$$\begin{cases}
 C_e - \frac{k_{12}}{s} (\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} = J_1 s \Omega_1 \\
 \frac{k_{12}}{s} (\Omega_1 - \Omega_2) + \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r2} = J_2 s \Omega_2
 \end{cases} \quad (2.10)$$

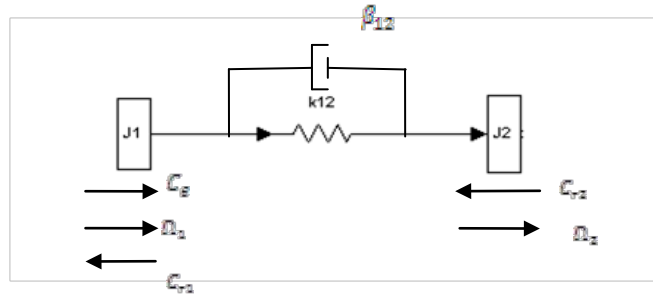


Figure 2.3 Schéma équivalent à deux masses

Les équations (2.10) permettent d'établir le diagramme structurel (figure 2.4) d'une partie mécanique à deux masses. Les fonctions de transfert (2.11) et (2.12) donnent la relation liant le couple moteur  $C$  aux vitesses  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$  des deux masses.

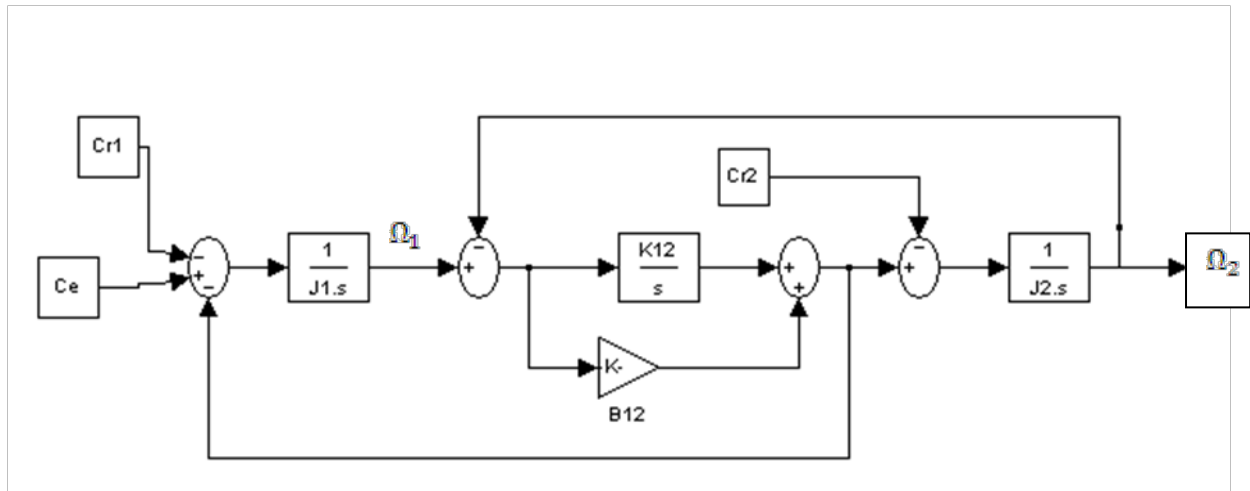


Figure 2.4 Diagramme structurel d'une partie mécanique à deux masses

$$W_1(s) = \frac{\Omega_1(s)}{C(s)} = \frac{J_1 s^2 + k_{12}}{s [J_1 J_2 s^2 + k_{12} (J_1 + J_2)]} \quad (2.11)$$

$$W_2(s) = \frac{\Omega_2(s)}{C(s)} = \frac{k_{12}}{s [J_1 J_2 s^2 + k_{12} (J_1 + J_2)]} \quad (2.12)$$

## 2.4 Schéma équivalent à une masse

Le schéma équivalent à une masse (figure 2.5), est obtenu en référant les masses et moments d'inertie de tous les éléments de la partie mécanique de l'entraînement à un élément préalablement choisi et en supposant les liaisons entre les éléments extrêmement rigides.

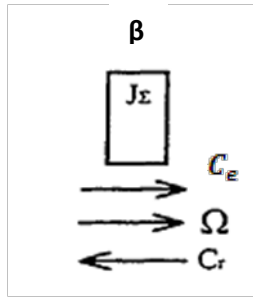


Figure 2.5 Schéma équivalent à une masse

$$C_e - f\Omega_1 - C_r = J_\Sigma s\Omega_1 \quad (2.13)$$

Où :  $J_\Sigma$  - le moment d'inertie total de l'entraînement ;

$C_r$  - le couple résistant total à l'arbre du moteur ;

$f = \beta$  - Coefficient d'amortissement.

Le diagramme structurel (figure 2.6) et la fonction de transfert d'un système à une masse sont obtenus à partir de l'équation (2.13).

$$W(s) = \frac{\Omega(s)}{C(s)} = \frac{1}{J_\Sigma s + f} \quad (2.14)$$

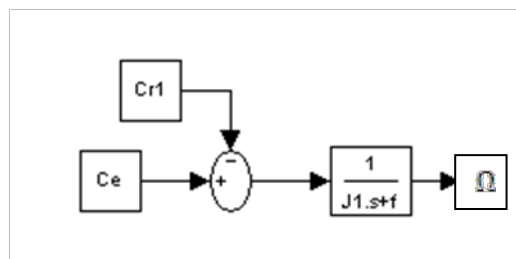


Figure 2.6 Diagramme structurel d'une partie mécanique à une masse

## 2.5 Importance de l'analyse de modèles multi-masses

L'analyse des diagrammes structurels et des fonctions de transfert permet de mieux comprendre les caractéristiques de fonctionnement de la partie mécanique d'un entraînement électrique. L'adoption d'un modèle d'étude dépend non seulement de la complexité de la partie mécanique, mais aussi des informations utiles que l'on désire obtenir sur le fonctionnement de l'entraînement. Par exemple, le modèle à trois masses (figure 2.2) permet d'étudier les vitesses ( $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ ) et les positions ( $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ ) des différents éléments, ainsi que les couples  $C_{12}$  et  $C_{23}$  qui leurs sont appliqués.

En observant les fonctions de transfert (2.7) et (2.12), on voit que les modèles à deux et trois masses constituent des systèmes oscillatoires, donc ils sont caractérisés par des

fréquences de résonance. Les fréquences de résonance correspondent aux valeurs des paramètres du système annulant les dénominateurs (équations caractéristiques) des fonctions de transfert.

Dans le cas du modèle à deux masses, des transformations du diagramme structurel (figure 2.4) permettent d'obtenir les fonctions de transfert qui régissent les relations entre les grandeurs de sortie ( $\Omega_1, \Omega_2$ ) et les grandeurs d'entrée ( $C_e, C_{r1}, C_{r2}$ ), l'équation (2.15) décrit le comportement d'un mécanisme à deux masses, avec le couple résistant  $C_{r2}$  comme grandeur d'entrée et la vitesse  $\Omega_2$  comme grandeur de sortie, en tenant compte du coefficient d'amortissement  $\beta_{12}$  entre les masses 1 et 2 [15].

$$\frac{\Omega_2}{C_{r2}} = \frac{J_1 s^2 + \beta_{12} s + k_{12}}{s[J_1 J_2 s^2 + \beta_{12}(J_1 + J_2)s + k_{12}(J_1 + J_2)]} \quad (2.15)$$

Les valeurs de la fréquence (pôles) qui annulent le dénominateur de la fonction de transfert, définissent les fréquences de résonance mécanique du système d'entraînement.

$$s_{res} = \frac{-\beta_{12}(J_1 + J_2) \pm \sqrt{[\beta_{12}(J_1 + J_2)]^2 - 4J_1 J_2 k_{12}(J_1 + J_2)}}{2J_1 J_2} \quad (2.16)$$

## 2.6 Association moteur électrique

La modélisation de Park est construite à partir des équations électriques des machines [16].

Les hypothèses généralement admises dans le modèle des machines électriques :

- l'absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables)
- L'alimentation est réalisée par un système de tensions triphasées symétriques.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau. En raison de la simplicité de la formulation algébrique.

Ce type d'approche est bien adapté à l'élaboration d'algorithmes de commande.

Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer, [17] :

- L'additivité de flux;
- La constance des inductances propres;
- La constance des résistances statoriques et rotoriques;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

➤ Equation électrique :

La représentation schématique des machines électriques dans l'espace électrique est illustrée sur la figure 2.7.

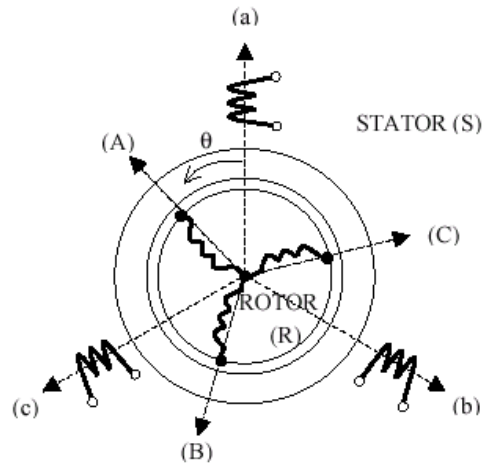


Figure 2.7 définition des repères stator et rotor

Dans le cadre des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée, les équations de la machine s'écrivent comme suit :

Les équations des tensions statoriques :

$$\begin{cases} U_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d}{dt} \Phi_{sa} \\ U_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d}{dt} \Phi_{sb} \\ U_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d}{dt} \Phi_{sc} \end{cases} \quad (2.17)$$

Les équations de tension rotoriques :

$$\begin{cases} U_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d}{dt} \Phi_{ra} \\ U_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d}{dt} \Phi_{rb} \\ U_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d}{dt} \Phi_{rc} \end{cases} \quad (2.18)$$

En désignant par :

$U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}$  - les tensions appliquées aux trois phases statoriques;

$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$  - les courants qui traversent celles-ci;

$\Phi_{sa}$ ,  $\Phi_{sb}$ ,  $\Phi_{sc}$  - les flux totaux à travers ces enroulements;

$R_s$  - résistance statorique ;

$R_r$  - résistance rotorique.

Les équations (2.17) et (2.18) peuvent s'écrire sous forme matricielle :

Pour le stator:

$$[U_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (2.19)$$

Pour le rotor :

$$[U_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \quad (2.20)$$

➤ Equation magnétique :

Les relations entre flux et courants s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_{as} = L_s I_{as} + M_s I_{bs} + M_s I_{cs} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\ \Phi_{bs} = M_s I_{as} + L_s I_{bs} + M_s I_{cs} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\ \Phi_{cs} = M_s I_{as} + M_s I_{bs} + L_s I_{cs} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\begin{cases} \Phi_{ra} = L_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_r I_{rc} + M_{rs} I_{as} + M_{rs} I_{bs} + M_{rs} I_{cs} \\ \Phi_{rb} = M_r I_{ra} + L_r I_{rb} + M_r I_{rc} + M_{rs} I_{as} + M_{rs} I_{bs} + M_{rs} I_{cs} \\ \Phi_{rc} = M_r I_{ra} + M_r I_{rb} + L_r I_{rc} + M_{rs} I_{as} + M_{rs} I_{bs} + M_{rs} I_{cs} \end{cases} \quad (2.22)$$

Sous forme matricielle, on a :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (2.23)$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (2.24)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$[L_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, [L_{rs}] = [L_{sr}]^T$$

Tels que :  $L_s$  - l'inductance propre d'une phase statorique;

$L_r$  - l'inductance propre d'une phase rotorique;

$M_s$  - l'inductance mutuelle entre phases statoriques;

$M_r$  - l'inductance mutuelle entre phases rotoriques;

En désignant par  $L_{sr}$  la mutuelle inductance entre phases statoriques et rotoriques et par  $M_{sr}$  sa valeur lorsque leur axes coïncident [17].

### 2.6.1 Modèle biphasé du moteur

Les types des moteurs électriques utilisés dans les entraînements étant très variés, il est important de trouver une représentation générale permettant de simplifier leur étude. Pour cela, nous avons adopté le modèle de machine généralisée biphasée [18].

Le modèle biphasé est obtenu par une représentation des variables réelles (tension, courant, flux couplé) des enroulements du moteur dans un référentiel  $u - v$  tournant à une vitesse arbitraire  $\omega_k$  par rapport au référentiel immobile  $\alpha - \beta$  relié au stator. Les paramètres du moteur dans le référentiel  $\alpha - \beta$  peuvent être trouvés à l'aide de la transformation directe de PARK : Pour l'établissement du modèle de moteur biphasé, figure 2.8.

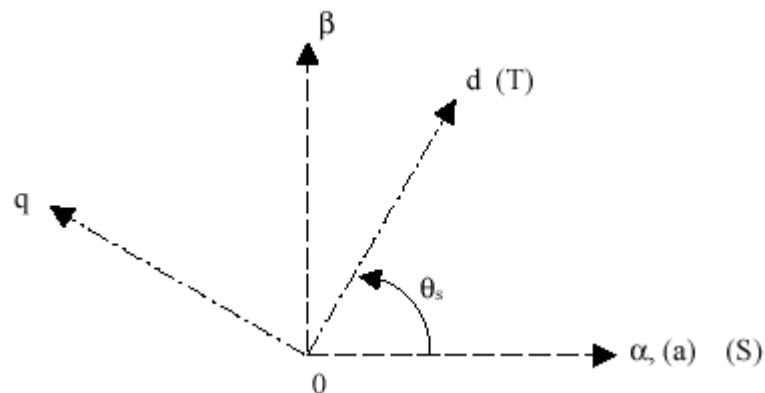


Figure 2.8 Position du système d'axe (d, q)



Les référentiels suivants ont été adoptés :

$\alpha - \beta$  - référentiel immobile relié au stator ;

$d - q$  - référentiel lié au rotor, tournant à la vitesse électrique  $\omega_e = p\Omega$ , ( $p$  - le nombre de paires de pôles,  $\Omega$  - la vitesse mécanique du rotor) ;

$x - y$  - référentiel tournant à la vitesse du champ électrique  $\omega_{0e}$  ;

$u - v$  - référentiel tournant à la vitesse arbitraire  $\omega_k$ , par rapport au stator.

Le système d'équations (2.27) décrit le moteur biphasé dans le référentiel  $u - v$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{su} = R_s i_{su} + \frac{d\psi_{su}}{dt} - \omega_k \psi_{sv} \\ U_{sv} = R_s i_{sv} + \frac{d\psi_{sv}}{dt} + \omega_k \psi_{su} \\ U_{ru} = R_r i_{ru} + \frac{d\psi_{ru}}{dt} + (\omega_k - \omega_e) \psi_{rv} \\ U_{rv} = R_r i_{rv} + \frac{d\psi_{rv}}{dt} + (\omega_k - \omega_e) \psi_{ru} \\ C = pL_{sr} (i_{sv} i_{ru} - i_{su} i_{rv}) \end{array} \right. \quad (2.26)$$

Où :  $R_s$  et  $R_r$  - respectivement les résistances du stator et du rotor ;

$\omega_k = \frac{d\varphi_k}{dt}$  - la vitesse angulaire du système d'axes  $u - v$  ;

$\omega_e = \frac{d\varphi_e}{dt}$  - la vitesse électrique du rotor du moteur ;

$p$  - le nombre de paires de pôles.

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{su} = L_s i_{su} + L_{sr} i_{ru} \\ \psi_{sv} = L_s i_{sv} + L_{sr} i_{rv} \\ \psi_{ru} = L_r i_{ru} + L_{sr} i_{su} \\ \psi_{rv} = L_r i_{rv} + L_{sr} i_{sv} \end{array} \right. \quad (2.27)$$

Où :  $L_s$ ,  $L_r$  - respectivement les inductances propres des enroulements statorique et rotorique ;

$L_{sr}$  - l'inductance mutuelle des bobines du stator et du rotor.

Les équations (2.26) permettent de trouver la représentation du moteur biphasé sous forme de diagramme structurel. Les tensions  $U_{su}$ ,  $U_{sv}$ ,  $U_{ru}$  et  $U_{rv}$  relient le moteur à la source d'alimentation. Le couple électromagnétique  $C$  constitue la grandeur de sortie de la partie électrique du moteur, donc la grandeur de commande de la partie mécanique.

Dans certains cas, l'analyse des régimes dynamiques du moteur peut se simplifier grâce à un choix adéquat de la vitesse de rotation du référentiel  $u - v$ .

Trois cas correspondant à :

$$\omega_k = 0$$

$\omega_k = \omega_e$  et  $\omega_k = \omega_{0e}$  sont généralement utilisés.

➤  $\omega_k = 0 :$

La transformation des variables du moteur se fait par rapport au référentiel immobile  $\alpha - \beta$  relié au stator. Les équations (2.26) deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \\ U_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \\ U_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} - \omega_e \psi_{r\beta} \\ U_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \omega_e \psi_{r\alpha} \\ C = pL_{sr} (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \end{array} \right. \quad (2.28)$$

Ce modèle a servi de base pour l'étude du moteur à courant continu.

$$\blacktriangleright \omega_k = \omega_{0e} :$$

Les variables du moteur sont transformées par rapport au référentiel  $x - y$  tournant à la vitesse du champ électrique.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sx} = R_s i_{sx} + \frac{d\psi_{sx}}{dt} - \omega_{0e} \psi_{sy} \\ U_{sy} = R_s i_{sy} + \frac{d\psi_{sy}}{dt} + \omega_{0e} \psi_{sx} \\ U_{rx} = R_r i_{rx} + \frac{d\psi_{rx}}{dt} - (\omega_{0e} - \omega_e) \psi_{ry} \\ U_{ry} = R_r i_{ry} + \frac{d\psi_{ry}}{dt} - (\omega_{0e} - \omega_e) \psi_{rx} \\ C = pL_{sr} (i_{sy} i_{rx} - i_{sx} i_{ry}) \end{array} \right. \quad (2.29)$$

Ce modèle est généralement utilisé pour la commande des machines alternatives.

$$\text{Sachant que : } \omega_g = \omega_{0e} - \omega_e$$

Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs asynchrones à fréquence variable.

$$\blacktriangleright \omega_k = \omega_e :$$

La transformation des variables du moteur se fait par rapport au référentiel  $d - q$  tournant à la vitesse du rotor.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_k \psi_{sq} \\ U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_k \psi_{sd} \\ U_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} \\ U_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} \\ C = pL_{sr} (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \end{array} \right. \quad (2.30)$$

Ce modèle est généralement utilisé pour la représentation du moteur synchrone.

## 2.6.2 Modèle du moteur à courant continu - charge

Le modèle du moteur à courant continu et à excitation indépendante est déduit du moteur biphasé en supposant que les variables sont exprimées dans le référentiel  $\alpha - \beta$  relié au stator (inducteur du moteur à courant continu).

En posant :  $U_{s\alpha} = 0, U_{s\beta} = U_e, i_{s\alpha} = 0, i_{s\beta} = I_e, i_{r\alpha} = I_a, i_{r\beta} = 0, U_{r\alpha} = U_a, U_{r\beta} = 0,$   
 $R_s = R_e, R_r = R_a, L_s = L_e, L_r = L_a.$

Où :  $U_e$  - la tension d'excitation ;

$I_e$  - le courant d'excitation ;

$I_a$  - le courant d'induit ;

$U_a$  - la tension aux bornes de l'induit ;

$R_e$  - la résistance du circuit d'excitation (inducteur) ;

$R_a$  - la résistance totale du circuit d'induit ;

$L_e$  - l'inductance du circuit d'excitation (inducteur) ;

$L_a$  - l'inductance totale du circuit d'induit.

En tenant compte des relations entre les flux couplés et les courants (2.27), les équations du moteur biphasé (2.26) deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_e = (R_e + sL_e)I_e \\ U_a = (R_a + sL_a)I_a + L_{sr}I_e\omega_e \\ C = pL_{sr}I_eI_a \end{array} \right. \quad (2.31)$$

Le dernier terme de la deuxième équation n'est autre que la tension induite  $e_a$ .

$$e_a = L_{sr}I_e\omega_e = pL_{sr}I_e\Omega = k\phi\Omega \quad (2.32)$$

Où :  $k$  - un paramètre de constriction du moteur.

L'équation du couple s'écrit :

$$C = pL_{sr}I_eI_a = k\phi I_a \quad (2.33)$$

Le système : Moteur à courant continu - Partie mécanique à trois masses : est décrit par le système regroupant les équations (2.6) et (2.31).

$$\left\{ \begin{array}{l} U_e = R_e(1 + s\tau_e)I_e \\ U_a = R_a(1 + s\tau_a)I_a + k\phi(I_e)\Omega_1 \\ k\phi I_a - \frac{k_{12}}{s}(\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} = J_1 s\Omega_1 \\ \frac{k_{12}}{s}(\Omega_1 - \Omega_2) - \frac{k_{23}}{s}(\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23}(\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} = J_2 s\Omega_2 \\ \frac{k_{23}}{s}(\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{23}(\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r3} = J_3 s\Omega_3 \end{array} \right. \quad (2.34)$$

Où :  $\tau_e = \frac{L_e}{R_e}$  - la constante de temps du circuit d'excitation ;

$\tau_a = \frac{L_a}{R_a}$  - la constante électrique du moteur.

Le diagramme structurel du système : Moteur à courant continu - Partie mécanique : obtenu à partir des équations (2.34) est représenté à la figure 2.6.

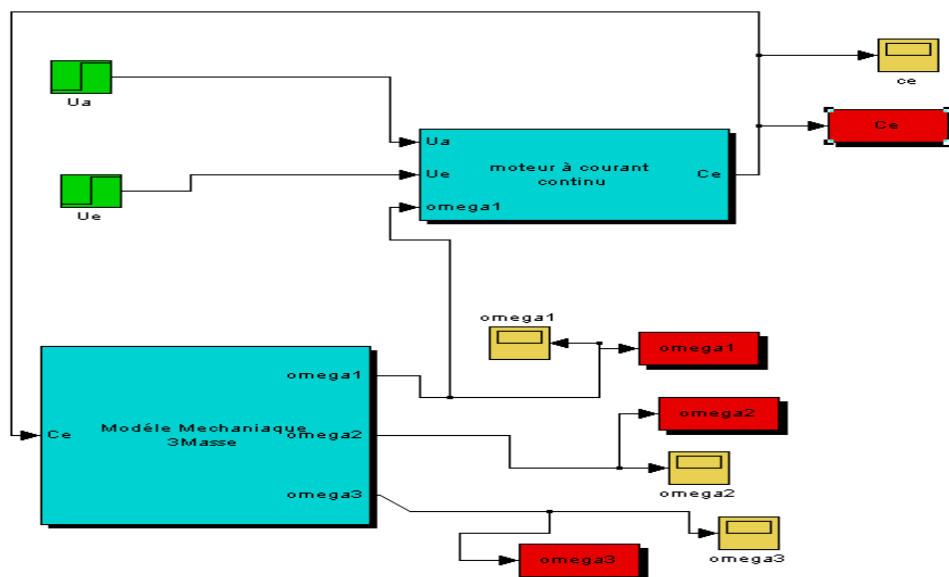


Figure2.6 Diagramme structurel d'un entraînement à trois masses avec un moteur à courant continu

### 2.6.3 Modèle du moteur asynchrone - charge

Les équations du moteur asynchrone à pôles lisses découlent de celles du moteur biphasé en admettant que le référentiel  $x - y$  tourne à la vitesse du champ électrique ( $\omega_k = \omega_{0e}$ ).

Le rotor étant fermé sur lui-même, on pose  $U_{rx} = U_{ry} = 0$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sx} = R_s i_{sx} + \frac{d\psi_{sx}}{dt} - \omega_{0e} \psi_{sy} \\ U_{sy} = R_s i_{sy} + \frac{d\psi_{sy}}{dt} + \omega_{0e} \psi_{sx} \\ U_{rx} = R_r i_{rx} + \frac{d\psi_{rx}}{dt} - (\omega_{0e} - \omega_e) \psi_{ry} \\ U_{ry} = R_r i_{ry} + \frac{d\psi_{ry}}{dt} - (\omega_{0e} - \omega_e) \psi_{rx} \\ C = pL_{sr} (i_{sy} i_{rx} - i_{sx} i_{ry}) \end{array} \right. \quad (2.36)$$

Les expressions des flux couplés sous forme vectorielle étant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_s = L_s i_s + L_{sr} i_r \\ \psi_r = L_r i_r + L_{sr} i_s \end{array} \right. \quad (2.37)$$

On peut écrire les courants statorique et rotorique comme :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_s = \frac{L_s \psi_s - L_{sr} \psi_r}{L_s L_r - L_{sr}^2} \\ i_r = \frac{L_r \psi_r - L_{sr} \psi_s}{L_s L_r - L_{sr}^2} \end{array} \right. \quad (2.38)$$

On trouve le système d'équations décrivant l'entraînement électrique à moteur asynchrone avec une partie mécanique à trois masses :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 s\psi_{sx} = U_{sx} - R_s I_{sx} + \omega_{0e} \psi_{sy} \\
 s\psi_{sy} = U_{sy} - R_s I_{sy} - \omega_{0e} \psi_{sx} \\
 s\psi_{rx} = -R_r I_{rx} + (\omega_{0e} - \omega_e) \psi_{ry} \\
 s\psi_{ry} = -R_r I_{ry} - (\omega_{0e} - \omega_e) \psi_{rx} \\
 pL_{sr} (I_{sy} I_{rx} - I_{sx} I_{ry}) - \frac{k_{12}}{s} (\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} = J_1 s \Omega_1 \\
 \frac{k_{12}}{s} (\Omega_1 - \Omega_2) - \frac{k_{23}}{s} (\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23} (\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} = J_2 s \Omega_2 \\
 \frac{k_{23}}{s} (\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{23} (\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r3} = J_3 s \Omega_3
 \end{array} \right. \quad (2.39)$$

Ces équations se traduisent sous la forme du diagramme structurel présenté à la figure 2.6.

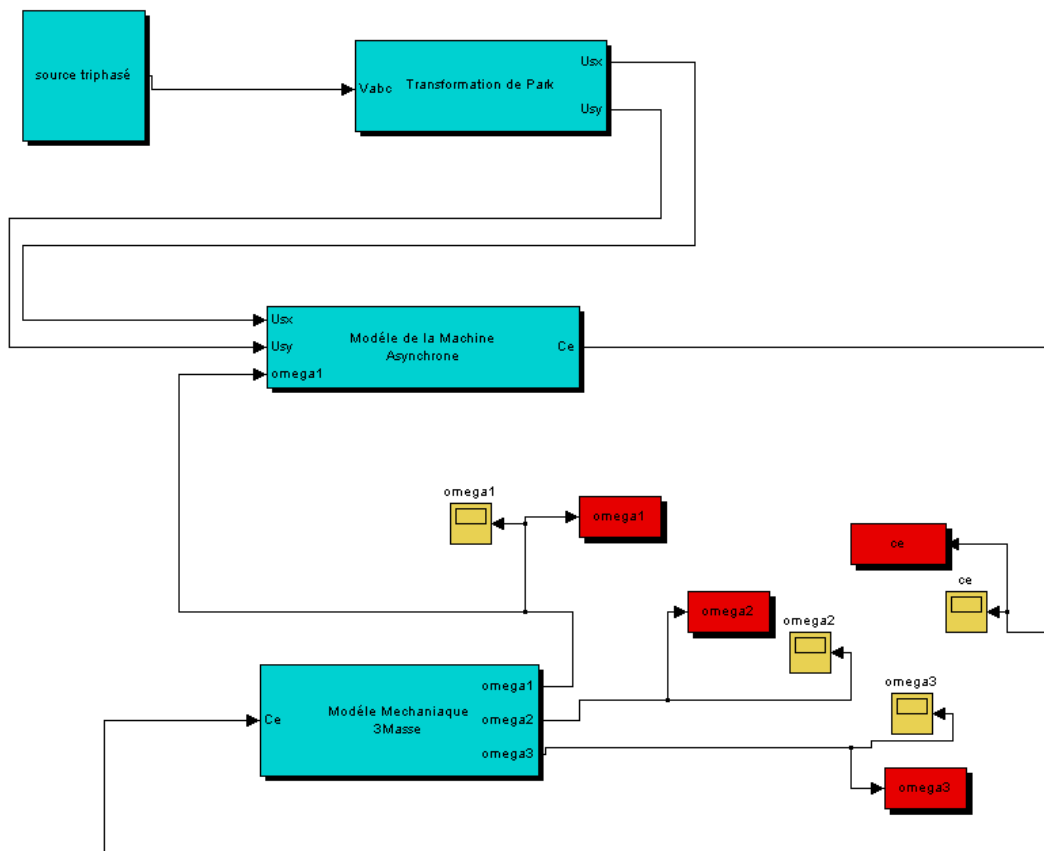


Figure 2. 6 Diagramme structurel d'un entraînement à trois masses avec un moteur asynchrone

## 2.6.4 Modèle du moteur asynchrone double alimenté - charge

Les équations du moteur asynchrone double alimenté découlent de celles du moteur biphasé en admettant que le référentiel  $x - y$  tourne à la vitesse du champ électrique ( $\omega_k = \omega_{0e}$ ).

Le rotor étant alimenté par une source triphasée, donc  $U_{rx} \neq U_{ry} \neq 0$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sx} = R_s i_{sx} + \frac{d\psi_{sx}}{dt} - \omega_{0e} \psi_{sy} \\ U_{sy} = R_s i_{sy} + \frac{d\psi_{sy}}{dt} + \omega_{0e} \psi_{sx} \\ U_{rx} = R_r i_{rx} + \frac{d\psi_{rx}}{dt} - (\omega_{0e} - \omega_e) \psi_{ry} \\ U_{ry} = R_r i_{ry} + \frac{d\psi_{ry}}{dt} - (\omega_{0e} - \omega_e) \psi_{rx} \\ C = pL_{sr} (i_{sy} i_{rx} - i_{sx} i_{ry}) \end{array} \right. \quad (2.40)$$

Les expressions des flux couplés sous forme vectorielle étant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_s = L_s i_s + L_{sr} i_r \\ \psi_r = L_r i_r + L_{sr} i_s \end{array} \right. \quad (2.41)$$

On peut écrire les courants statorique et rotorique comme :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_s = \frac{L_r \psi_s - L_{sr} \psi_r}{L_s L_r - L_{sr}^2} \\ i_r = \frac{L_s \psi_r - L_{sr} \psi_s}{L_s L_r - L_{sr}^2} \end{array} \right. \quad (2.42)$$



On trouve le système d'équations décrivant l'entraînement électrique à moteur asynchrone double alimenté avec une partie mécanique à trois masses.

$$\left\{ \begin{array}{l} s\psi_{sx} = U_{sx} - R_s I_{sx} + \omega_{0e} \psi_{sy} \\ s\psi_{sy} = U_{sy} - R_s I_{sy} - \omega_{0e} \psi_{sx} \\ s\psi_{rx} = U_{rx} - R_r I_{rx} + (\omega_{0e} - \omega_e) \psi_{ry} \\ s\psi_{ry} = U_{ry} - R_r I_{ry} - (\omega_{0e} - \omega_e) \psi_{rx} \\ pL_{sr} (I_{sy} I_{rx} - I_{sx} I_{ry}) - \frac{k_{12}}{s} (\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} = J_1 s \Omega_1 \\ \frac{k_{12}}{s} (\Omega_1 - \Omega_2) - \frac{k_{23}}{s} (\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23} (\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} = J_2 s \Omega_2 \\ \frac{k_{23}}{s} (\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{23} (\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r3} = J_3 s \Omega_3 \end{array} \right. \quad (2.43)$$

Ces équations se traduisent sous la forme du diagramme structurel présenté à la figure 2.7.

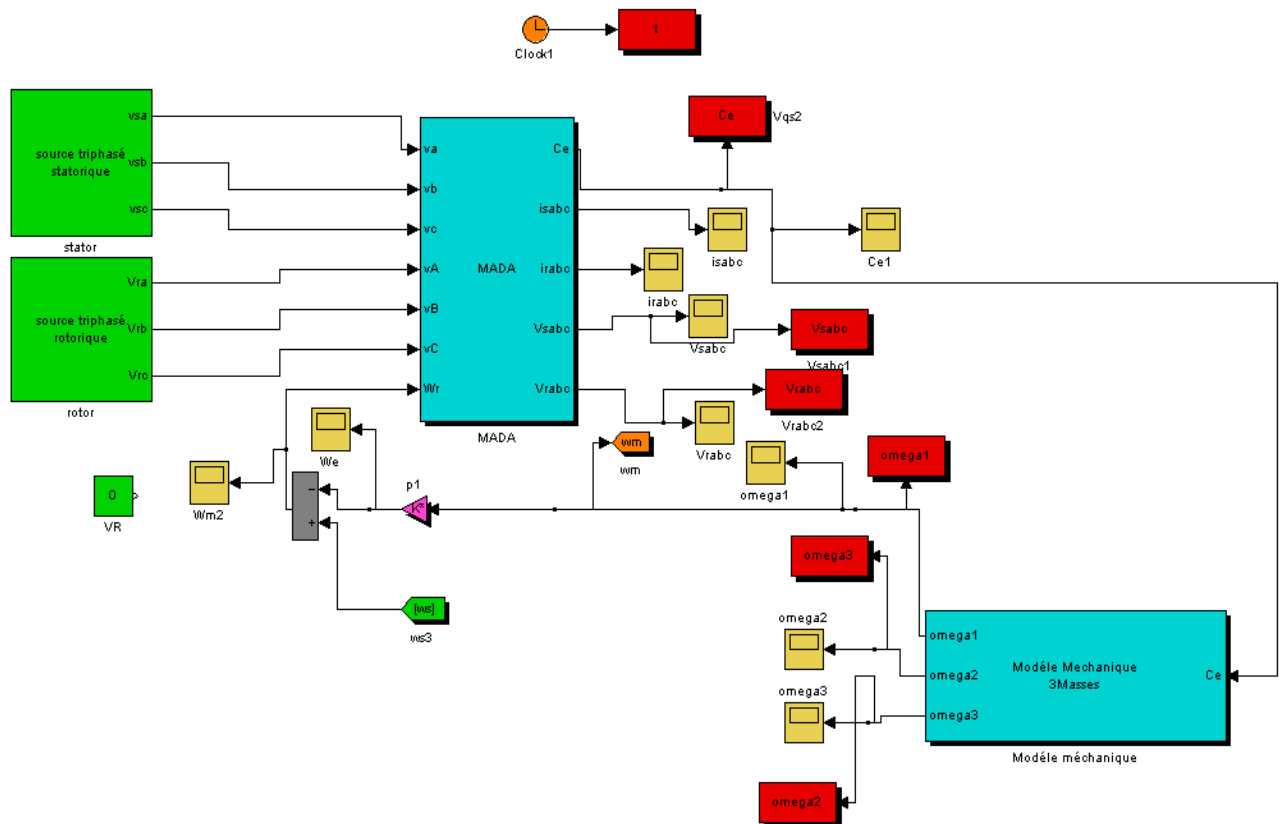


Figure 2. 7 Diagramme structurel d'un entraînement à trois masses avec un moteur asynchrone double alimenté

## **2.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a d'abord modélisé l'équation fondamentale du mouvement de la partie mécanique du système éolien qui est décrite généralement par l'équation de Lagrange.

L'adoption de ce modèle mathématique de la partie mécanique permet d'étudier les vitesses et les positions des différents éléments, ainsi que les couples.

On a modélisé et étudié les équations électriques des différentes machines, généralement utilisées dans les éoliennes ; et on a effectué également une association de la partie mécanique d'une part et du moteur électrique de l'autre part.

**Simulation d'entraînement électromécanique  
multi-masses**

Après la modélisation d'entraînement électromécanique multi-masse des machines électriques dans le chapitre 2, on effectue une validation du module à l'aide du logiciel MATLAB.

La simulation par MATLAB est un moyen efficace et économique pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes.

### 3.1 Simulation du moteur à c.c. à partir du modèle de trois masses

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

Les paramètres électriques et mécaniques de l'entraînement du moteur à c.c. sont donnés par :

$$R_a = 0.18 \text{ Ohm}, R_e = 3.5 \text{ Ohm}, L_{ea} = 0.1 \text{ H}, L_a = 0.0062 \text{ H}, L_e = 0.0095 \text{ H},$$

$$J = 0.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 ;$$

$$\beta_{i,i+1} = 0.007 \text{ Nms/rad}, k_{i,i+1} = 20 \text{ Nm/rad}, (i = 1,2) \text{ et } p = 3 ;$$

Les valeurs de couple de charge minimale et maximale sont respectivement :

$$C_{r_{\min}} = \sum C_{ri} = 0 \text{ Nm} ; C_{r_{\max}} = \sum C_{ri} = 10 \text{ Nm} ;$$

La contribution d'inertie du moteur dans l'inertie totale du système dépend du type d'entraînement. On attribue 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.

Le modèle tel que développé sous Matlab-Simulink est présenté à la figure 2.6 –chapitre2.

Tout en utilisant les données numériques présentées, on considère dans un premier temps un couple de charge  $C_{r3}$  nul, quant aux couples résistants  $C_{r1}$  et  $C_{r2}$  dus aux frottements, on les considère négligeables donc nuls tout le long de l'étude. D'abord, les résultats de simulation présentés à la figure 3.1 mettent en valeur la situation de démarrage du moteur à courant continu sans système de commande à vitesse variable.

Quoiqu'on va présenter quelques fois à titre indicatif l'état au démarrage de la machine électrique, on va ignorer dans cette étude cette situation qui devrait être traitée pratiquement par des systèmes de commande adaptés, et ce pour qu'on penche 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.

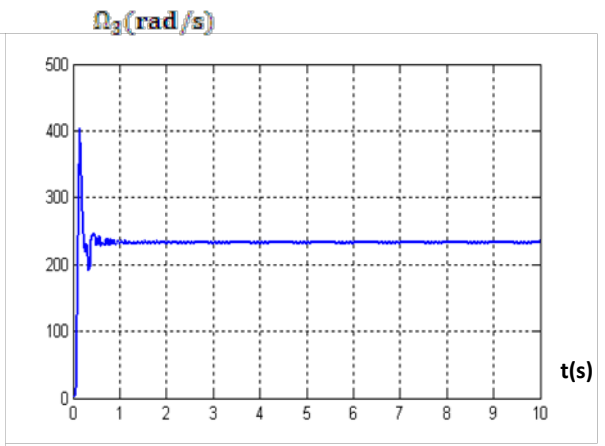
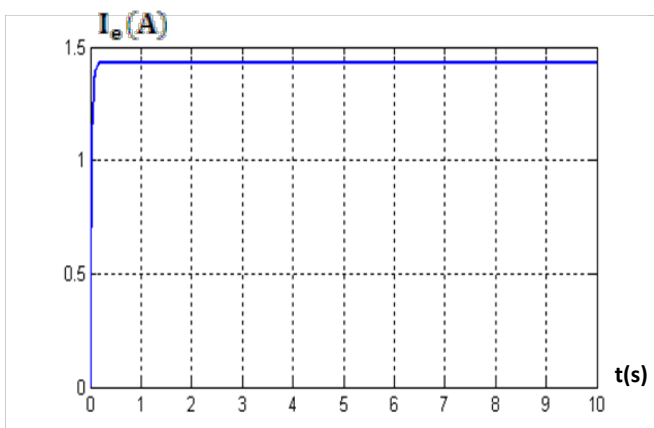
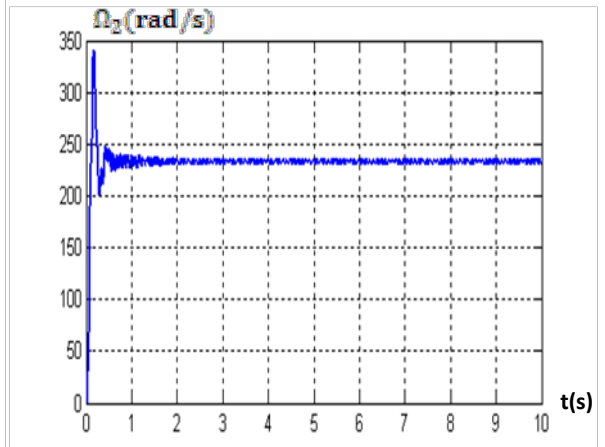
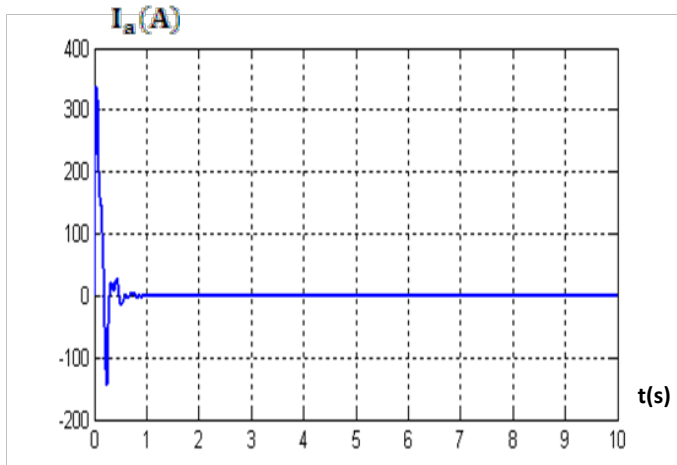
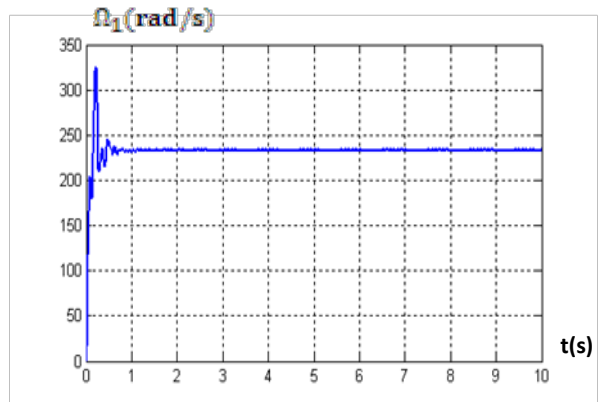
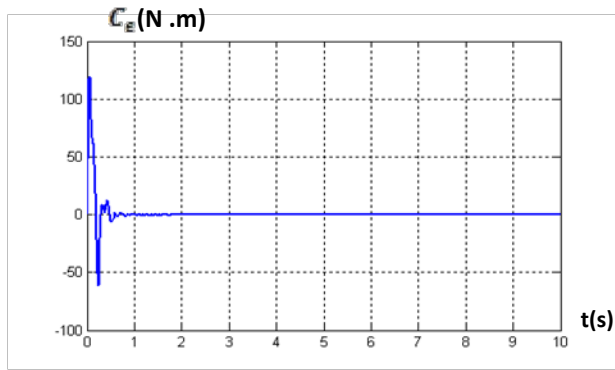


Figure 3.1 Courbes au démarrage, du couple électromagnétique, du courant d'induit, du courant d'excitation et des vitesses des trois masses (Machine à c.c./ Matlab-Simulink)

On applique dans une seconde étape une variation de type échelon du couple de charge au niveau de la troisième masse  $\Delta C_{r_3} = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$  à l'instant  $t = 2 \text{ s}$ . La figure 3.2 représente les résultats de simulation de ce premier cas. Les différents cas qui suivront cette première application seront analysés autour de cette variation.

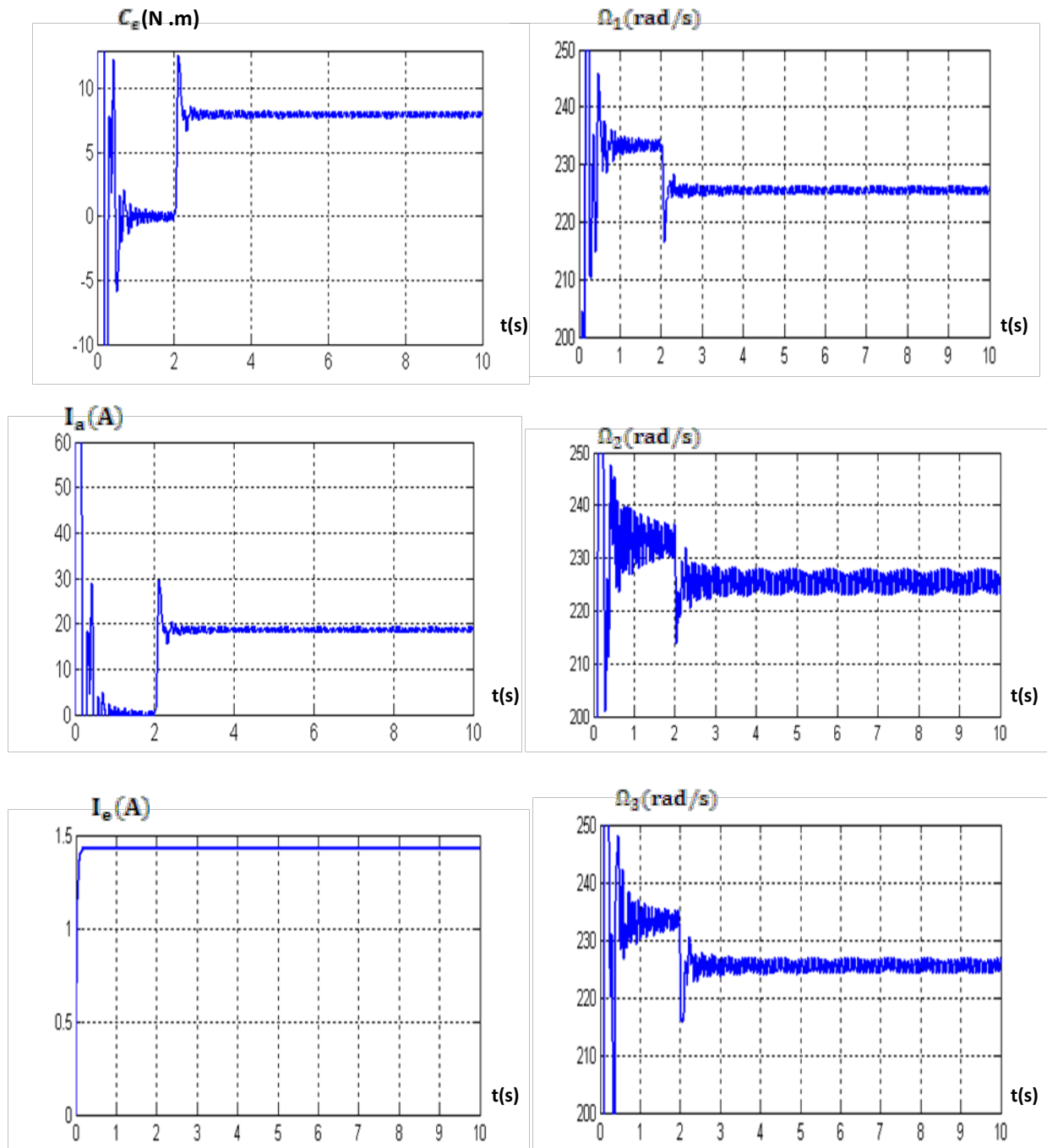


Figure 3.2 Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation du couple de charge  $\Delta C_{r_3} = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$  à  $t = 2 \text{ s}$  (Machine à c.c./ Matlab-Simulink)

Dans ce qui suit, on fait 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 on n'a 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 qui suppose que les liaisons sont parfaitement rigides. Par ailleurs, on remarque d'après la figure 3.3, et c'est ce qu'on veut démontrer via cette application, que plus le coefficient de rigidité  $k_{23}$  est important, mieux les oscillations sont amorties.



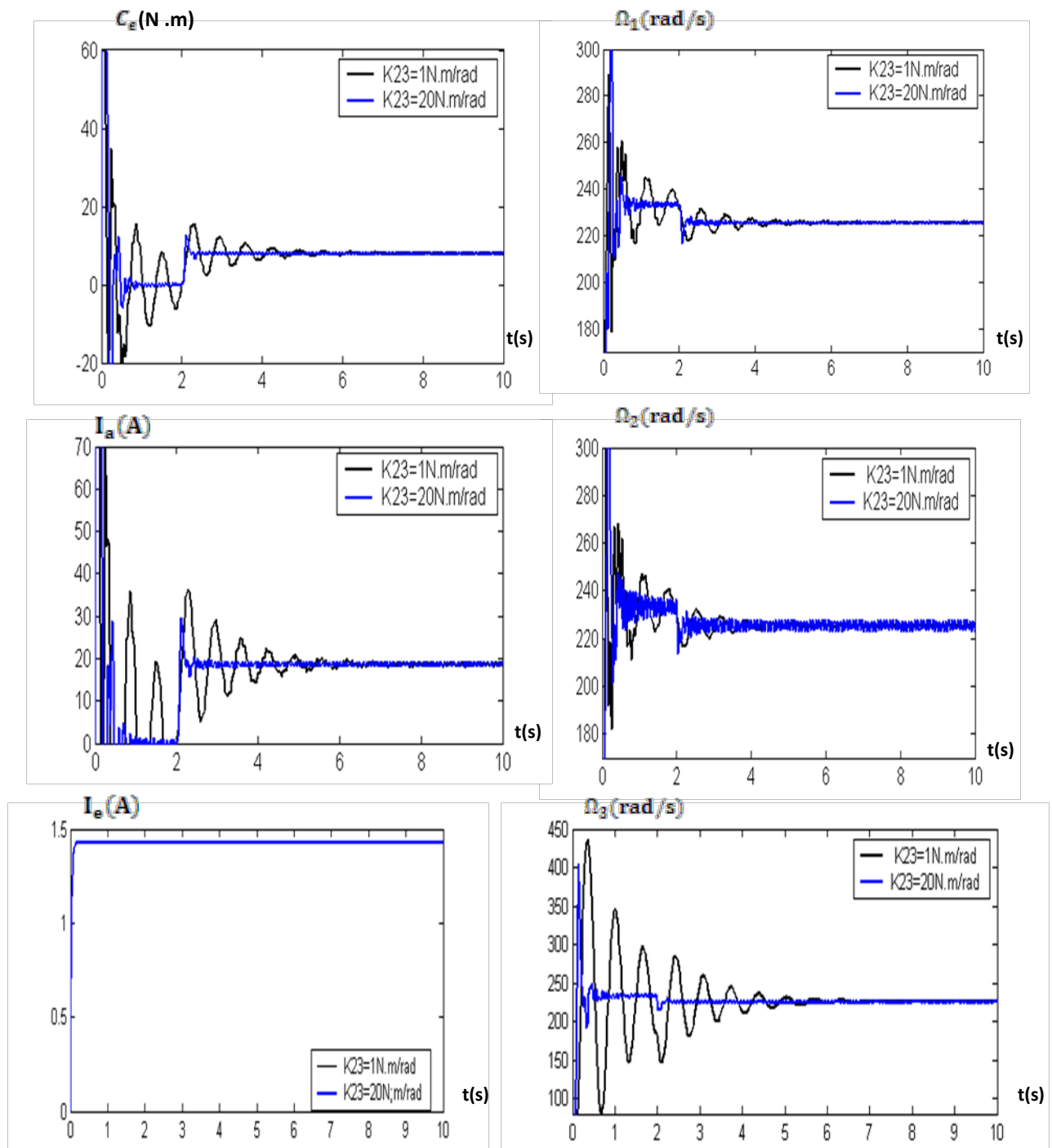


Figure 3.3 Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation  $\Delta C_{r_3} = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$  à  $t = 2 \text{ s}$ , pour différentes valeurs du coefficient de rigidité  $k_{23}$  (Machine à c.c./ Matlab-Simulink)

On fait 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. On remarque d'après la figure 3.4 que lorsque le moment d'inertie de la partie mécanique devient important par rapport à celui du moteur, les oscillations sont mieux amorties.

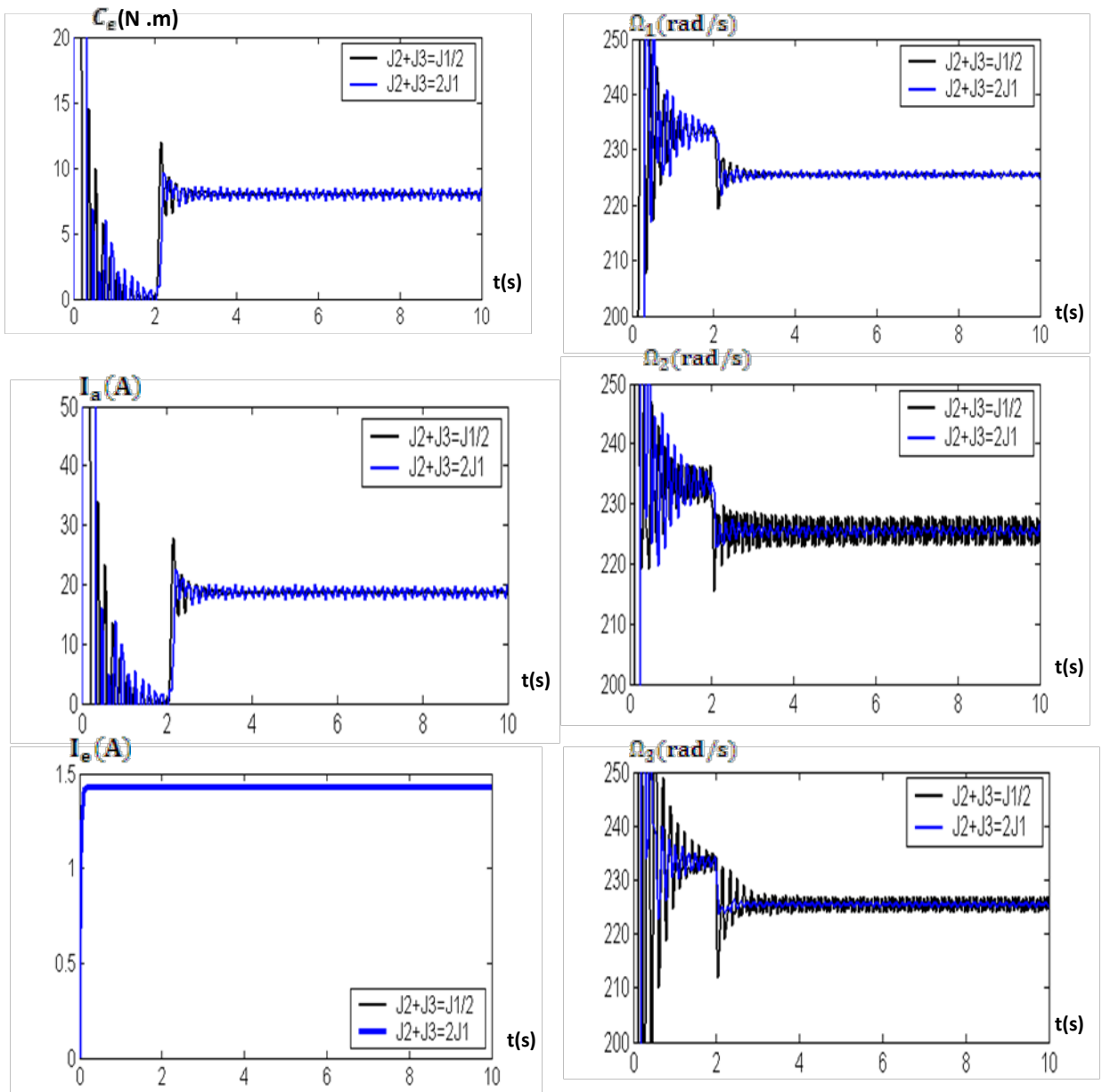


Figure 3.4 Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, et des courants d'induit et d'excitation, suite à une variation  $\Delta C_{r3} = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$  à  $t = 2 \text{ s}$ , pour différentes valeurs du moment d'inertie  $[J_2 + J_3]$  (Machine à c.c./ Matlab-Simulink)

### 3.2 Simulation de la machine asynchrone à partir du modèle de trois masses

On prend un moteur asynchrone de puissance de  $2.2 \text{ kW}$  avec une tension et un courant nominaux de  $120 \text{ V}$  et  $12 \text{ A}$ , et un couple nominal  $C_n = 12 \text{ N.m}$ .

Les paramètres électriques et mécaniques de l'entraînement du moteur asynchrone sont donnés comme suit :  $R_s = 0.6 \text{ Ohm}$ ,  $R_r = 0.4 \text{ Ohm}$ ,  $L_{sr} = 0.059 \text{ H}$ ,  $L_s = 0.061 \text{ H}$  et  $L_r = 0.061 \text{ H}$ ,  $J = 0.0175 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $\beta_{i,i+1} = 0.001 \text{ Nms/rad}$ ,  $k_{i,i+1} = 20 \text{ Nm/rad}$ , ( $i = 1,2$ ) 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 on va étudier d'autres cas pour analyser l'effet du moment d'inertie sur la réponse du système.

On considère dans un premier temps un couple de charge  $C_{r3}$  nul, quant aux couples résistants  $C_{r1}$  et  $C_{r2}$  dus aux frottements, on les considère négligeables donc nuls tout le long de l'étude. D'abord, les résultats de simulation présentés à la figure 3.5 mettent en valeur l'état de démarrage du moteur asynchrone sans système de commande à vitesse variable, situation qu'on présente à titre indicatif mais qu'on va ignorer pour qu'on penche 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.

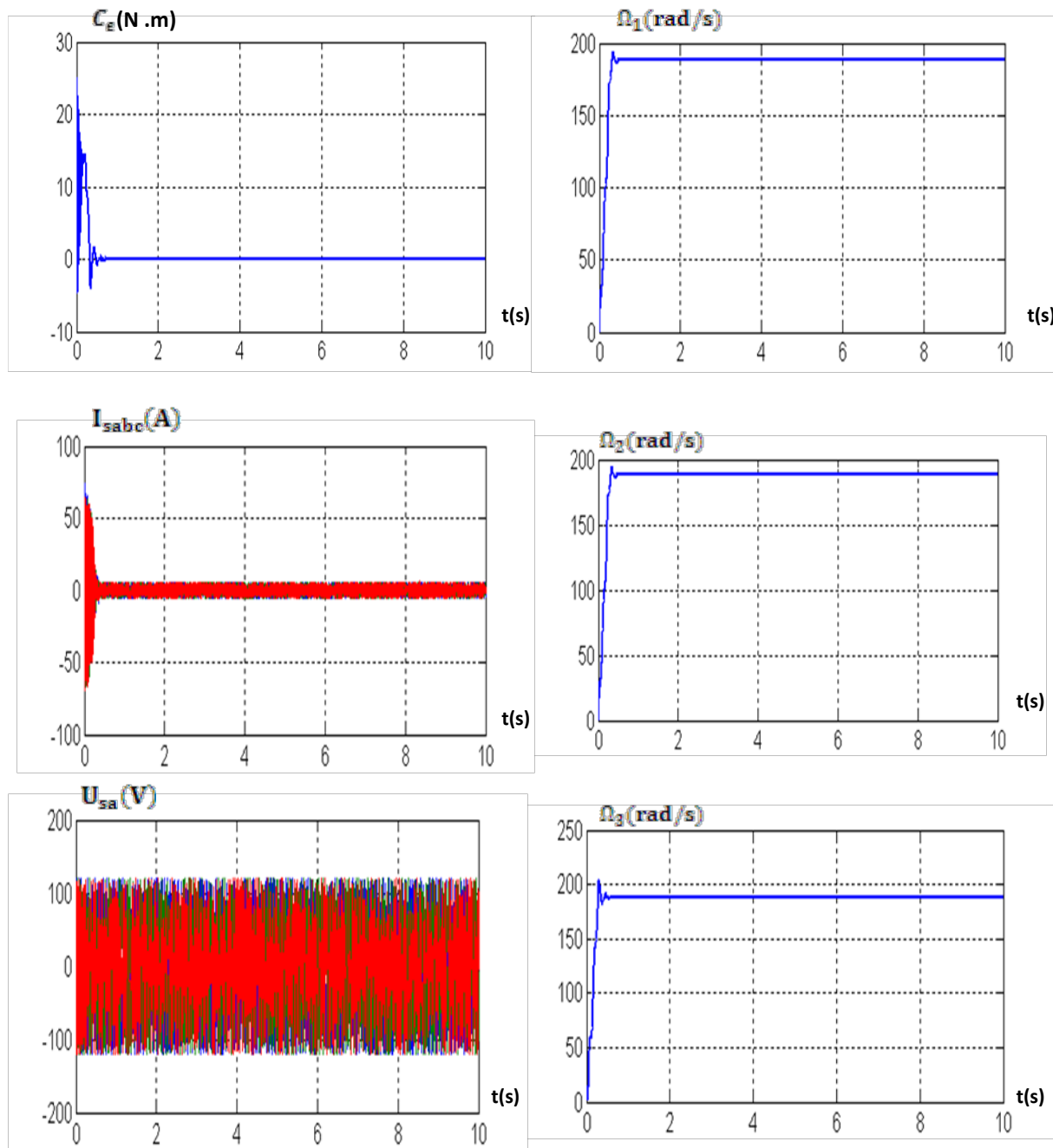


Figure 3.5 Courbes au démarrage, du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, des courants et des tensions statoriques (Machine asynchrone/Matlab-Simulink)

On applique donc dans une seconde étape une variation de type échelon du couple de charge au niveau de la troisième masse  $\Delta C_{r3} = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$  à l'instant  $t = 2 \text{ s}$ . La figure.3.6 représente les résultats de simulation de ce premier cas. Les différents cas qui suivront cette première application seront analysés autour de cette variation.

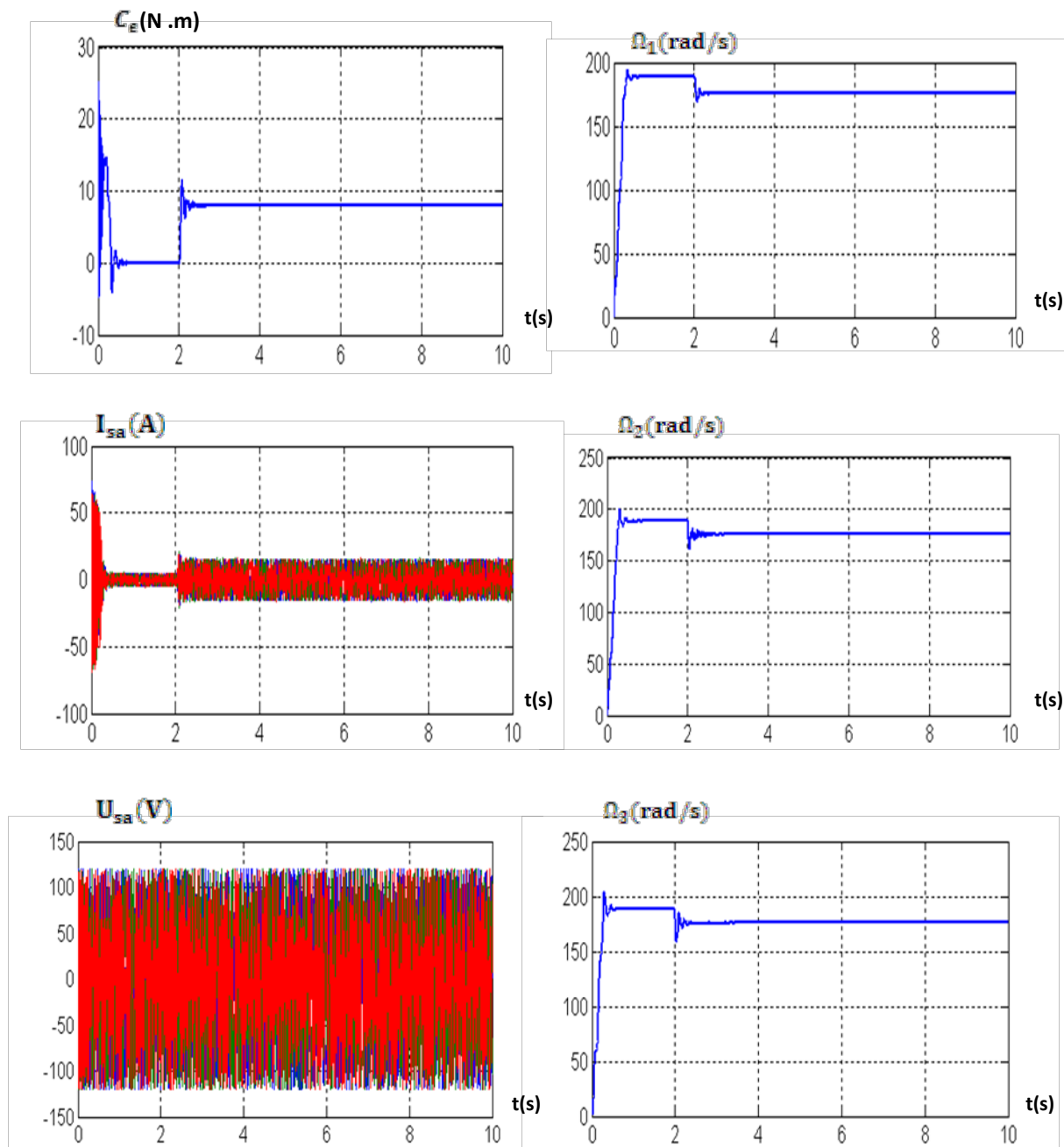


Figure 3.6 Courbes du couple électromagnétique et des vitesses des trois masses et des courants et des tensions statoriques, suite à une variation  $\Delta C_{r3} = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$  à  $t = 2 \text{ s}$  (Machine asynchrone /Matlab-Simulink)

Dans ce qui suit, comme dans le cas du moteur à courant continu, on fait varier le coefficient de rigidité  $k_{23}$  pour étudier son effet sur la réponse du système, tous les autres paramètres restent constants. On constate aussi que notre système à 3 masses est sujet aux oscillations (résonance mécanique), différemment du modèle à une masse qui suppose que les liaisons sont parfaitement rigides. Par ailleurs, on remarque que plus le coefficient de rigidité  $k_{23}$  est important, mieux les oscillations sont amorties (Fig. 3.7).

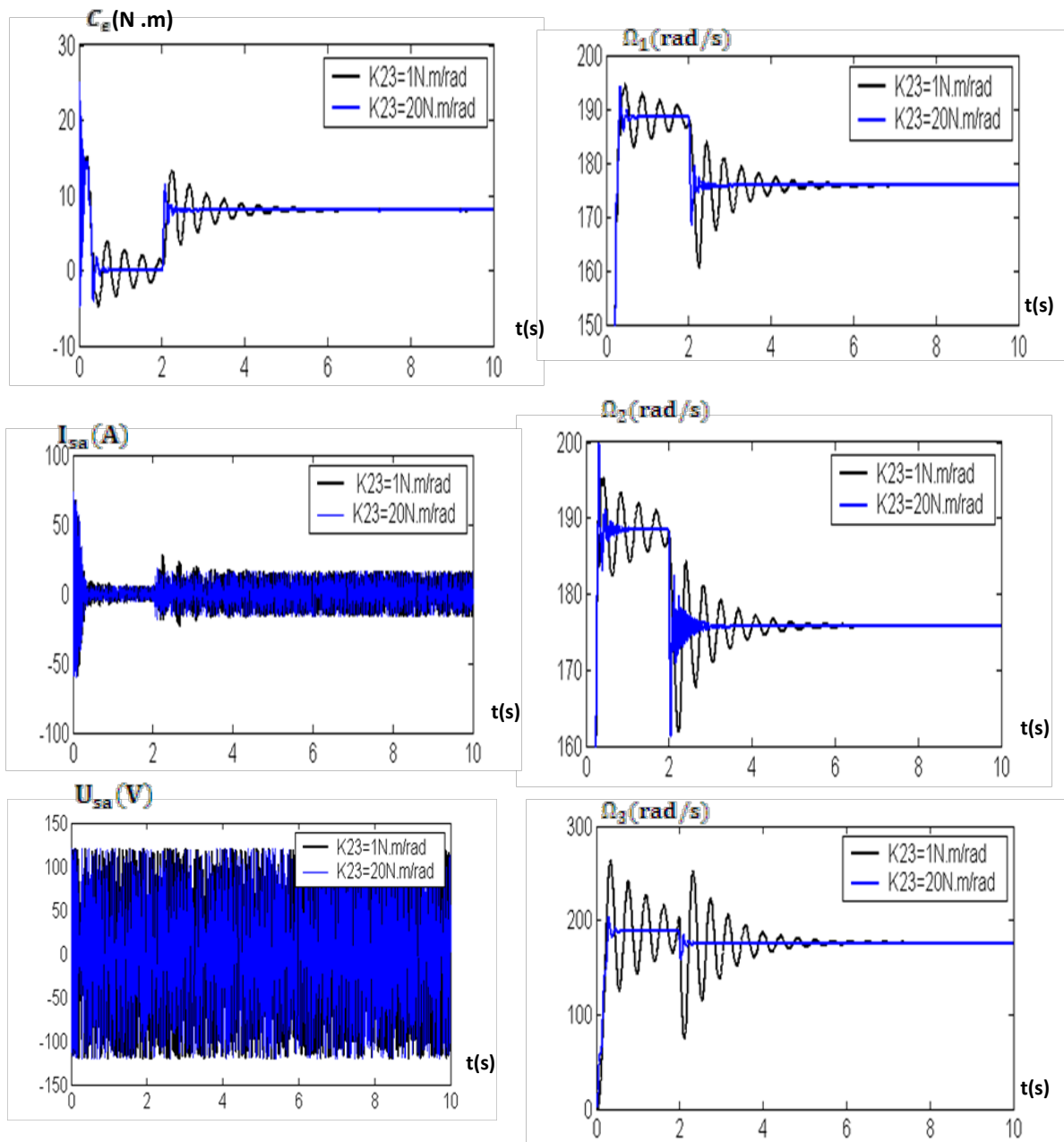


Figure 3.7 Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, du courant  $I_{sa}$  et de la tension  $U_{sa}$  statoriques, suite à une variation  $\Delta C_{r3} = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$  à  $t = 2 \text{ s}$ , pour différentes valeurs du coefficient de rigidité  $k_{23}$  (Machine asynchrone /Matlab-Simulink)

On fait 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. On remarque d'après la figure 3.8 que lorsque le moment d'inertie de la partie mécanique devient important par rapport à celui du moteur les oscillations sont mieux amorties.

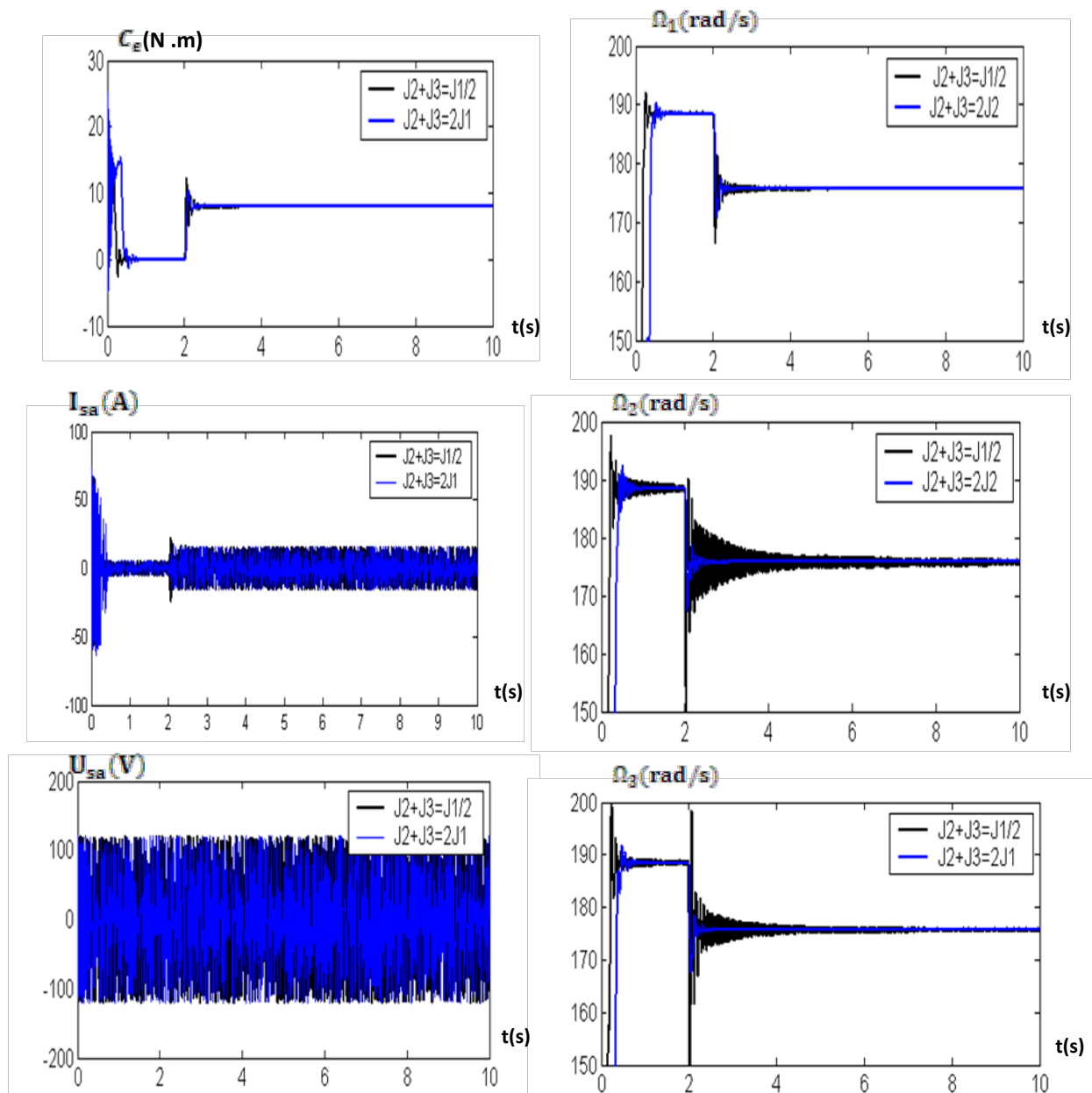


Figure 3.8 Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, du courant  $I_{sa}$  et de la tension  $U_{sa}$  statoriques, suite à une variation  $\Delta C_{r3} = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$  à  $t = 2 \text{ s}$ , pour différentes valeurs du moment d'inertie  $[J_2 + J_3]$  (Machine asynchrone / Matlab-Simulink)

### 3.3 Simulation de la MADA à partir du modèle de trois masses

On prend un moteur MADA avec une tension statorique de 220 V et une tension rotorique de 10 V .

Les paramètres électriques et mécaniques de l'entraînement de la MADA sont donnés comme suit :  $R_s = 0.0012 \text{ Ohm}$  ,  $R_r = 0.021 \text{ Ohm}$  ,  $L_{sr} = 0.0135 \text{ H}$  ,  $L_s = 2.0372 \cdot 10^{-4} \text{ H}$  et  $L_r = 1.7507 \cdot 10^{-4} \text{ H}$  ,  $J = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  ,  $\beta_{i,i+1} = 10^5 \text{ Nms/rad}$  ,  $k_{i,i+1} = 2 \cdot 10^6 \text{ Nm/rad}$  , ( $i = 1,2$ ) 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 on va étudier d'autres cas pour analyser l'effet du moment d'inertie sur la réponse du système.

On considère dans un premier temps un couple de charge  $C_{r3}$  nul, quant aux couples résistants  $C_{r1}$  et  $C_{r2}$  dus aux frottements, on les considère négligeables donc nuls tout le long de l'étude. D'abord, les résultats de simulation présentés à la figure 3.9 mettent en valeur l'état de démarrage de la MADA sans système de commande à vitesse variable, situation qu'on présente à titre indicatif mais qu'on va ignorer pour qu'on penche 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 MADA.



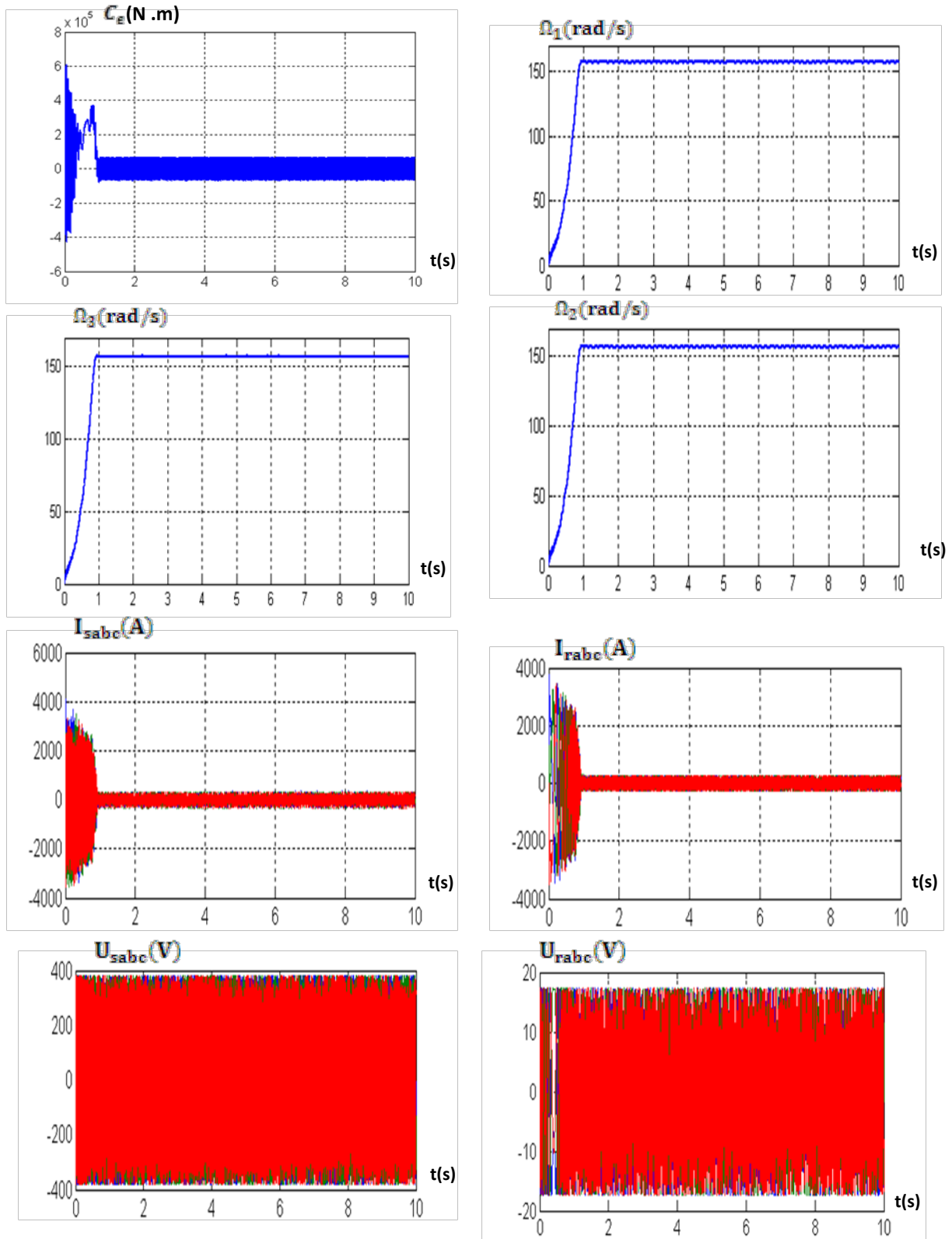


Figure 3.9 Courbes au démarrage, du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, des courants et des tensions statoriques et rotoriques (MADA /Matlab-Simulink)

On applique donc dans une seconde étape une variation de type échelon du couple de charge au niveau de la troisième masse  $\Delta C_{r3} = 2 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$  à l'instant  $t = 2 \text{ s}$ . La figure.3 .10 représente les résultats de simulation de ce premier cas. Les différents cas qui suivront cette première application seront analysés autour de cette variation.

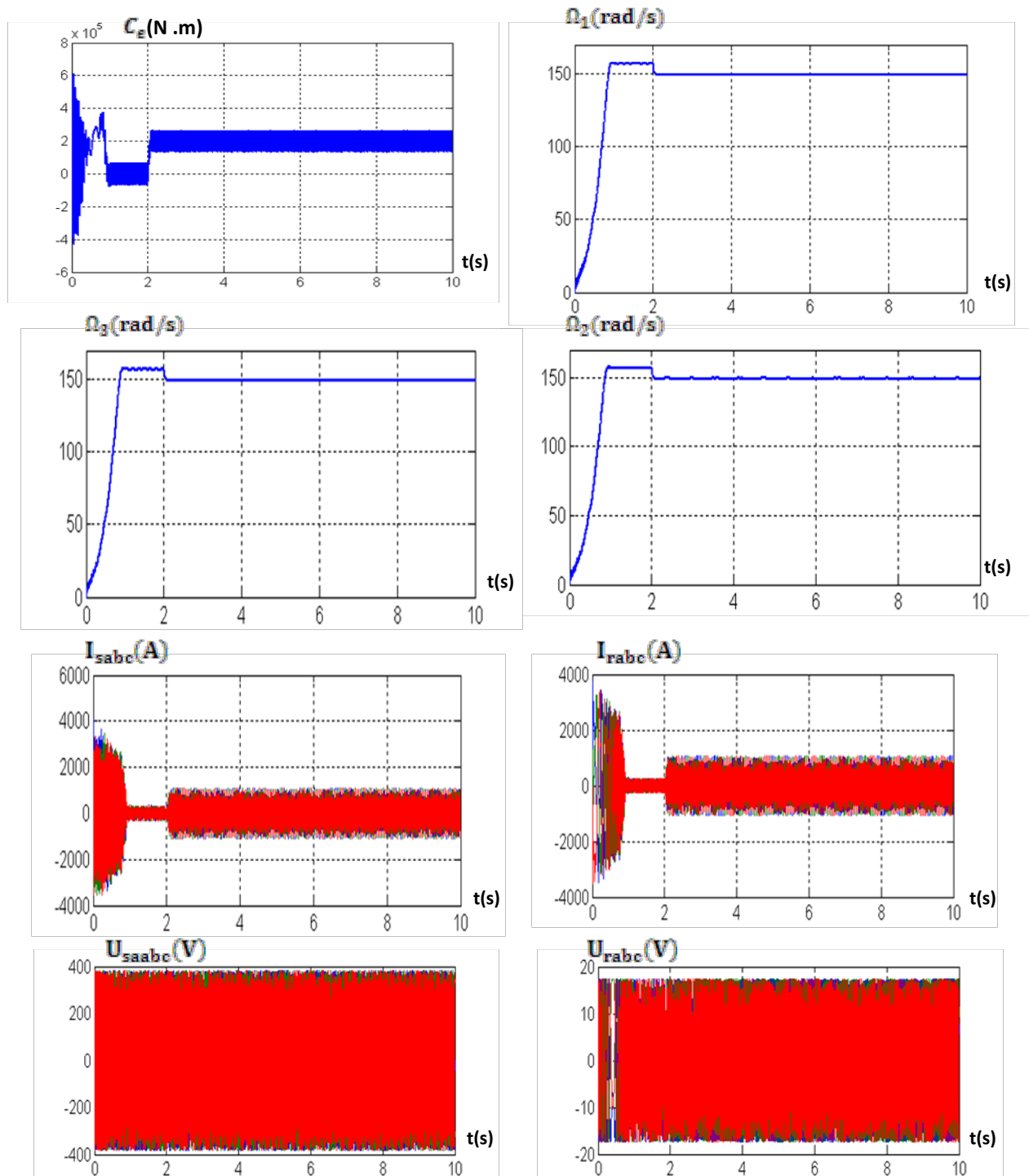


Figure 3.10 Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, des courants et des tensions statoriques et rotoriques, suite à une variation  $\Delta C_{r3} = 2 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$  à  $t = 2 \text{ s}$  (MADA /Matlab-Simulink)

Dans ce qui suit, comme dans le cas du moteur à courant continu et la machine asynchrone, on fait varier le coefficient de rigidité  $k_{23}$  pour étudier son effet sur la réponse du système, tous les autres paramètres restent constants. On constate aussi que notre système à 3 masses est sujet aux oscillations (résonance mécanique), différemment du modèle à une masse qui suppose que les liaisons sont parfaitement rigides. Par ailleurs, on remarque que plus le coefficient de rigidité  $k_{23}$  est important, mieux les oscillations sont amorties (Fig. 3.11).

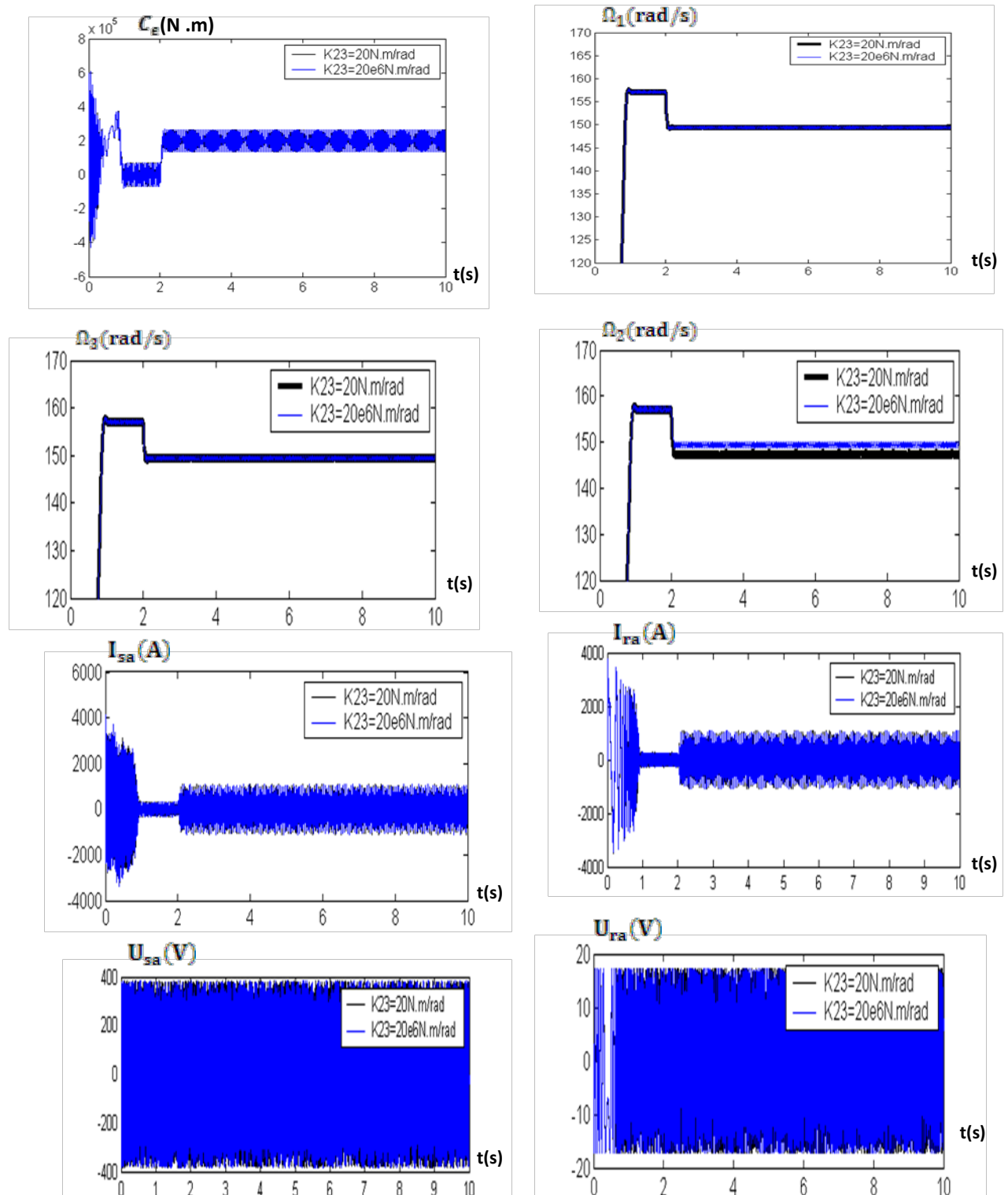


Figure 3.11 Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses, du courant  $I_{sa}$  et de la tension  $U_{sa}$  statoriques et rotoriques, suite à une variation  $\Delta C_{r3} = 2 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$  à  $t = 2 \text{ s}$ , pour différentes valeurs du coefficient de rigidité  $k_{23}$  (MADA /Matlab-Simulink)

On fait 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. On remarque d'après la figure 3.12 que lorsque le moment d'inertie de la partie mécanique devient important par rapport à celui du moteur les oscillations sont mieux amorties.

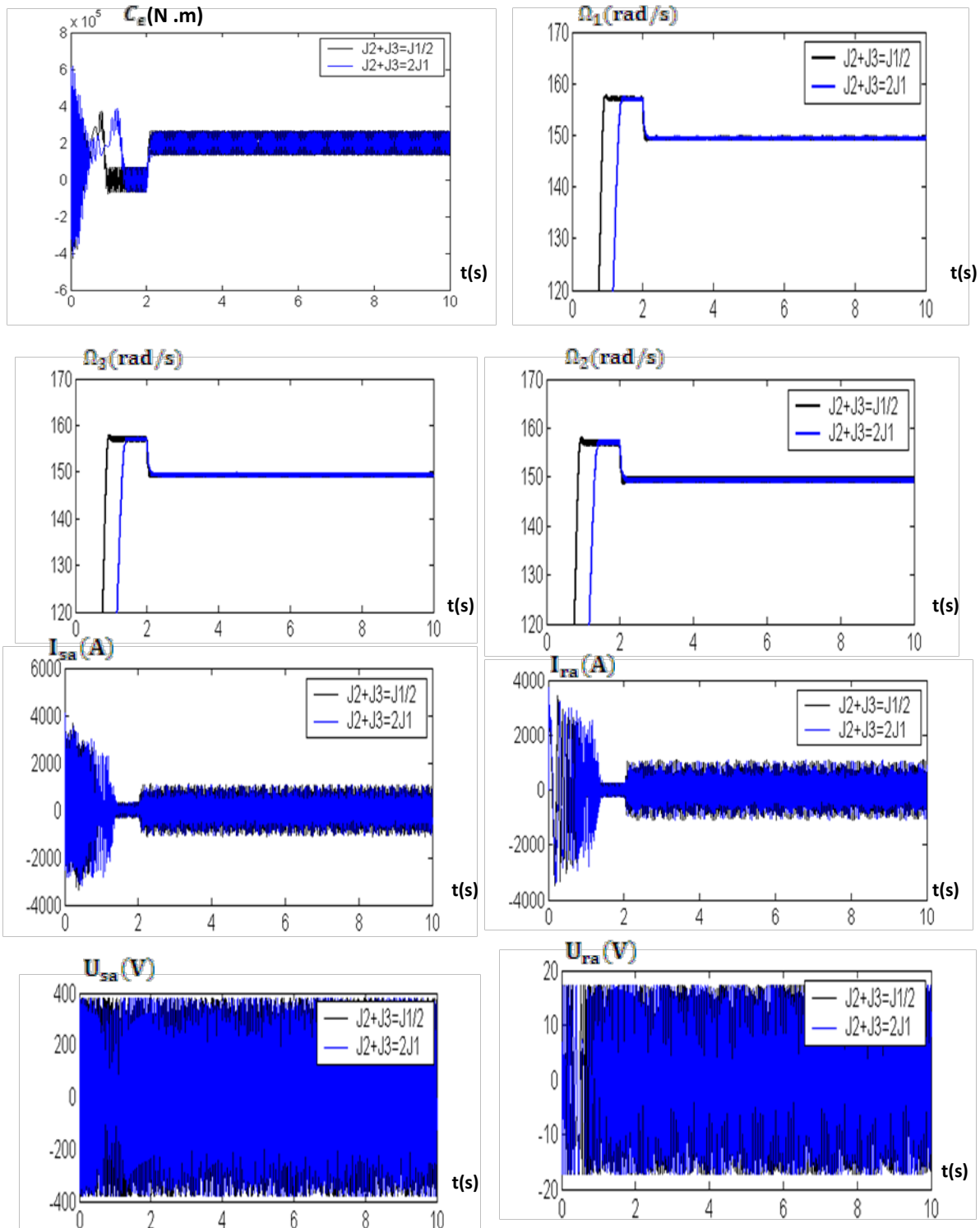


Figure 3.12 Courbes du couple électromagnétique, des vitesses des trois masses et du courant  $I_{sa}$  et de la tension  $U_{sa}$  statoriques et rotoriques, suite à une variation  $\Delta C_{r3} = 2 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$  à  $t = 2 \text{ s}$ , pour différentes valeurs du moment d'inertie  $[J_2 + J_3]$  (MADA / Matlab-Simulink)

### 3.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la simulation des trois machines (machines à c.c., asynchrone, MADA) à base de la module multi-masse.

Dans les trois cas des machines:

- On a appliqué une variation de type échelon du couple de charge au niveau de la troisième masse ;
- On a varié la valeur du coefficient de rigidité  $k_{23}$  pour étudier son effet sur la réponse du système ;
- On a varié 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.



**Application de la modélisation multi masses des générateurs  
asynchrone et asynchrone à double alimentation au domaine des  
éoliennes**

Après la validation du modèle multi-masses de la machine asynchrone et asynchrone double alimentée grâce aux simulations entreprises sous Matlab, qui ont fait l'objet des chapitres précédents, il s'agit maintenant de mettre en valeur et d'évaluer sous Simulink le fonctionnement des deux modèles en mode générateur, un premier à base de machine asynchrone et le deuxième à base de machine asynchrone à double alimentation.

Le couple exercé par le vent sur l'éolienne doit être pris en considération et également modélisé.

#### **4.1 Modèle théorique de la turbine à vent**

La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser, cette modélisation était faite dans le chapitre 1 et l'aider des équations (1.15), (1.16), (1.17), (1.19), (1.20). On analyse ce modèle séparément figure(4.1), on considère donc la variation de la vitesse du vent ainsi que la variation de l'angle d'attaque de l'éolienne  $\beta$ , la vitesse du rotor de la turbine est

considérée constante et égale à  $\frac{2\pi f}{23.75 \cdot p} = 4.41 \text{ rad / s}$ .

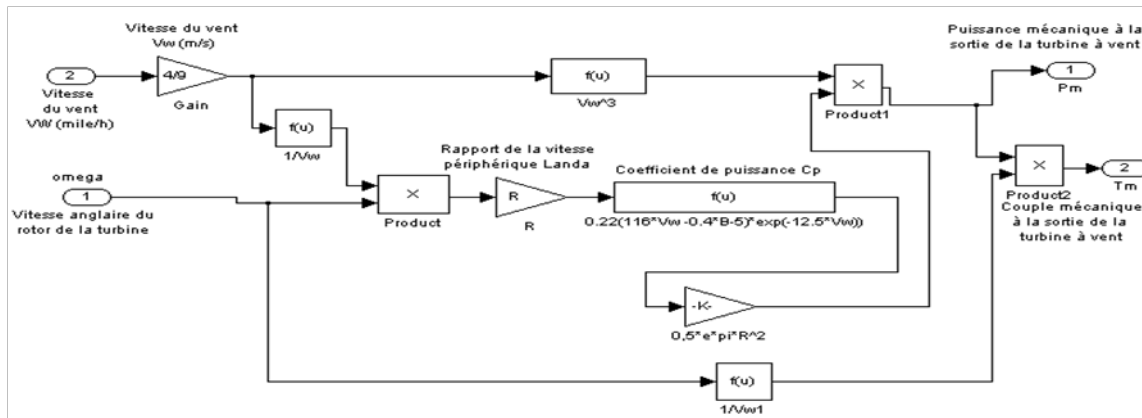
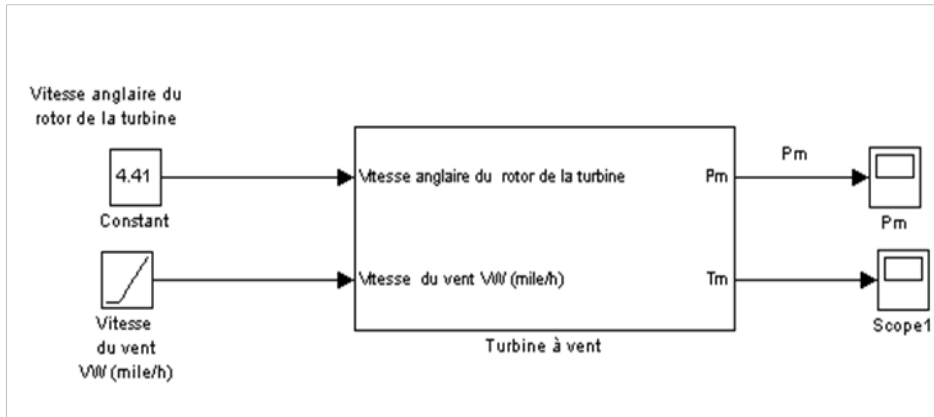


Figure 4.1 Modèle de la turbine à vent

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 (4.2) présente les courbes du couple, de la puissance ainsi que du coefficient de puissance de la turbine en fonction de  $\lambda$  qui est le rapport de vitesse périphérique pour différentes valeurs de l'angle d'attaque de l'éolienne. On constate que quand l'angle  $\beta$  augmente la puissance maximale et le couple maximal à la sortie de la turbine, par contre la valeur maximale de la courbe du coefficient de puissance diminue quand l'angle  $\beta$  augmente. Pour un angle  $\beta = 0$  (valeur qu'on va utiliser par la suite, pour l'étude du système mécanique à deux masses), le maximum de la puissance extraite du vent correspond à  $\lambda \approx 4$  et la valeur maximale du coefficient  $C_p$  correspond à  $\lambda \approx 7$  ; c'est pourquoi on choisit la valeur moyenne  $\lambda \approx 5$ , sachant que :  $\lambda = R \cdot \Omega / V_w$  avec  $R = 11.6 \text{ m}$  et  $\Omega \approx 4.41 \text{ rad/s}$  ; et à la valeur  $\lambda = 5$  la vitesse du vent correspond à  $V_w = 10,23 \approx 10 \text{ m/s} \approx 23 \text{ Mile/h}$

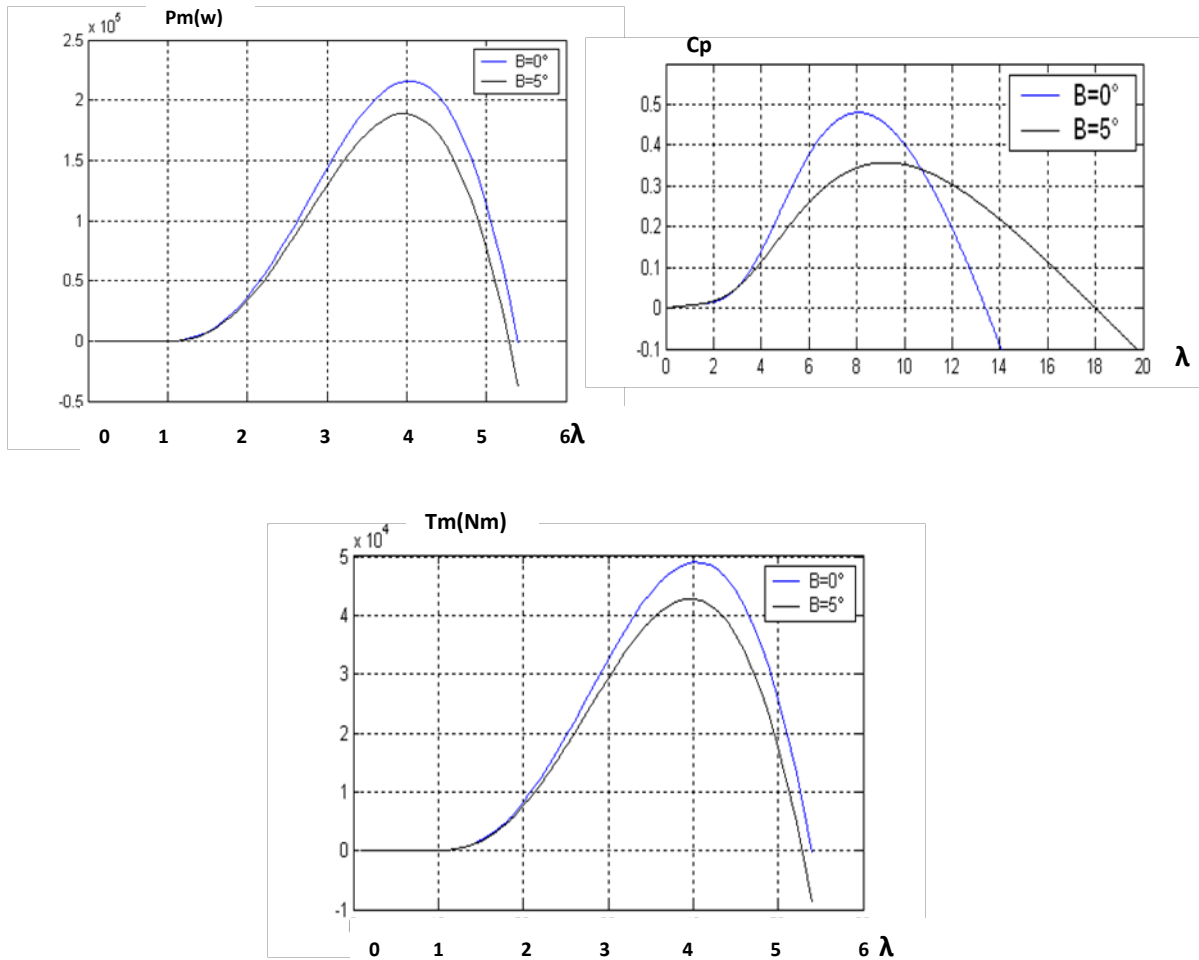


Figure 4.2 Caractéristiques de la puissance et du couple à la sortie de la turbine, ainsi que du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse périphérique  $\lambda$ , pour différentes valeurs de l'angle d'attaque des pales

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

On prend un moteur asynchrone de puissance nominale de  $180 \text{ kW}$  avec une tension nominale de  $400 \text{ V}$ , Les paramètres électriques et mécaniques de l'entraînement du générateur asynchrone sont donnés comme suit :

$R_s = 0.0092 \text{ Ohm}$ ,  $R_r = 0.0061 \text{ Ohm}$ ,  $L_{sr} = 6.7 \text{ mH}$ ,  $L_s = 6.886 \text{ mH}$  et  $L_r = 7.127 \text{ mH}$ ,  
 $\beta_{1,2} = 0.1 \text{ Nms/rad}$ ,  $k_{1,2} = 2700 \text{ Nm/rad}$  et  $p = 3$ , le moment d'inertie de la turbine  $J_T = 102.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , le moment d'inertie du générateur  $J_G = 4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , le rapport de la boîte de vitesse  $23.75$ , la vitesse du rotor  $\Omega = 42 \text{ tr/min}$  et la densité de l'air  $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$ .

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

Le modèle de tout le système composé de la génératrice asynchrone, de la turbine à vent ainsi que du système mécanique à deux masses, développé sous Matlab-Simulink est le suivant (Fig. 4.3) :

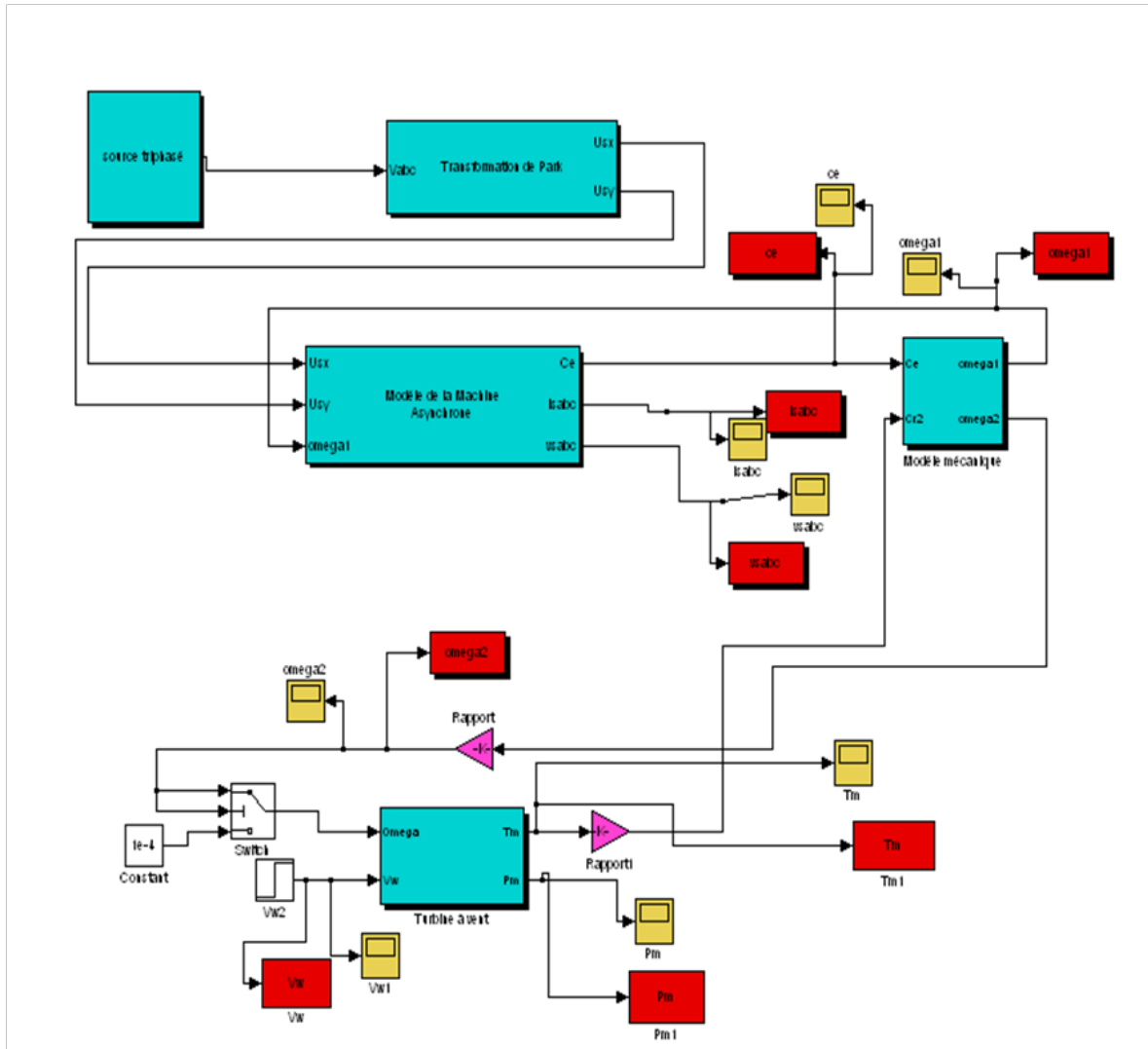


Figure 4 .3 Schéma de simulation développé sous Matlab-Simulink du système de l'éolienne composé de la machine asynchrone, de la turbine à vent et du système mécanique à deux masses

Les courbes de simulation obtenues à l'aide du modèle de la figure 4.3 sont présentées ci-dessous, il est à préciser que nous avons du diminuer le pas de calcul pour minimiser le temps demandé par ces simulations.

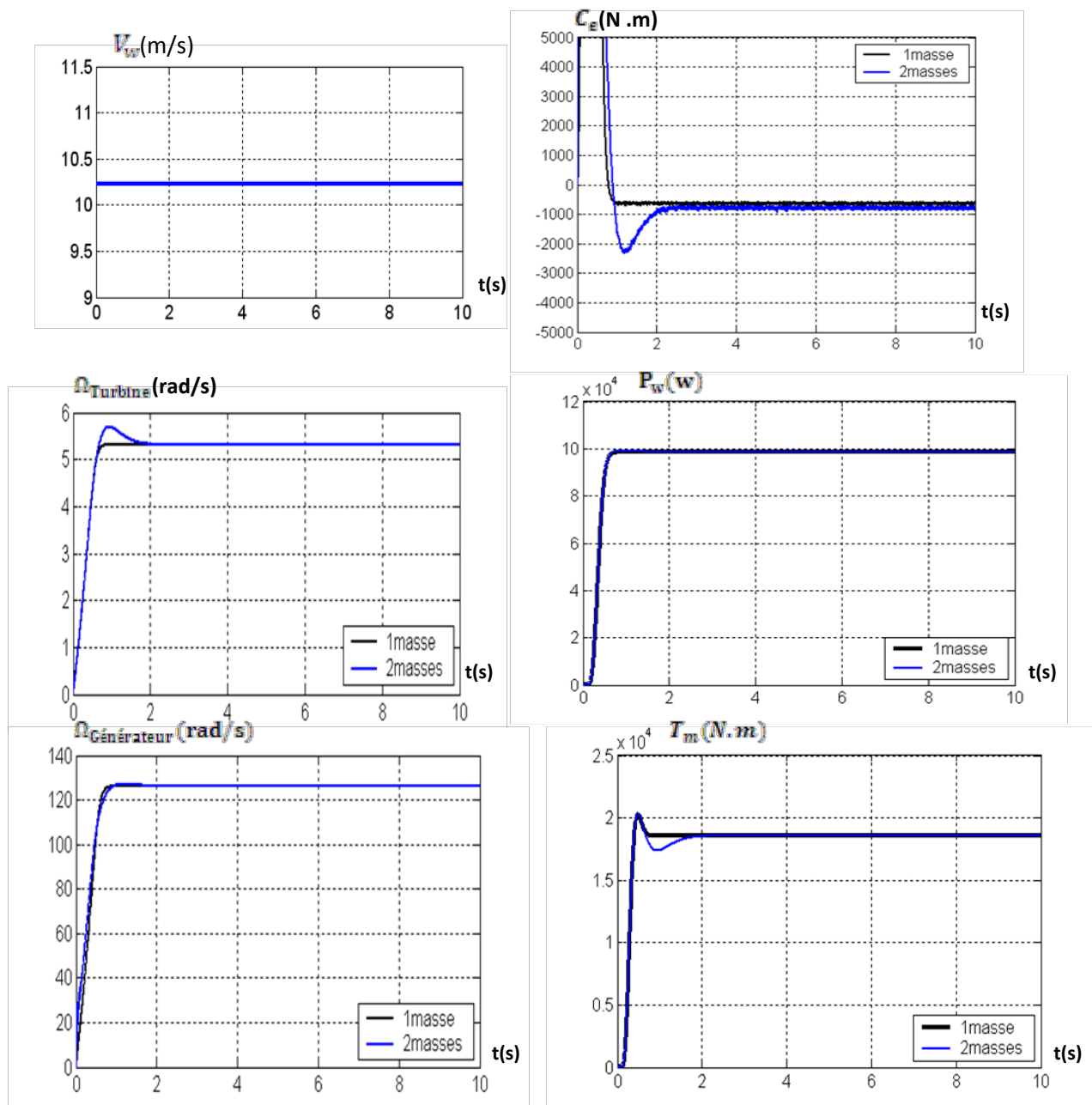


Figure 4.4 Courbes au démarrage de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse du générateur pour une vitesse du vent constante  $V_w = 10,2 m/s$ , quand les perturbations sont négligées

La figure 4.4 montre l'état au démarrage du système de l'éolienne pour un angle d'attaque des pales  $\beta = 0^\circ$  et une vitesse du vent constante  $V_w = 10,2 m/s$ . En pratique cette situation doit être traitée par des commandes adaptées ce qui ne représente pas l'objectif de ce projet; Par ailleurs, on essaye de soulever dans cette figure une comparaison entre le comportement

du modèle à deux masses et le comportement du même modèle avec une représentation rigide à une masse.

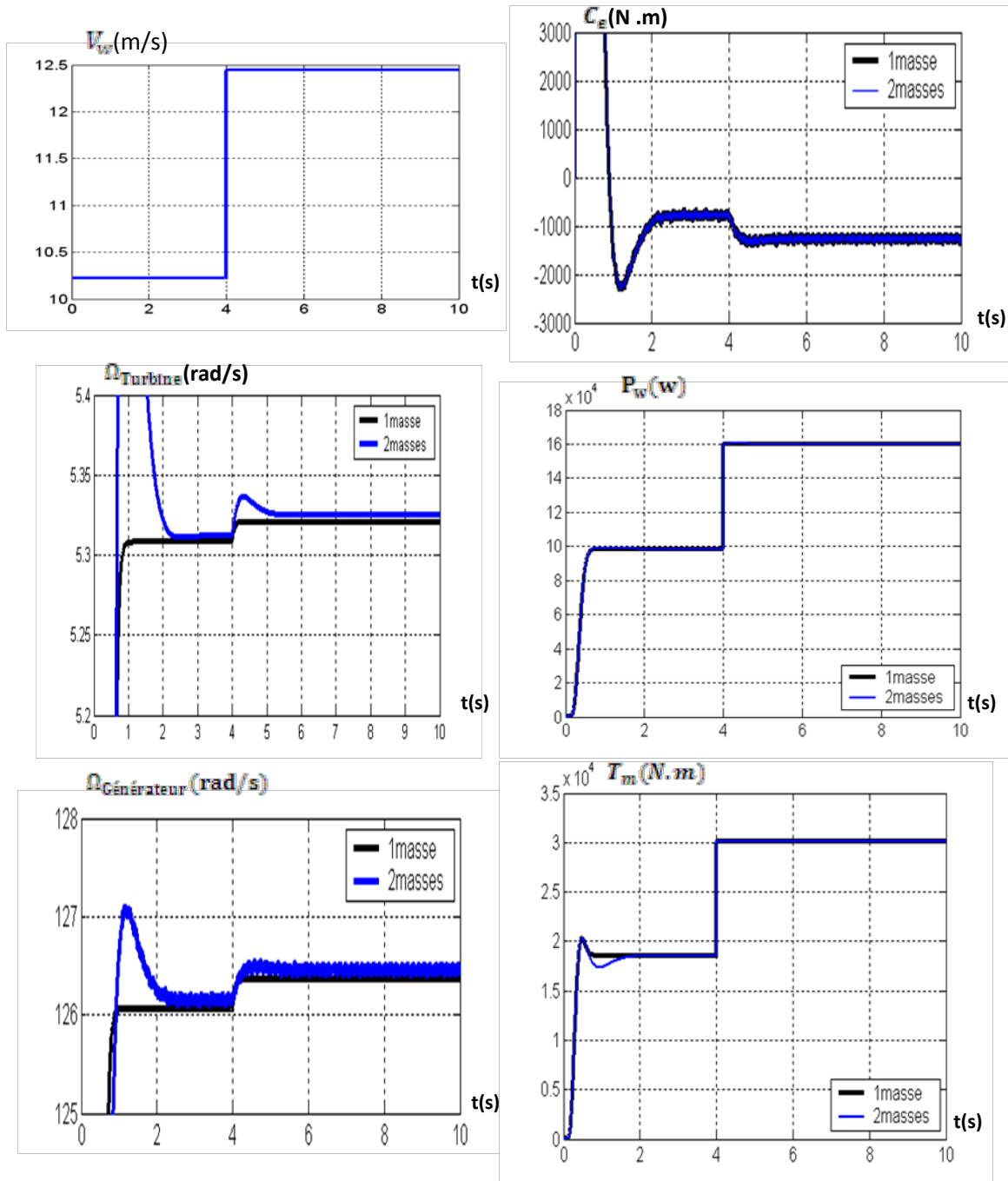


Figure 4.5 Courbes de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse du générateur, pour une variation de la vitesse du vent  $\Delta V_w = 2.2 \text{ m/s}$  (de  $V_w = 10,2 \text{ m/s}$  à  $V_w = 12,4 \text{ m/s}$ ) à  $t = 4 \text{ s}$ , quand les perturbations sont négligées



Les courbes présentées à la figure 4.5 sont obtenues avec un angle d'attaque des pales  $\beta = 0^\circ$ , la vitesse du vent est considérée constante  $V_w = 10,2m/s$  jusqu'à l'instant  $t = 4s$  où une variation  $\Delta V_w = 2,2m/s$  a été appliquée, on a donc négligé toute perturbation du vent jusqu'à et après l'instant  $t = 4s$ .

#### **4.4 Description et données numériques d'un modèle à 2 masses d'une éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation :**

On choisit un moteur asynchrone de puissance nominale de  $180 kW$  avec une tension nominale de  $400 V$  et  $12 A$ , Les paramètres électriques et mécaniques de l'entraînement du générateur asynchrone sont donnés comme suit :

$R_s = 0.012 \text{ Ohm}$ ,  $R_r = 0.021 \text{ Ohm}$ ,  $L_{sr} = 0.0135 \text{ H}$ ,  $L_s = 0.01367507 \text{ H}$  et  $L_r = 0.0135 \text{ H}$ ,  $\beta_{1,2} = 10000 \text{ Nms/rad}$ ,  $k_{1,2} = 2000 \text{ Nm/rad}$  et  $p = 2$ , le moment d'inertie de la turbine  $J_T = 102.8 \text{ kg} \cdot m^2$ , le moment d'inertie du générateur  $J_G = 4.5 \text{ kg} \cdot m^2$ , le rapport de la boîte de vitesse  $23.75$ , la vitesse du rotor  $\Omega = 62 \text{ tr/min}$  et la densité de l'air  $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$ .

#### **4.5 Simulation du système de l'éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation sous Matlab-Simulink**

Le modèle de tout le système composé de la génératrice asynchrone à double alimentation, de la turbine à vent ainsi que du système mécanique à deux masses, développé sous Matlab-Simulink est le suivant (Fig. 4.6) :

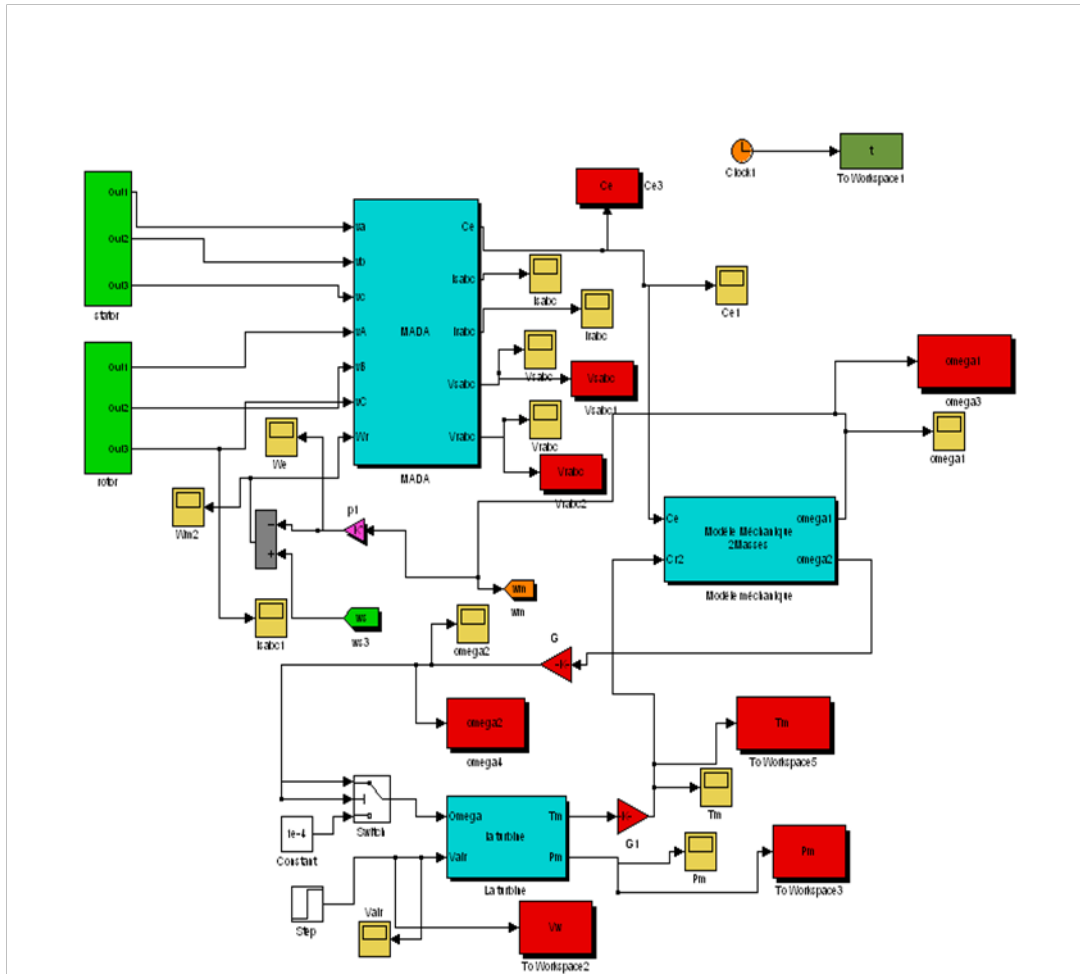


Figure 4 .6 Schéma de simulation développé sous Matlab-Simulink du système de l'éolienne composé de la machine asynchrone à double alimentation, de la turbine à vent et du système mécanique à deux masses

Les courbes de simulation obtenues à l'aide du modèle de la figure 4.6 sont présentées ci-dessous, il est à préciser qu'on avait dû diminuer le pas de calcul pour minimiser le temps demandé par ces simulations.

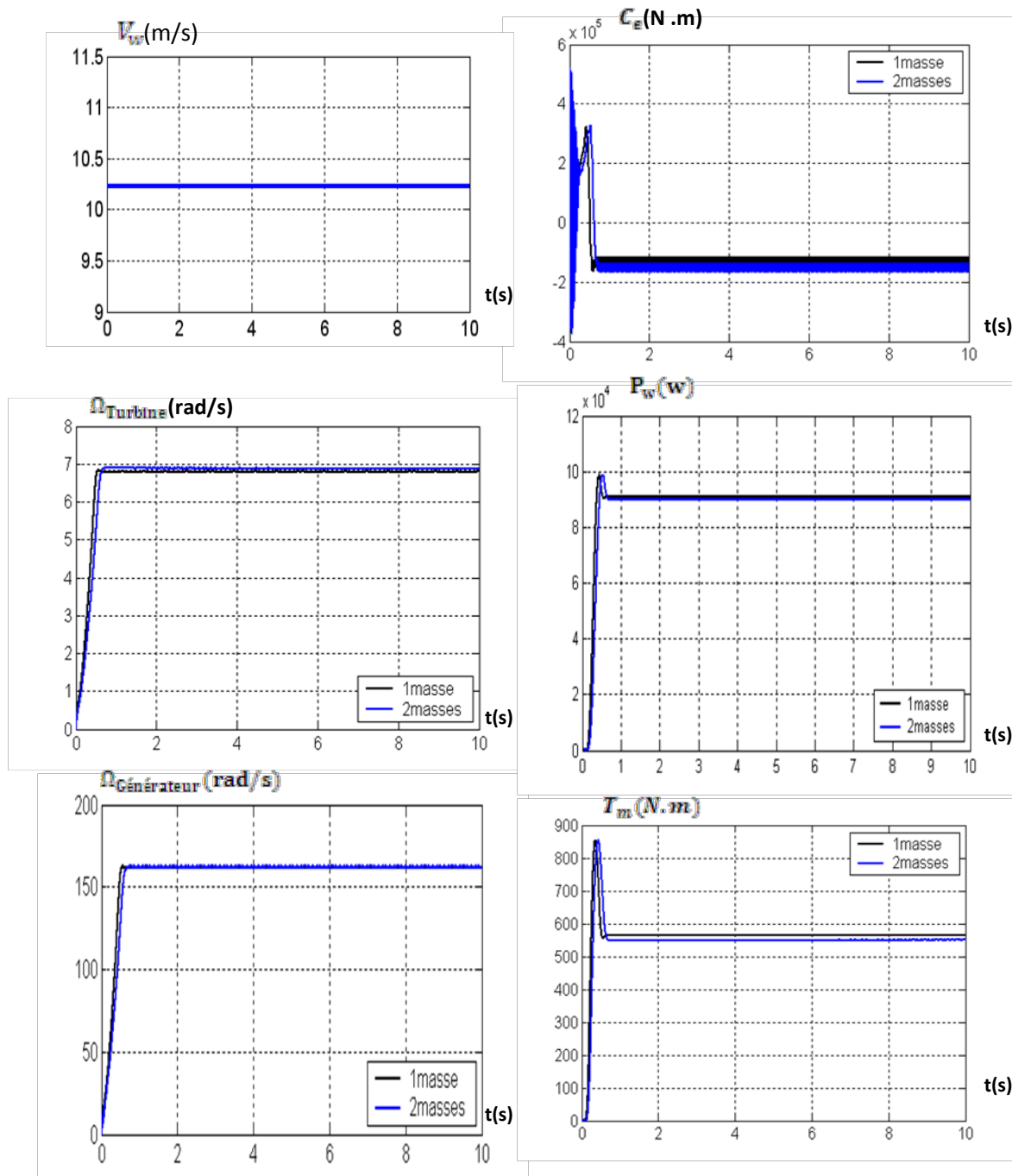


Figure 4.7 Courbes au démarrage de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse de la génératrice à double alimentation pour une vitesse du vent constante  $V_w = 10,2 \text{ m/s}$ , quand les perturbations sont négligées

La figure 4.7 montre l'état au démarrage du système de l'éolienne pour un angle d'attaque des pales  $\beta = 0^\circ$  et une vitesse du vent constante  $V_w = 10,2 \text{ m/s}$ . En pratique, cette situation doit être traitée par des commandes adaptées ce qui ne représente pas l'objectif de ce projet.

Par ailleurs, on a essayé de soulever dans cette figure une comparaison entre le comportement du modèle à deux masses et le comportement du même modèle avec une représentation rigide à une masse.

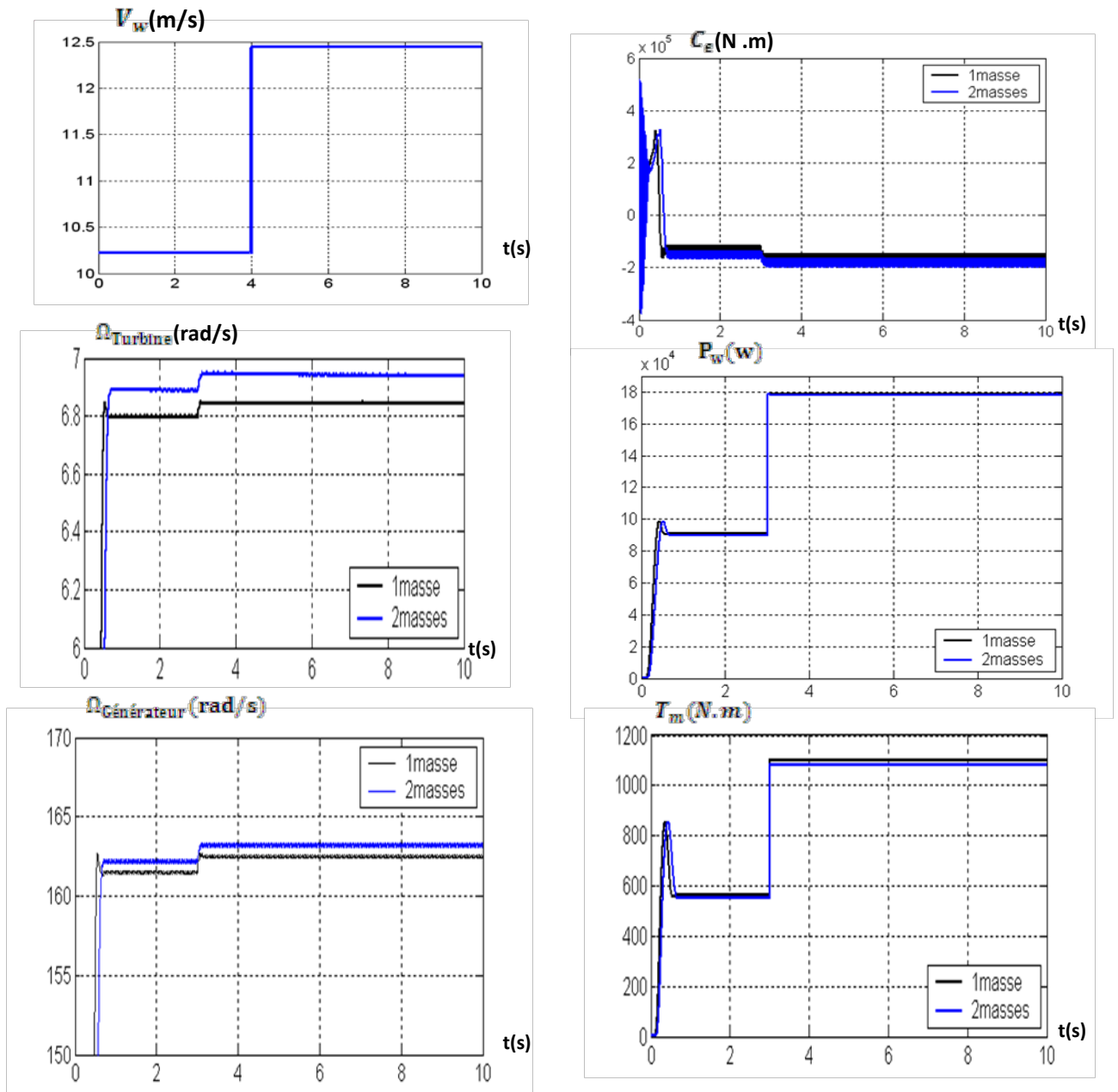


Figure 4.4 Courbes de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse de la génératrice à double alimentation, pour une variation de la vitesse du vent  $\Delta V_w = 2,2$  m/s (de  $V_w = 10,2$  m/s à  $V_w = 12,4$  m/s) à  $t = 3$  s, quand les perturbations sont négligées

Les courbes présentées à la figure 4.5 sont obtenues avec un angle d'attaque des pales  $\beta = 0^\circ$ , la vitesse du vent est considérée constante  $V_w = 12,2m/s$  jusqu'à l'instant  $t = 3s$ , où une variation  $\Delta V_w = 2,2m/s$  a été appliquée, on a donc négligé toute perturbation du vent jusqu'à et après l'instant  $t = 3s$ .

## 4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, dans un premier temps, on a fait la simulation du modèle théorique de la turbine à vent pour analyser ce modèle séparément, en prenant en considération la variation de la vitesse du vent ainsi que la variation de l'angle d'attaque de l'éolienne ; une fois qu'on a confirmé que le block de la turbine fonctionne, on a composé le modèle de tout le système qui inclut la turbine à vent et la génératrice asynchrone dans un premier cas, et la génératrice à double alimentation dans la deuxième, ainsi que le système mécanique à deux masses.

On a obtenu et interprété les courbes des puissances, des couples et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse de la génératrice asynchrone et de la génératrice à double alimentation.

## **Conclusion générale**

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire, a permis de développer et d'étudier la conversion d'énergie produite par des différents générateurs.

La première partie du travail présente l'état de l'art des installations éoliennes; dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme : la méthode de description du gisement éolien, les exemples d'architectures, qu'on a commencé par les différents capteurs (à axe horizontal, vertical) et les caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal ; un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

On a présenté les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien.

On a d'abord modélisé l'équation du mouvement de la partie mécanique du système éolien qui est généralement décrite par l'équation de Lagrange. L'adoption de ce modèle mathématique permet d'étudier les vitesses et les positions des différents éléments, puis on a modélisé et étudié les équations électriques. On a effectué une association de la partie mécanique de l'éolienne et la partie électrique du moteur.

On a également présenté la simulation des trois machines (machines à c.c., asynchrone, MADA) à base de la module multi-masse.

Dans les trois cas des machines on a appliqué une variation de type échelon du couple de charge au niveau de la troisième masse, on a varié la valeur du coefficient de rigidité  $k_{23}$  pour étudier son effet sur la réponse du système, et après on a varié le moment d'inertie total de deuxième et de la troisième masse et on a étudié, également, l'effet de cette variation sur la réponse du système.

Dans un premier temps, on a fait la simulation du modèle théorique de la turbine à vent pour analyser ce modèle séparément, en prenant en considération la variation de la vitesse du vent ainsi que la variation de l'angle d'attaque de l'éolienne ; une fois qu'on a confirmé que le block de la turbine fonctionne, on a composé le modèle de tout le système qui inclut la turbine à vent et la génératrice asynchrone dans un premier cas, et la génératrice à double alimentation dans la deuxième, ainsi que le système mécanique à deux masses.

On a obtenu et interprété les courbes des puissances, des couples et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse de la génératrice asynchrone et de la génératrice à double alimentation.



## **Bibliographie**

- [1]. J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2002
- [2]. Energies Renouvelables. <http://www.energies-renouvelables.org>
- [3]. F. POITIER, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [4]. J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, B 8 585 1- B 8 585 21.
- [5]. J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, B 8 585 1- B 8 585 21.
- [6]. O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96
- [7]. Site Internet de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne, "http://www.windpower.org/fr/core.htm".
- [8]. Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan Astier, Brayima Dakyo, Cristian Nichita. État de l'art dans les aérogénérateurs électriques, 2002
- [9]. I. Hamzaoui, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", mémoire de magistère, ENP, Janvier 2008.
- [10]. E. Hau, Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2<sup>nd</sup> edition. Berlin, Germany: Springer, 2006
- [11]. S. Heier, Grid integration of wind energy conversion systems, 2<sup>nd</sup> edition. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2006.
- [12]. Hugo. Eduardo. Mena. Lopez, Maximum power tracking control scheme for wind generator systems, 2007
- [13]. Z. Lubosny, Wind turbine operation in electric power systems, Berlin, Germany: Springer, 2003.
- [14]. S. N. Bhadra, D. Kastha, S. Banerjee, Wind Electrical Systems, Oxford, UK: Oxford University Press, 2005.
- [15]. 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.
- [16]. Chatlin, "Machine Electrique ", presses Polytechnique normandes, 1990

- [17]. P. Barret, "Régimes transitoires des machines tournantes électrique", Editions Eyrolles, Paris, 1986.
- [18]. O. G. Denissenco, G.A. Kozlovski, L.P. Fedossenco, Transformation et utilisation de l'énergie éolienne 1992.
- [19]. B .V. Voitsekhovski, F.F. Voitsekhovskaya, M .B. Voitsekhovski, Energie éolienne à micromodules : Novosibirsk, 1995
- [20]. V. I. Vissarionov, Méthodes de calcul de ressources des de l'énergie éolienne : MEI, 2007
- [21]. A.Kolpakov, Installation énergétiques éoliennes et aérogénérateurs : Silovaia elektronika, 2005
- [22]. M. N .Rosine, Moulins à vent et aérogénérateurs : Masterstvo, 2007
- [23]. P .P . Bezroukikh, Que peut donner l'énergie du vent : Technika, 1998
- [24]. V. I. Kloutchev, Theorie de commande : Energoatomizdat,2001
- [25]. M. M. Sokolov, Calcul et élaboration des mécanismes d'entraînement :MEI,1988

## ملخص :

نقدم في هذا العمل دراسة تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية عن طريق المولدات الكهربائية. حيث قمنا بنمذجة نموذج لمتعدد الكتل الذي يمثل الحمل من الجانب الميكانيكي و الآلة الكهربائية حيث يتم الربط بينهما بمحور لين. والآن نضع الحمل متعدد الكتل و الآلة في وضع مولد للكهرباء حيث نستعمل الآلة غير متوقفة ثم نستعمل الآلة غير متوقفة مزدوجة التغذية

الكلمات المفتاحية: الآلة اللائزمانية, النموذج, المولد اللائزمني, المحول الساكن

## RÉSUMÉ :

On présente dans ce travail l'étude de la conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens. On a fait la modélisation d'entraînement électromécanique multi-masses, composé d'une machine électrique et d'une charge mécanique interconnectée par un arbre flexible. il s'agit de mettre en valeur les deux modèles (multi-masses+machine) en mode générateur, le premier à base d'une machine asynchrone et le second à base de machine asynchrone à double alimentation, le couple exercé par le vent sur l'éolienne est également modélisé dans ce système.

**Mot clés :** machine asynchrone, modélisation, générateur asynchrone, convertisseur statique

## Abstract:

We present in this work the study of the energy transformation produced by wind generators us before fact the modeling of electromechanical drive multi-mass, composed of an electric machine and a mechanical load inter-connected by a bowden shaft.

It is a question to it operation now of emphasizing of the two models(multi-masses+machine) in generating mode, a model of wind mill containing asynchronous machine and second containing asynchronous machine doubles food is indeed developed and evaluated under Simulink, the couple exerted by the wind on the wind mill is also modeled in this system.

**Key word:** induction machine, modelling, induction generator, convertor