



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE.

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES EXACTES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° ordre :

Série :

MEMOIRE :

PRESENTATION POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MAGISTER EN PHYSIQUE

ECOLE DOCTORALE « ENERGIES RENOUVELABLES »

THEME

**ETUDE D'UNE CHAINE DE CONVERSION
D'ENERGIE EOLIENNE**

Par :

KHALED FERKOUS

Soutenu le 27 /05 / 2009

Devant le Jury:

Présidente :	A. CHAKER	Prof.	Univ Mentouri Constantine.
Rapporteur :	A. BENTOUNSI	M.C.	Univ Mentouri Constantine.
Examineur :	M. DJEZZAR	M.C.	Univ Mentouri Constantine.
Examineur :	A. ZAATRI	Prof.	Univ Mentouri Constantine.

أَلْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
بِإِحْسَانِهِ أَتَى الْبَشَرِ
أَفْضَلُ مَا

بَدَأَ بِهِ
عَالَمِينَ

« La source de tout savoir est la connaissance de Dieu
- que sa gloire soit exaltée- et ceci ne peut être réalisé
que par la connaissance de sa divine manifestation»

Bahà'u'llah

DEDICACE

Je dédie Ce Travail à:

- Mon **PERE** qui ne cesse pas de M'encourager.
- Ma **MERE** pour Sa Tendresse profonde.
- Mes *chers Frères et Sœurs*.
- Mes **camarades de promo** du Département de

Physique et de l'Ecole Doctorale « *Energies Renouvelables* »

(Khaled- Walid- Mourad- Mouiz- Ilyes).

« A tout ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité ».

Khaled

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en tout premier lieu « **DIEU** » le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Après, je à remercier le Dr. *A. Bentounsi*, Maître de Conférences au Dept. d'Electrotechnique de l'Université Mentouri de Constantine, qui a encadré et suivi l'élaboration de cette thèse. Il a toujours été disponible pour répondre à mes questions. Tout mon respect et ma profonde reconnaissance.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Madame *A. Chaker*, Professeur à l'Université de Constantine, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse. Elle m'a toujours encouragé et aidé pour mener à bien ce travail.

Mes remerciements vont de même aux autres membres de jury qui m'ont fait l'honneur de participer au jury afin d'évaluer et enrichir cette thèse. Il s'agit, en l'occurrence de Messieurs:

A. Zaatri, Professeur à l'Université de Constantine, Examineur

M. Djezar, Maître de Conférences à l'Université de Constantine, Examineur

Ma gratitude aussi au département de physique de l'université de Constantine et à tous mes enseignants tous cycles confondus.

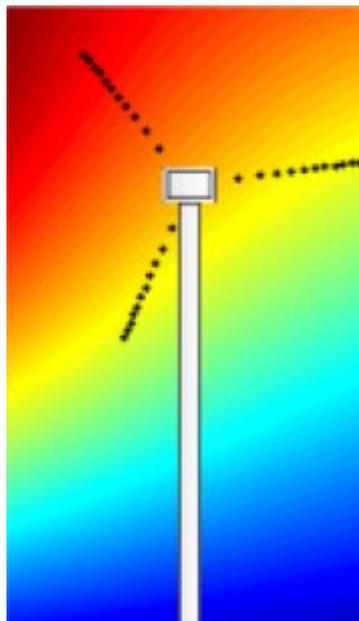
Je ne saurais oublier de remercier mes camarades (*Kamel, Hamza, Fyssal, Khalil, Amer, Said*),

Un grand merci à "*Mlle Djeghloud*" qui n'a pas manqué de donner de son temps pour garantir le meilleur travail.

Enfin, une pensée affectueuse est adressée aux membres de ma famille en particulier ma mère, mon père, mes sœurs et frères, pour leur soutien sans limite durant toutes mes années d'études.



LISTE DES SYMBOLES





GAS

MAS	Machine asynchrone.
GAS	Génératrice asynchrone.
s, r	indices correspondants à stator et au rotor de la GAS.
a_s, b_s, c_s	Les indices correspondants aux trois phases du stator.
a_r, b_r, c_r	indices correspondants aux trois phases du rotor.
R_s, R_r	résistance statorique et rotorique.
L_s	inductance propre d'une phase statorique.
L_r	inductance propre d'une phase rotorique.
l_{fs}, l_{fr}	inductance cyclique de fuit statorique et rotorique.
V_{as}, V_{bs}, V_{cs}	tensions simples triphasées au stator de la machine.
I_{as}, I_{bs}, I_{cs}	courants au stator de la machine.
$\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$	flux propres circulants au stator de la machine.
V_{ar}, V_{br}, V_{cr}	tensions simples triphasées au rotor de la machine.
I_{ar}, I_{br}, I_{cr}	courants au rotor de la machine.
$\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$	flux propres circulants au rotor de la machine.
$p(\theta)$	matrice de Park.
$\left[v_{dqos} \right]$	vecteur tension statorique dans le repère de Park.
$\left[i_{dqos} \right]$	vecteur courant statorique dans le repère de Park.
$\left[\Phi_{dqos} \right]$	vecteur flux statorique dans le repère de Park.
$\left[v_{dqor} \right]$	vectrice tension rotorique dans le repère de Park.
$\left[i_{dqor} \right]$	vecteur courant rotorique dans le repère de Park.



$ \Phi_{dqor} $	vecteur flux rotorique dans le repère de Park.
I_{ch}	Courant de la charge inductive connectée avec la GAS.
C	Capacité d'excitation d'auto-amorçage.
C_{ch}	Capacité de compensation série.
L_{ch}	inductance de charge.
R_{ch}	résistance de charge.
EnR	énergie renouvelable.
p	Nombres de phases.
ω_s	pulsation électrique statorique.
ω_r	Pulsation rotorique.
ω_g	Pulsation électrique de glissement.
Lm	inductance de magnétisation.
I_m	courant de magnétisation.
Re	partie réelle de l'impédance..
Im	partie imaginaire.
P	puissance active.
g	glissement.
d, q	axes directs et quadratiques du repère de Park.
S	opérateur de Laplace.
n_s, n_r	vitesses de rotation rotorique et statorique en tr/min.
C_{em}	couple électromagnétique de la génératrice.
Mcc	Machine à Courant Continu.
U_f, U_a	tensions d'alimentation du moteur Mcc.
J_G	inertie du rotor de la génératrice.



GASDE

<i>MASDE</i>	Machine asynchrone Double Etoile.
<i>GASDE</i>	Génératrice asynchrone Double Etoile.
<i>l, 2, r</i>	indices correspondants à l'étoile 1, l'étoile 2 et au rotor.
<i>a1, b1, c1</i>	indices correspondants aux trois phases du stator 1.
<i>a2, b2, c2</i>	indices correspondants aux trois phases du stator 2.
<i>ar, br, cr</i>	indices correspondants aux trois phases du rotor.
<i>R_l, R₂, R_r</i>	résistances statoriques et rotoriques.
<i>L_{l1}</i>	Inductance de fuite du premier enroulement statorique.
<i>L_{l2}</i>	Inductance de fuite du deuxième enroulement statorique.
<i>L_{lr}</i>	Inductance de fuite rotorique.
<i>L_{lm}</i>	Inductance de fuite mutuelle.
<i>C₁, C₂</i>	Capacité d'excitation correspondante à l'étoile 1, l'étoile 2.
<i>C_{s1}, C_{s2}</i>	Capacité de compensation correspondante à l'étoile 1, l'étoile 2.
<i>L₁, L₂, L_r</i>	inductances propres des étoiles statoriques et du rotorique.
<i>L_{ms}</i>	inductance mutuelle entre phases statoriques.
<i>L_{mr}</i>	inductance mutuelle entre phases rotoriques.
<i>M_{sr}</i>	inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.
<i>L_{ch2}, L_{ch1}</i>	inductances des charges.
<i>R₁, R₂</i>	résistances des charges.
<i>C₁, C₂</i>	capacités d'auto-amorçage.
<i>C_{s1}, C_{s2}</i>	capacités de compensation parallèle.
<i>i_{aL1}, i_{aL2}</i>	Courants des charges connectées avec la GASDE.
<i>α</i>	angle de décalage entre les deux étoiles.



θ_m	position du rotor (phase a_r) par rapport à l'étoile 1 (phase a_1).
θ_2	position du rotor par rapport à l'étoile 2.

Turbine

P_{vent}	puissance du vent.
$P_{turbine}$	Puissance produit par la turbine.
C_p	Coefficient de puissance.
$\Omega_{Turbine}$	vitesse mécanique de la turbine.
ρ	masse volumique de l'aire.
C_{aer}	Couple produit par l'aérogénérateur.
λ	Rapport de vitesse.
E_C	énergie cinétique du vent.
F	La fonction de répartition du vent.
$F(v)$	La fonction de répartition.
$f(v)$	La densité de probabilité.
k	Paramètre de forme caractérise la répartition du vent.
c	Paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent.
$MPPT$	Maximum Power Point Tracking.
P_{ele}	Puissance électrique produit par l'éolienne.
f	Le coefficient de frottement du rotor de la génératrice.
C_m	Le couple d'entraînement de la génératrice électrique.
Ω_m	La vitesse du rotor de la génératrice.
β	L'angle de calage.
R	La longueur de la pale.



Préambule

Le **Sommet de la Terre** de Rio de Janeiro (Brésil, 1992) qui a défini les grandes lignes d'un « développement durable », suivi du **protocole de Kyoto** (Japon, 1997) portant sur la protection de l'environnement (réduction des gaz à « effet de serre ») a catalysé l'émergence de ressources énergétiques alternatives non polluantes. Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir : (i) la première consiste à diminuer la consommation d'énergie (améliorer le rendement des récepteurs, faire des économies en changeant les habitudes de consommation, ...) tout en améliorant la productivité des centrales électriques ; (ii) une deuxième approche du problème consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie.

En effet, la production d'électricité à partir des ressources fossiles (charbon, pétrole ou gaz) ou fissiles (uranium,...) contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ces ressources non renouvelables. C'est pourquoi, l'une des mesures pour préparer un développement réellement durable consiste à accroître la part de ressources alternatives.

Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion thermonucléaire qui, éventuellement, pourrait être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière demeure incertain.

Par contre, on assiste actuellement à un *boom* des énergies dites renouvelables ou **EnR** (éolienne, solaire, bioénergie), inépuisables et non polluantes, qui pourraient constituer pour l'Algérie une réserve énergétique alternative intéressante, donc un axe de recherche innovant à investir, surtout dans le domaine du Génie Electrique (amélioration des chaînes de conversion électromécaniques associées à ces **EnR**).

C'est dans cette perspective de contribuer au développement des **EnR** que s'inscrit notre mémoire de magistère. Pour diverses raisons, nous nous sommes particulièrement intéressés à la filière **éolienne**. L'étude de la chaîne de conversion d'énergie a été scindée en 5 chapitres :

- **le chapitre I** est un exposé général sur les **EnR** (intérêt ; évolution ; statistiques) axé par la suite sur la filière éolienne qui nous intéresse ici (principe ; technologies ; équations) ;
- **le chapitre II** est consacré à l'Etat de l'Art des différents types d'aérogénérateurs utilisés dans les chaînes de conversion électromécanique d'énergie éolienne ;
- comme nous avons finalement opté pour les générateurs type **asynchrones** associés à l'éolienne, les **chapitres III et IV** traiteront respectivement de :
 - la machine asynchrone à cage (**S.E.I.G.**, en anglais) en fonctionnement isolé dans l'environnement **MATLAB** ;
 - la machine asynchrone à double étoile ou **MADE** en fonctionnement isolé dans l'environnement **MATLAB** ;
- **Le chapitre V** est consacré à une modélisation de la chaîne globale sous l'environnement **SUMILINK**.



Sommaire

Préambule

Chapitre I : Généralités sur les Systèmes Eoliens

I.1 Introduction	7
I.2 Production D'énergie Electrique à Partir Des EnR	8
I.3 Principes Et Eléments Constitutifs D'une Eolienne	8
I.3.1 Définition De L'énergie Éolienne.....	8
I.3.2 Historique De L'éolien	8
I.3.3 Données Chiffrées Sur L'éolien	9
I.3.3.1 Compétition De L'éolien.....	9
I.3.3.2 Évolution Des Coûts De Production.....	10
I.3.4 Constitution D'une Eolienne « Classique ».....	12
I.3.5 Modes D'installation Et Différents Types D'éoliennes.....	13
I.3.5.1 Éolienne a Axe Vertical.....	13
I.3.5.2 Éolienne a Axe Horizontal.....	14
I.4 Fonctionnement D'une pale d'Eolienne	15
I.4.1 Description d'une aile ou d'une pale d'éolienne.....	15
I.4.2 Triangle des Vitesses sur une Pale d'éolienne	16
I.4.3 Systèmes De Régulation De Vitesse D'une Éolienne.....	17
a) Système a Décrochage Aérodynamique " Pitch ".....	17
b) Système a Décrochage Aérodynamique "Stall".....	17
c) Système a Décrochage Aérodynamique "Active Stall".....	17
I.5 Notions Théoriques Sur L'aérogénérateur	18
I.5.1 Coefficient De Puissance Cp.....	18
I.5.2 Couple Produit Par L'éolienne.....	18
I.5.3 Vitesse Spécifique De L'éolienne.....	19
I.5.4 Limite De Betz.....	19
I.6 Caractérisation Du Vent	23
I.6.1 Répartition instantanée de la vitesse du vent.....	23
I.6.2 Répartition Régional de la vitesse du vent	24
I.6.3 L'histogramme des vitesses de vent	25
I.6.4 Distribution de Weibull.....	25
I.6.4 Influence de la hauteur.....	26
I.7 Production Optimale D'énergie	27



I.8 Intérêt De La Vitesse Variable	29
I.9 Analyse De Sécurité	30
I.9.1 Cas des Eoliennes a Axe Horizontal.....	30
I.9.2 Cas des Eoliennes a Axe Vertical.....	31
I.10 Quelques Turbines Utilisé dans la Génération d'énergie Éolienne	33
I.10.1 La Turbine « AOC 15/50 50 HZ ».....	33
I.10.2 La Turbine « FUHRLANDER - FL30 ».....	34
I.10.3 La Turbine « GUAL - STATOEOLIEN GSE 4 ».....	35
I.10.4 La Turbine « WINDSIDE - WS-4 ».....	36
I.11 Recherches et Développements en Cours	37
I.12 Quelques Chiffres Prévisionnels	38
I.13 Exemples de Dimensionnements	39
I.13.1 Longueur d'une Pale et Vitesse Synchrone de la Génératrice.....	39
I.13.2 Relation Entre la Vitesse du Vent Nécessaire et la Hauteur de la Tour.....	41

Chapitre II : Chaînes de conversion électrotechniques

II.1 Systèmes Utilisant La Machine Synchrone	45
II.1.1 Machines Synchrone a électroaimants	45
II.1.2 Machines Synchrone a aimants permanents ou « MSAP ».....	46
II.2 Systèmes Utilisant La Machine Asynchrone	46
II.2.1 Machine Asynchrone A Cage D'écureuil.....	47
II.2.2 Machine Asynchrone A Double Stator.....	48
II.2.3 Machine Asynchrone A Double Alimentation (MADA).....	48
II.2.3.1 Machine Asynchrone A Double Alimentation Type " <i>Brushless</i> ".....	49
II.2.3.2 Machine Asynchrone A Double Alimentation Type « Rotor Bobiné ».....	49
a) MADA – Structure De Kramer.....	49
b) MADA à Energie Rotorique Dissipée	50
c) MADA – Structure De <i>Scherbius</i> Avec Cycloconvertisseur.....	50
d) MADA – Structure De <i>Scherbius</i> Avec Convertisseurs MLI.....	50
II.3 Machine à Réductance Variable	51
II.3.1 Machine A Réductance Variable A Double Saillance Excitée.....	51
II.3.2 Machine A Réductance Variable Non Excitée.....	52
II.4 Comparaison Entre les Convertisseurs Électromécanique	53



Chapitre III : Etude et simulation de la GAs à cage en mode isolé

III .1 Introduction	57
III .2 Équations de la Machine Asynchrone Triphasée	57
III .2.1 Rappel sur les lois de l'électromagnétisme.....	57
a- loi de <i>Faraday</i>	57
b- loi de <i>Ferraris</i>	57
III .2.2 Fonctionnements de la Machine Asynchrone à Cage.....	58
III .3 Modélisation Mathématique de la Génératrice Asynchrone	60
III .3.1 Les Hypothèses Simplificatrices.....	60
III .3.2 Modèle de la Génératrice Asynchrone dans le Repère Naturel (a.b.c).....	60
III .3.3 Modèle de la Génératrice Asynchrone dans le Repère de Park (dq).....	62
III .3.3.1 Transformation de Park.....	62
III .3.3.2 Équations de flux en coordonnées de Park.....	64
III .3.3.3 Équation de tension dans le référentiel de Park.....	64
III .3.3.4 Expression de couple.....	65
III .4 choix du Repère <i>dq</i>	65
III .4.1 Référentiel immobile par rapport au stator.....	65
III .4.2 Référentiel immobile par rapport au rotor.....	65
III .4.3 Référentiel immobile par rapport au champ tournant.....	65
III .5 Conditions d'auto Amorçage	66
III .6 Fonctionnement de la Génératrice asynchrone à « vide »	67
III .6.1 Capacité d'auto amorçage.....	67
III .6.2 Présentation de la Génératrice asynchrone à vide.....	69
III .6.3 Résultats de Simulation.....	71
III.6.3.1 Influence de la saturation.....	72
III.6.3.2 Influence de la capacité.....	72
a- Capacité Minimum d'Auto Amorçage.....	73
III.6.3.3 Influence du champ rémanent.....	74
III.6.3.4 Influence de la Vitesse.....	75
a- Variation soudaine de la vitesse.....	76
b- Vitesse Minimum d'amorçage.....	77
III .7 Fonctionnement de la Génératrice asynchrone en charge « R »	78
III .7.1 Présentation de la Génératrice asynchrone en charge « R ».....	81
III .7.2 Résultats de Simulation.....	82
a- Déconnection soudain de la charge « R ».....	84
b- Résistance minimum.....	85



III .8 Fonctionnement de la Génératrice asynchrone en charge « RL »	87
III .8.1 Présentation de la Génératrice asynchrone en charge "RL".....	87
III .8.2 Résultats de Simulation.....	89
III .8.3 Influence de la capacité.....	89
III .8.4 Influence de l'inductance.....	89
III .9 GAS à cage en charge résistive R avec Compensation série	94
III .9.1 Modélisation.....	94
III .9.2 Résultats de Simulation.....	96
III .10 Conclusion	98
 Chapitre IV : Etude et simulation de la GAs à double étoile en Mode isolé 	
III .1 Introduction	100
III .2 Description de la machine asynchrone double étoile	100
IV .3 Modélisation de la génératrice Asynchrone à double étoile	101
IV .3.1 Modèle de la GASDE dans le Repère Naturel (a.b.c)	101
IV.3.1.1 Équations Électriques dans le Repère Naturel (a.b.c).....	101
IV.3.1.2 Équations des Flux dans le Repère Naturel (a.b.c).....	102
IV.3.2 Modèle de la GASDE dans le Repère de Park (d,q).....	103
IV.3.2.1 Équations Électriques dans le repère « d,q ».....	103
IV.3.2.2 Équations Magnétiques dans le repère « d,q ».....	104
IV.4. Simulation de la GASDE à vide	105
Résultats de la simulation.....	107
Effet de la Capacité	110
Effet de la vitesse d'entraînement	111
IV.5. Simulation de la GASDE connectée à une charge R purement résistive ..	113
Résultats de la simulation.....	115
IV.6. Simulation de la GASDE connectée à une charge RL inductive	117
Résultats de la simulation.....	120
IV.7. Charges RL avec Compensation parallèle	124
Résultats de la simulation.....	126
IV.8. Conclusion	129



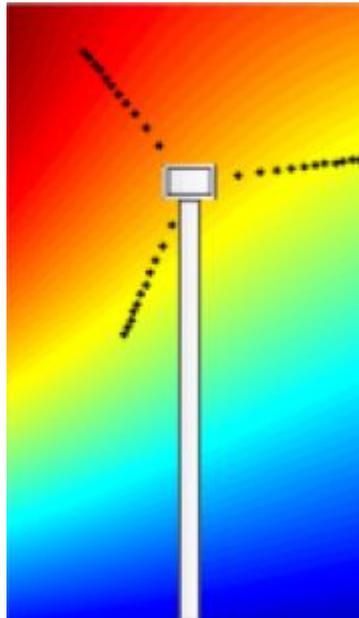
Chapitre V : Simulation de la chaine de conversion

V.1. Introduction	131
V.2. Présentation de l'environnement <i>Simulink</i>	131
V.3. Modèle d'éolienne avec Machine Asynchrone	132
V.3.1 Partie Aérodynamique (le Vent).....	132
V.3.2 Partie Mécanique	133
V.3.2.1 Modèle de la Turbine.....	133
V.3.2.2 Modèle du Multiplicateur.....	137
V.3.2.3 Modèle de l'arbre.....	137
V.3.3 Partie Électrique.....	139
V.4. Résultats de Simulation	144
V.5. Conclusion	147
Conclusion générale	148
Références	150
Annexes	154



CHAPITRE I

Généralités sur les Systèmes Éoliens





I.1 Introduction

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. La filière d'énergie renouvelable est partagée en trois grandes familles : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), l'énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique,...) en sachant qu'à l'origine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. En effet, la consommation mondiale d'énergie (*Fig 1-1*) ne cesse de croître, posant des questions cruciales sur l'effet de serre et l'amenuisement des ressources énergétiques.

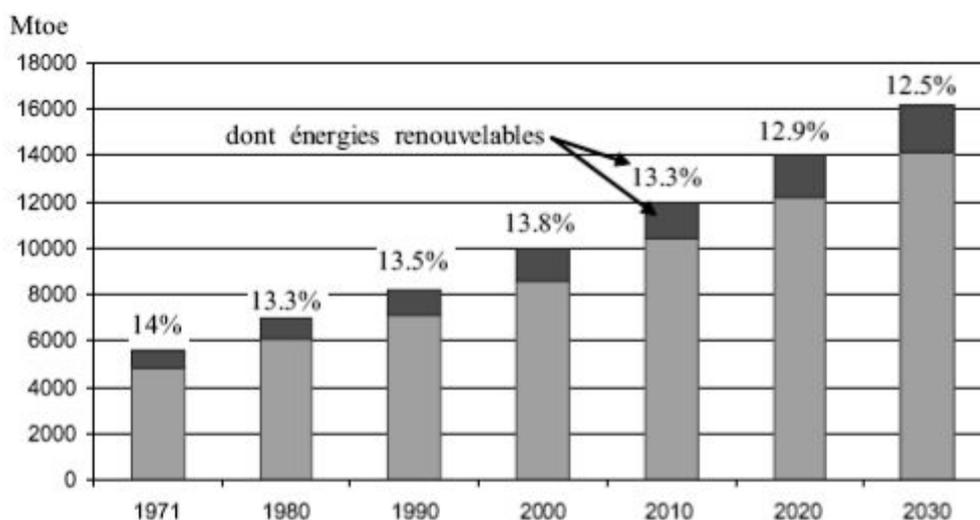


Figure (1-1): Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions [1].

Plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir de matières fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou fissiles pour l'énergie nucléaire. (*Fig 1-2*) montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. Ces **EnR**, pratiquement inépuisables et propres, sont intéressantes dans le contexte économique actuel où l'on ne chiffre qu'une partie des coûts en occultant certains « coûts collatéraux » (démantèlement de centrales, pollution,...).

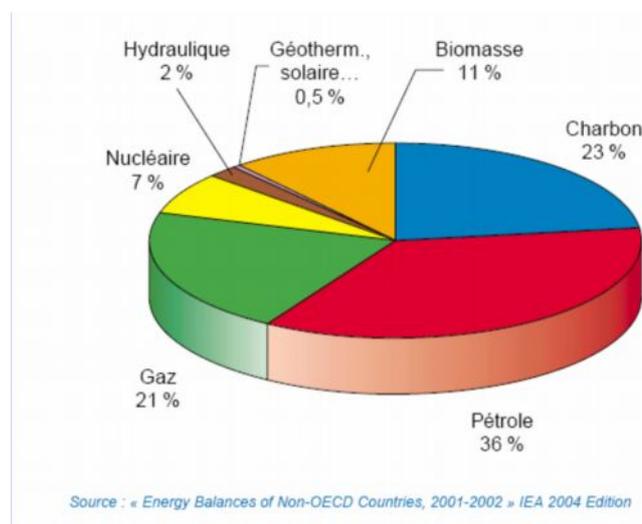


Figure (1-2): Répartition d'énergie primaire dans le monde [2].



I.2 Production d'Énergie Électrique à Partir des EnR

La majorité des sources traditionnelles sont extraites des gisements puis acheminées vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être très éloignées, ce qui influera sur les coûts. Par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation. C'est cette propriété qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable pour la production d'énergie électrique. La (Fig 1-3) donne une idée sur la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que des prévisions jusqu'à l'horizon 2030 [1].

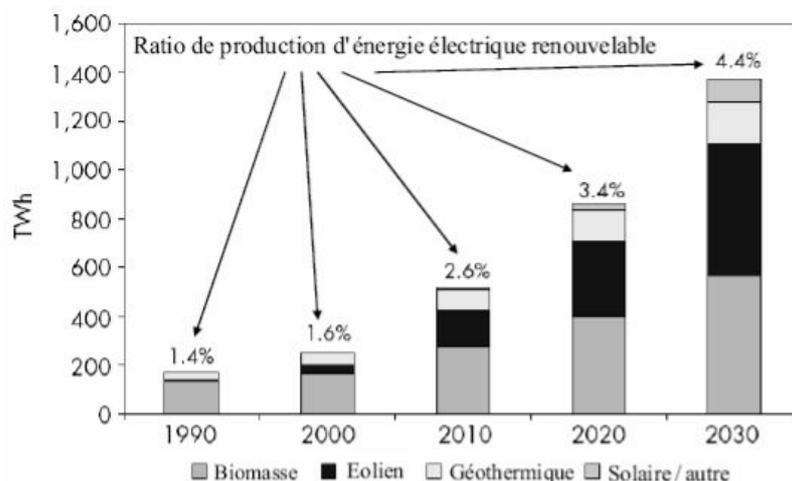


Figure (1-3): Estimation de la production mondiale d'électricité basée sur les EnR [1].

I.3 Principes et Eléments Constitutifs d'une Eolienne

I.3.1 Définition de L'énergie Eolienne

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées. Le système de conversion éolien est également siège de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion [3].

I.3.2 Historique de L'éolien

Depuis l'Antiquité, les « moulins à vent » convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement utilisée pour moulin du grain (Fig 1-4). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, souvent utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides ou abreuver le bétail. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à « Poul La Cour » en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisé (dans les années 40 au Danemark, 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces



fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite et il faudra attendre la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes.



Figure (1-4): Photographie de deux moulins à vent [3].

I.3.3 Données Chiffrées sur l'éolien

I.3.3.1 Compétition de l'éolien

Le potentiel des filières énergétiques renouvelables est sous-exploité. La (Fig 1-5) montre que les améliorations technologiques ont favorisé l'installation de l'énergie éolienne qui évolue de manière exponentielle, L'Europe est le leader sur le marché mondial de l'éolien Cette production assure la consommation électrique d'environ 10 millions de personnes.

Trois facteurs ont contribué à rendre la solution éolienne plus compétitive :

- ✓ les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance ;
- ✓ l'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes ;
- ✓ le financement des Etats pour l'implantation de nouvelles éoliennes.

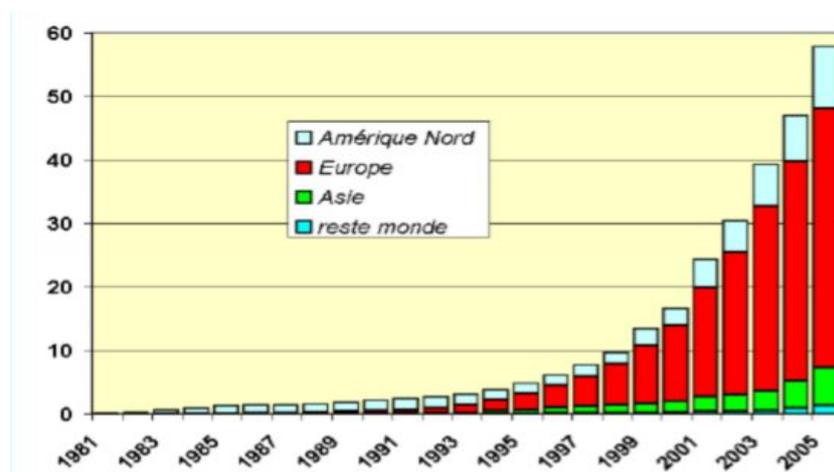


Figure (1-5): Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde en GW [3].



La raison de cette évolution est le protocole de *Kyoto* qui engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Cet accord a participé à l'émergence de politiques nationales de développement de l'éolien et d'autres énergies également car les éoliennes n'émettent pas de dioxyde de carbone. La répartition de l'énergie éolienne en Europe est donnée dans La (Fig 1-6) : l'Allemagne est le leader sur le marché européen malgré un ralentissement de ses installations en 2003 ; l'Espagne, en deuxième position, continue d'installer intensivement des parcs éoliens ; le Danemark est en troisième position avec le développement de l'offshore et renouvelle les éoliennes de plus de 10 ans.

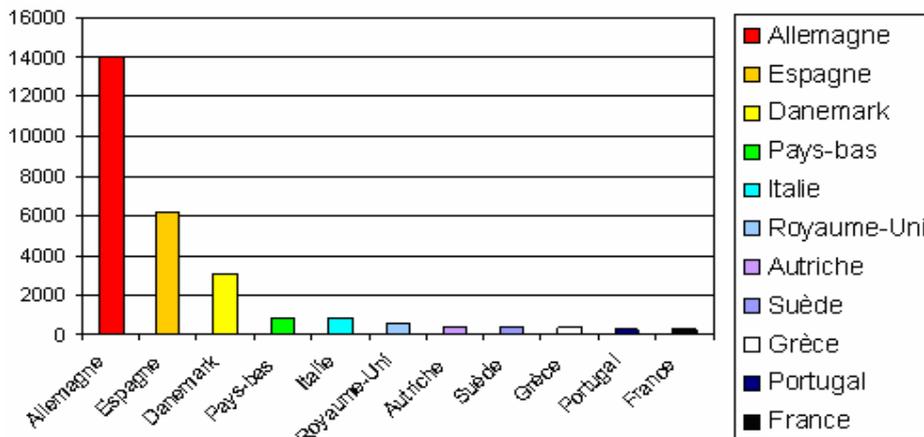


Figure (1-6) : Parcs en Europe en 2003 en MW [3].

I.3.3.2 Evolution des Coûts de Production

On estime que le coût d'installation d'un kW est d'environ 1000 euros. Les progrès technologiques et la production accrue d'éoliennes ces dernières années permettent de diminuer ce chiffre régulièrement (Fig 1-7). Le prix de revient du kWh dépend du coût de l'installation de l'éolienne ainsi que de la quantité d'électricité produite par an. Ce prix varie en fonction du site et diminue avec les avancées technologiques L'accroissement de la puissance moyenne des éoliennes et du volume des ventes (18 MW cumulés en 1981 et 10 GW en 1998) a conduit à une forte baisse du coût de production du kWh éolien et à des retours d'investissement de plus en plus courts. Selon les tarifs de rachat, le temps de retour est compris entre 4 ans (Allemagne) et 10 ans (Canada), en France, il varie entre 6 et 7 ans [12].

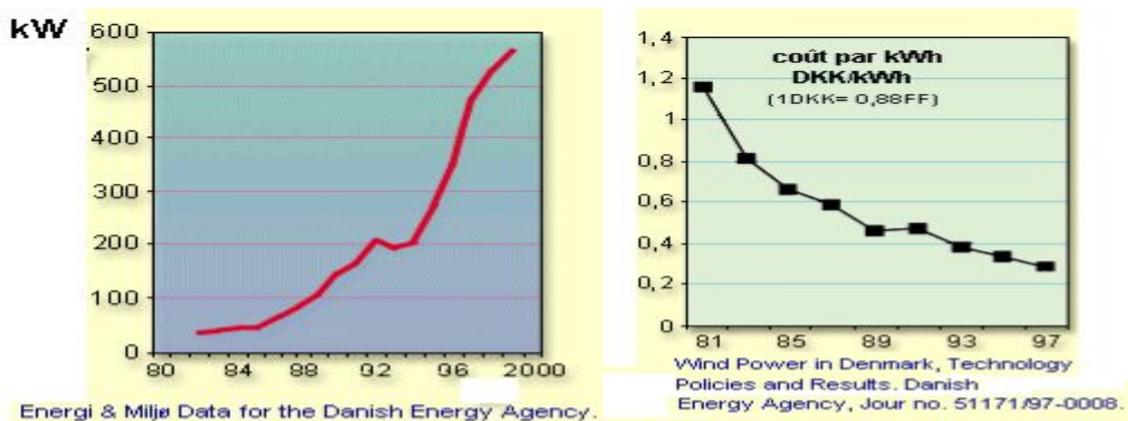


Figure (1-7) : Evolution de la puissance moyenne unitaire des machines et baisse des coûts du kWh (conditions : amortissement sur 20 ans, taux d'intérêt : 5%/an) [12].



Le coût global d'investissement dans une ou plusieurs éoliennes intègre :

- les études et le dimensionnement de l'installation ;
- l'obtention des autorisations nécessaires pour construire et raccorder au réseau électrique.
- l'achat du générateur et de sa tour.
- l'achat des équipements permettant de relier en toute sécurité l'éolienne et le réseau électrique.

Les éléments de coût recueillis auprès des constructeurs sont fournis dans le tableau suivant.

Société	Type	Prix (Euro)	Composants
AOC	AOC 15/50 50Hz	70110	Turbine, Mât (24m)
Auroville Energy Products	AWS 1500	5572	Turbine, Mât (18, 21 ou 23m), Batterie, Inverter
	AEP 5000	18161	Turbine, Mât, Batterie, Inverter
	AEP 10 000	30122	Turbine, Mât, Batterie, Inverter
Bergey Windpower Company	XL1	2657	Turbine, Mât (20m)
	BWC 1500	4428	Turbine
Eoltec	Sirocco 5,5-6	12000	Turbine
	Windrunner E10-25	30000	Turbine
Fortis Windenergy	Espada 800	4126	Turbine, Mât (12-24m), controller
	Passaat 1400	4747	Turbine, Mât (12-24m), controller
	Montana 5000	12840	Turbine, Mât (18m), controller
	Alize 10 000	47900	Turbine, Mât (18-36m), controller
Furhländer	FL 30	76000	Turbine, Mât (18-27m)
	FL 100	165000	Turbine, Mât (35m)
	FL 250	269000	Turbine, Mât (41,5-50m)
Gual	Stateoerien GSE 4	16000	Tout compris
Kestrel Wind Turbines	Kestrel 600	1711	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 800	2170	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 2000	4400	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 600	1711	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 800	2170	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 2000	4400	Turbine, Mât (9m)
Provenenergy	WT600	4555,2	Turbine, Mât (12m)
	WT2500	9767,4	Turbine, Mât (11m)
	WT6000	16738,9	Turbine, Mât (15m)
	WT15000	33434	Turbine, Mât (15m)

Table (1-1) : Les éléments de coût recueillis auprès des constructeurs [25]



I.3.4 Constitution d'une Eolienne « Classique »

Une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux [3]:

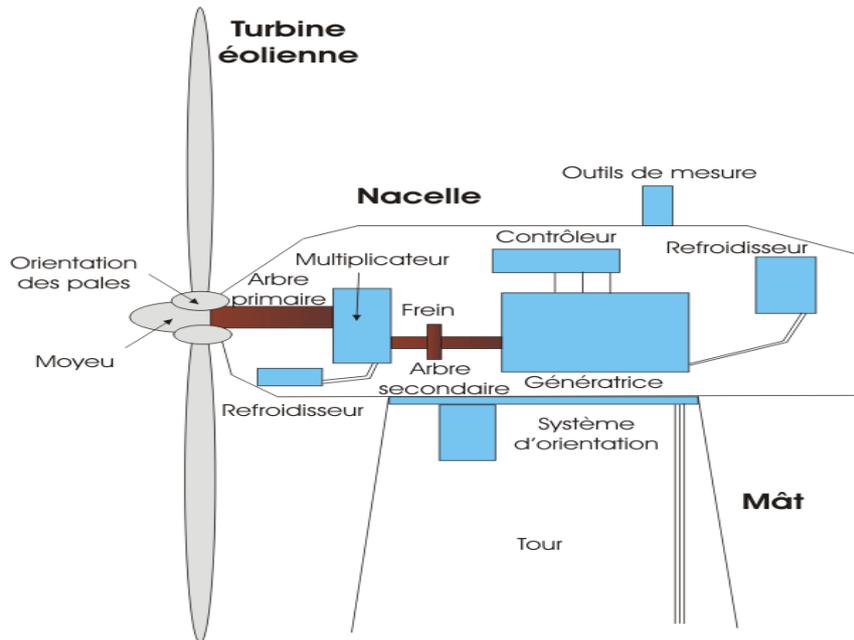


Figure (1-8): Principaux composants d'une éolienne [3].

- Le **mât**, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.
- La **nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent), la variation de la masse d'une nacelle en fonction de diamètre du rotor évolue de manière exponentielle selon la (Fig 1-9).

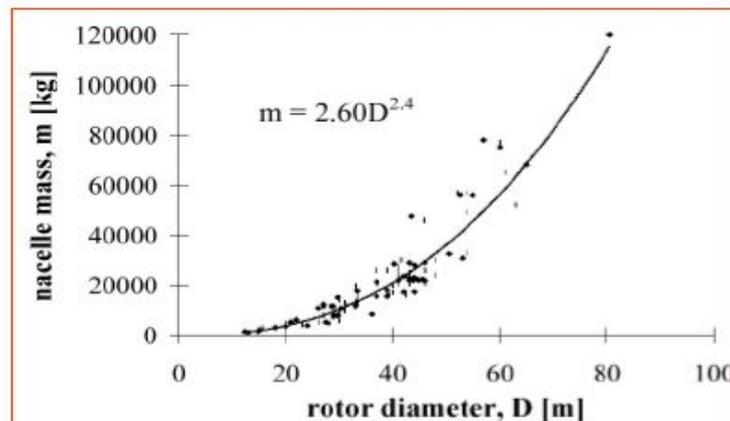


Figure (1-9) : variation de masse de la nacelle en fonction de diamètre du rotor [16].



- Le **rotor**, formé par les **pales** assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 (rotor tripale). Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constitués ; actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique. L'augmentation du diamètre du rotor va accroître la masse des pales comme indiqué (Fig 1-10) [3].

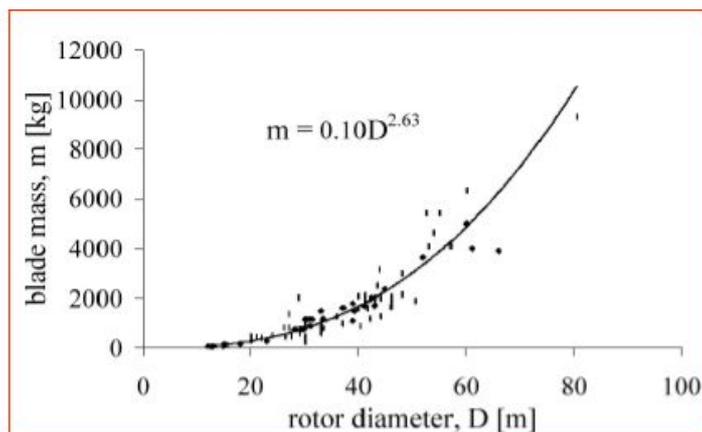


Figure (1-10): variation de la masse d'une pale en fonction de diamètre du rotor [16].

I.3.5 Modes d'installation et Différents Types d'éoliennes

Généralement il y a deux types d'installations des éoliennes : l'éolienne qui n'est pas raccordée au réseau dite « individuelle » est installée en site isolé ; le deuxième mode concerne les éoliennes regroupées sous forme de fermes éoliennes installées sur la terre ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes « offshore » où la présence du vent est plus régulière. Avec les fermes « offshore » on réduit les nuisances sonores et on améliore l'esthétique. Du point de vue structure, on distingue deux grands types d'éoliennes qui sont :

I.3.5.1 Eoliennes à Axe Vertical

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

- Le **rotor de Savonius**, dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (Fig 1-11) [3]. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

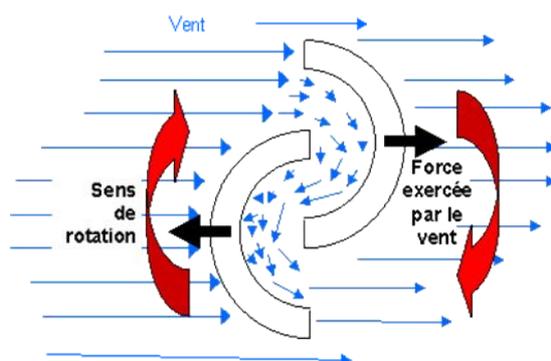


Figure (1-11): Schéma de principe du rotor de Savonius [3].

- **Le rotor de Darrius** est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil, placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif (Fig 1-12).



Figure (1-12): Schéma du rotor de Darrius [1].

I.3.5.2 Eoliennes à Axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement (Fig 1-12). Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (Fig 1-13):

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.



➤ **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

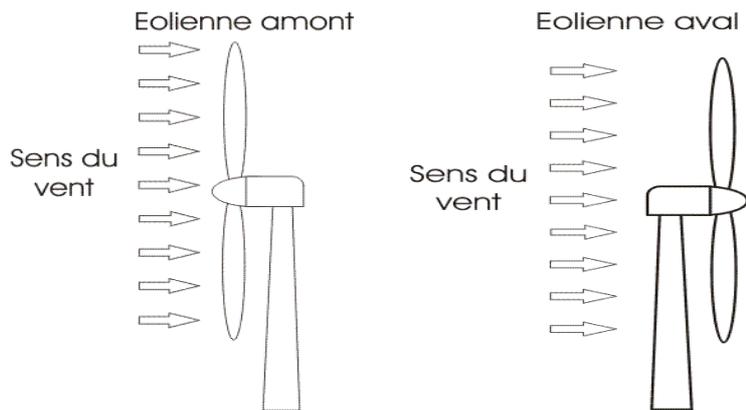


Figure (1-13): Types d'éoliennes à axe horizontal [3].

I.4 Fonctionnement d'une Pale d'éolienne

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement.

4.4.1 Description d'une aile ou d'une pale d'éolienne

La (Fig. 1-14) décrit une pale d'éolienne et identifie les différentes zones avec la terminologie appropriée

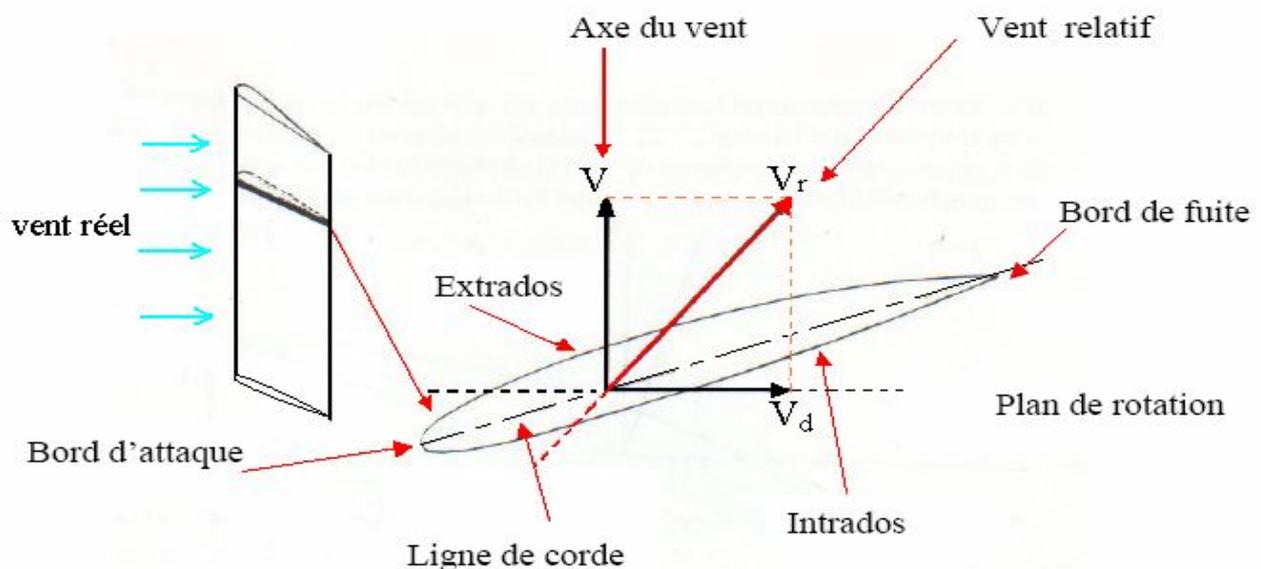


Figure (1-14) : Description d'une pale d'éolienne [27].



I.4.2 Triangle des Vitesses sur une Pale d'éolienne

Supposons qu'il n'y ait pas de vent et que la pale tourne malgré tout. Lors de sa rotation, la pale « voit » du vent arriver parallèlement à son plan de rotation. C'est le même phénomène que lorsque vous roulez à vélo lorsqu'il n'y a pas de vent. Vous sentez le vent « créé » par votre déplacement. Ce vent souffle dans votre visage.

Supposons maintenant que la pale ne tourne pas et que le vent souffle : la pale « voit » le vent arriver selon la direction du vent. Pour reprendre l'image de notre cycliste, vous ne roulez pas et le vent souffle sur votre côté. Vous ressentez donc le vent selon sa direction.

Supposons enfin que le vent continue de souffler dans la même direction et que la pale tourne dans son plan de rotation. La pale « voit » maintenant un vent qui est une combinaison des deux vents précédent, à savoir le vent réel et le vent dû à la rotation. Dans le cas de notre cycliste, ceci revient à rouler vite avec un vent de côté. Vous ressentez une combinaison du vent de face et de celui de côté. Ce vent de combinaison est le vent relatif. La figure (1-15) illustre le concept du vent relatif « vu » par la pale.

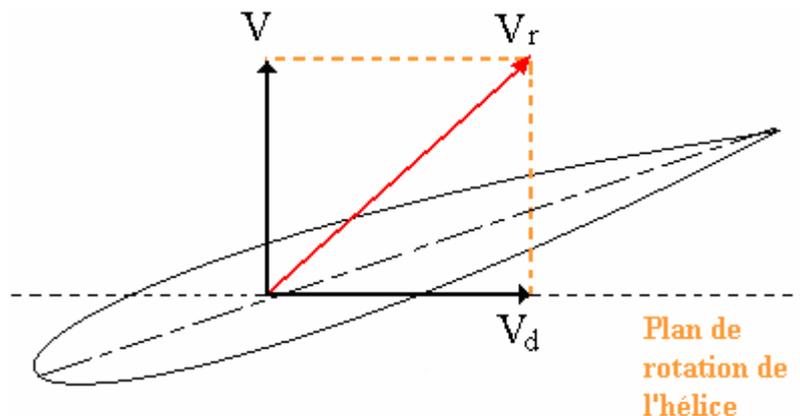


Figure (1-15) : Triangle des vitesses et vent relatif [27].

Ou :

V : vent qui souffle réellement.

V_d : vent dû à la rotation.

V_r : vent de combinaison ou vent relatif.

V_r est la résultante de V et V_d . La construction de résultantes forme un triangle, d'où le nom de *triangle des vitesses*. Lors du mouvement de rotation des pales, chaque point appartenant aux pales se déplace sur un cercle. Le rayon r du cercle, correspond à la distance depuis le centre de rotation. Plus le rayon du cercle sur lequel le point se trouve est grand, plus le point devra parcourir de distance à chaque tour, et donc, plus sa vitesse tangentielle, V_d , sera élevée. On peut écrire que, pour un régime, ω , de rotation des pales la vitesse tangentielle V_d sera :

$$V_d = r \cdot \omega$$

Tous les points d'une même pale n'ont donc pas la même vitesse tangentielle. Comme le vent relatif est une combinaison de la vitesse tangentielle et de la vitesse du vent, chaque section de la pale, selon sa distance du centre de rotation, ne « voit » pas le même vent relatif. Chaque section de la pale ayant un vent relatif différent, il faut que l'angle d'attaque soit lui aussi différent si l'on souhaite avoir la portance maximale dans chaque section. Afin de remplir cette condition, la pale est vrillée ou possède un gauchissement géométrique. Dans bien des cas, les pales des éoliennes de petite puissance, moins de 5 kW, ne possèdent pas de gauchissement géométrique. L'angle d'attaque est donc optimal pour une partie seulement de la pale. Des raisons de simplicité de fabrication et de coût peuvent expliquer ce choix.



I.4.3 Systèmes de Régulation de Vitesse d'une Eolienne

(a) Système à Décrochage Aérodynamique " Pitch "



Figure (1-16): Système d'orientation des pales [3].

Ce système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment (Fig1-16). C'est à dire il faut que varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

(b) Système à Décrochage Aérodynamique "Stall"

Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique (Fig1-17).

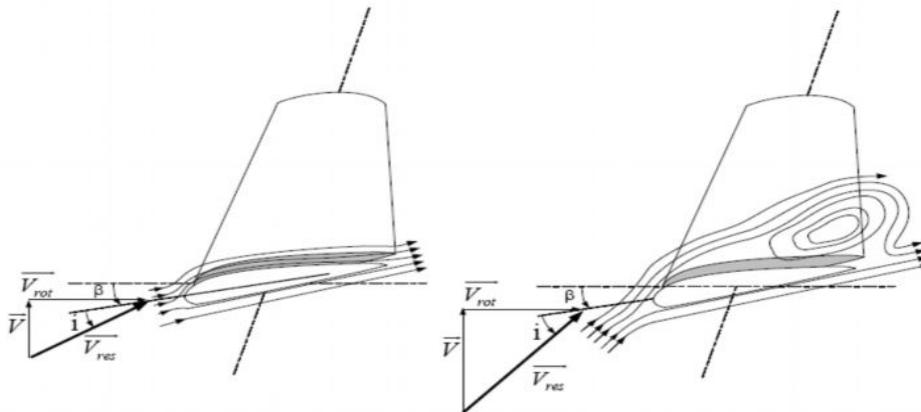


Figure (1-17): Flux d'air sur un profil de pale " stall " [7].

(c) Système a Décrochage Aérodynamique "Active Stall"

Ce dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation « stall » et de la régulation « pitch » afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique. On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances.



I.5 Notions Théoriques sur L'aérogénérateur

I.5.1 Coefficient de Puissance Cp

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface ($S=\pi R^2$ où R =rayon de pale) ; la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse V [m/s] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (1.1)$$

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance C_p dans le calcul de la puissance aérodynamique [3] :

$$P_{Turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (1.2)$$

Ou :

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$: masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer. Le coefficient C_p caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme étant le rapport :

$$C_p = (\text{puissance disponible sur l'arbre}) / (\text{puissance disponible (récupérable)}) \quad (1.3)$$

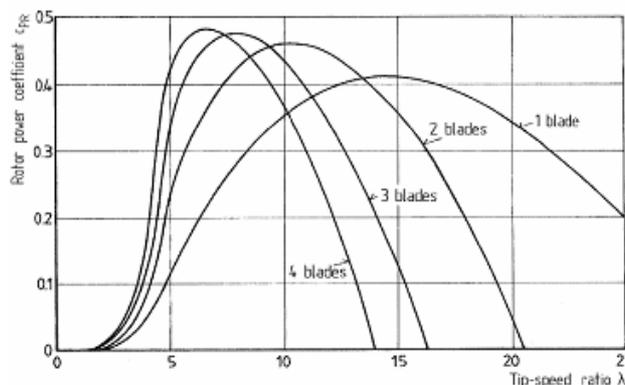


Figure (1-18): Coefficient de puissance [8]

I.5.2 Couple Produit par L'éolienne

$$\Gamma = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{\frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3}{\Omega} \quad (1.4)$$

Avec :

Ω : La vitesse de rotation de l'éolienne en [rd/s]



I.5.3 Vitesse Spécifique de L'éolienne

Dit aussi paramètre de rapidité ou encore rapport de vitesse en bout de pale (tip-speed ratio), comme étant le rapport de la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_{vent}} \quad (1.5)$$

I.5.4 Limite de Betz

La totalité de l'énergie ne peut pas être captée par l'éolienne car la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle. Donc une partie de l'énergie cinétique du vent n'a pas été captée. Le théorème du physicien allemand Betz montre que le maximum d'énergie récupérable dans le vent par le rotor est égal à $16 / 27$, soit environ 59 % de l'énergie totale du vent. La notion de coefficient de puissance C_p peut maintenant être présentée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse spécifique normalisée λ [3].

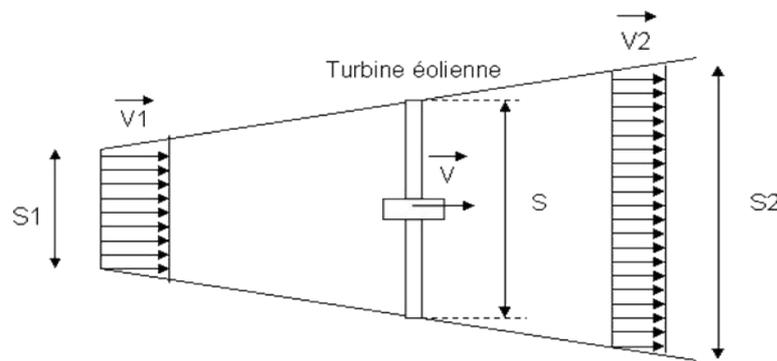


Figure (1-19): Tube de courant autour d'une éolienne [3].

La théorie de Betz modélise le passage de l'air avant et après les pales de l'éolienne par un tube de courant (Fig 1-19).

Avec:

V_1 : La vitesse du vent avant les pales de l'éolienne.

V : la vitesse du vent au niveau des pales de l'éolienne, de l'ordre de quelques m/s.

V_2 : la vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par les pales de l'éolienne

Où :

$V_1 > V > V_2$ Sont parallèles à l'axe du rotor.

La puissance récupérable du vent s'exprime par:

$$P = C_p \left(\frac{1}{2}\right) \rho S V^3 \quad (1-6)$$

On peut retrouver le $(C_p)_{max}$ en faisant une étude des puissances, sachant que :



- la puissance récupérable sur l'éolienne est due à la variation d'énergie cinétique du vent :

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2) \quad (1.7)$$

- d'autre part, l'effort qui s'exerce sur l'éolienne crée une puissance P_m ; le théorème de la quantité de mouvement donne :

$$F = \rho \cdot s \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.8)$$

Alors :

$$P_m = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \cdot V = \rho \cdot S \cdot V^2 (V_1 - V_2) \quad (1.9)$$

P_m : correspond à la puissance absorbée par le rotor, soit la puissance mécanique fournie à l'aéromoteur.

On peut déterminer la vitesse V_2 pour laquelle la puissance est maximale :

$P_m = \Delta E_C$ soit :

$$\rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2) \quad (1-10)$$

Par simplification :

$$V \cdot (V_2 - V_1) = \frac{1}{2} \cdot (V_2 - V_1) \cdot (V_2 + V_1) \quad (1-11)$$

Alors :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (1-12)$$

En reportant l'expression de V (1-12) dans l'expression (1-9) :

$$P_m = \rho \cdot S \cdot \frac{(V_1 + V_2)^2}{4} \cdot \rho \cdot S = \rho \cdot S \cdot \frac{(V_1 + V_2)}{4} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (1-13)$$

La puissance est maximale, pour V_2 telle que :

$$\frac{dP}{dV_2} = 0$$



Ce qui donne :
$$-3.V_2^2 - 2V_1.V_2 + V_1^2 = 0$$

On résout alors cette équation du second degré, d'inconnue V_2 . On obtient deux solutions : l'une est négative donc impossible et l'autre correspondant à

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \quad (1-14)$$

La puissance est maximale pour : $V_2 = \frac{V_1}{3}$

En reportant (1-12) et (1-14) dans l'expression (1-9) la puissance maximale P_{\max} devient :

$$P_{\max} = \rho.S.V_1^3 \cdot \left(\frac{8}{27}\right) \quad (1-15)$$

On déduit le coefficient de puissance maximal $C_{P_{\max}}$ pour une éolienne.

$$P_{\max} = \rho.S.V_1^3 \cdot \left(\frac{8}{27}\right) = \frac{1}{2} \cdot C_{P_{\max}} \cdot \rho.S.V_1^3$$

On trouve alors :

$$C_{P_{\max}} = \frac{16}{27} \approx 0,59 \quad (1-16)$$

Le coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent :

$$C_P = \frac{P_{Rotor}}{P_{Vent}}$$

En tenant compte de la limite de Betz, $C_{P_{\max}}$ vaut donc :

$$C_{P_{\max}} = \frac{P_{Rotor}}{P_{Vent}} = \frac{P_{Rotor}}{\frac{1}{2} \rho.A.v^3} = \frac{16}{27}$$

La puissance maximale du rotor sera égale à :

$$P_{MaxRotor} = \underbrace{\frac{16}{27}}_{C_{P_{\max}}} \cdot \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho.A.v^3}_{P_{vent}} \quad (1-17)$$

En tenant compte de tous les autres rendements d'une éolienne comme celui de la génératrice ou du réducteur, le rendement global d'une machine se situe autour de 50 % de la limite de Betz.



$$P_{\text{reelle, rotor}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1-18)$$

Pour conclure, dans bien des cas :

$$P_{\text{reelle, rotor}} = 0.3 \cdot P_{\text{vent}} \quad (1-19)$$

Les courbes de C_p (Fig 1-21) montrent l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal à 1, 2, 3 et 4 pales ; notons que sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0,59). Elles dépendent pratiquement du profil des pales. Si on considère la machine tripale, on peut dire que son coefficient de puissance est maximal pour $\lambda \cong 7$, c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse normalisée que l'on maximise le rendement aérodynamique. A diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation plus élevée qu'une tripale. Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée λ .

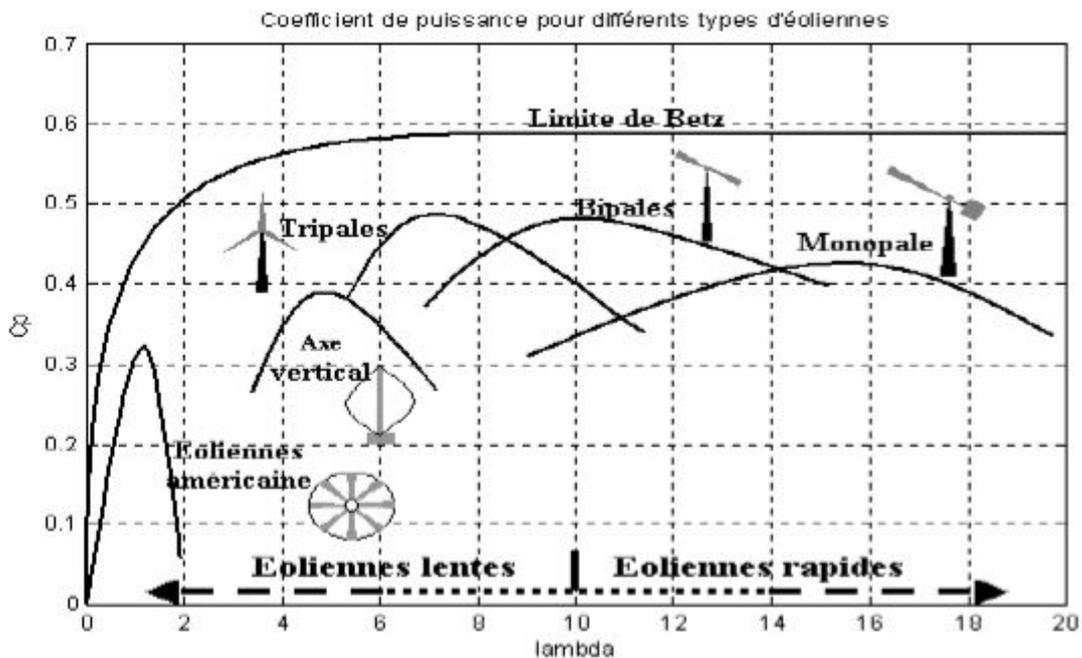


Figure (1-20): C_p en fonction de λ pour différentes turbines [7].

- D'après la (Fig 1-20), les courbes donnant le coefficient de couple dans les systèmes à axe vertical indiquent qu'il évolue de manière identique.
- Ces courbes $C_p(\lambda)$ montrent clairement l'avantage des axes horizontaux en terme de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,...).
- Les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les axes horizontaux à faible nombre de pales (3, 2, 1) par rapport aux axes verticaux ou aux multipales.



I.6 Caractérisation du Vent

I.6.1 Répartition instantanée de la vitesse du vent

Le vent souffle là où l'air présente des différences de température et de pression et se dirige toujours des hautes pressions vers les basses pressions. Si la terre ne tournait pas, l'air se déplacerait directement (en ligne droite) des centres de haute pression (anticyclone) vers les centres de basse pression (cyclone) mais à cause de cette rotation du globe, l'air est forcé de suivre une trajectoire courbe, légèrement infléchié vers la basse pression (force de Coriolis) [9]. Le choix géographique d'un site éolien est important dans un projet de production d'énergie éolienne. Pour déterminer l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien il faudrait déterminer les caractéristiques du vent dans ce site. Pour connaître les propriétés d'un site, nous devons faire des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps. Les figures ci-dessous montrent les variations des vitesses moyennes sur un site pour une période donnée.

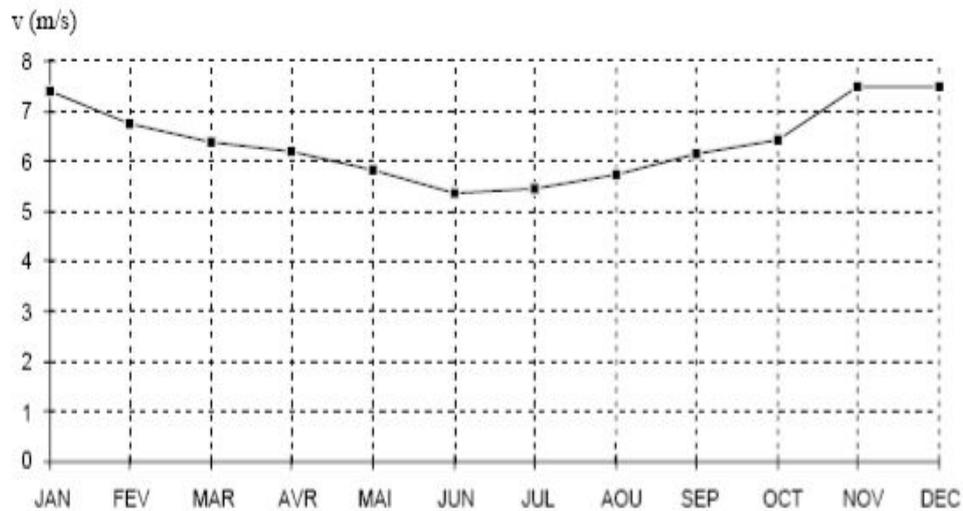


Figure (1-21-a): Variations des vitesses moyennes du vent sur 1 an [8].

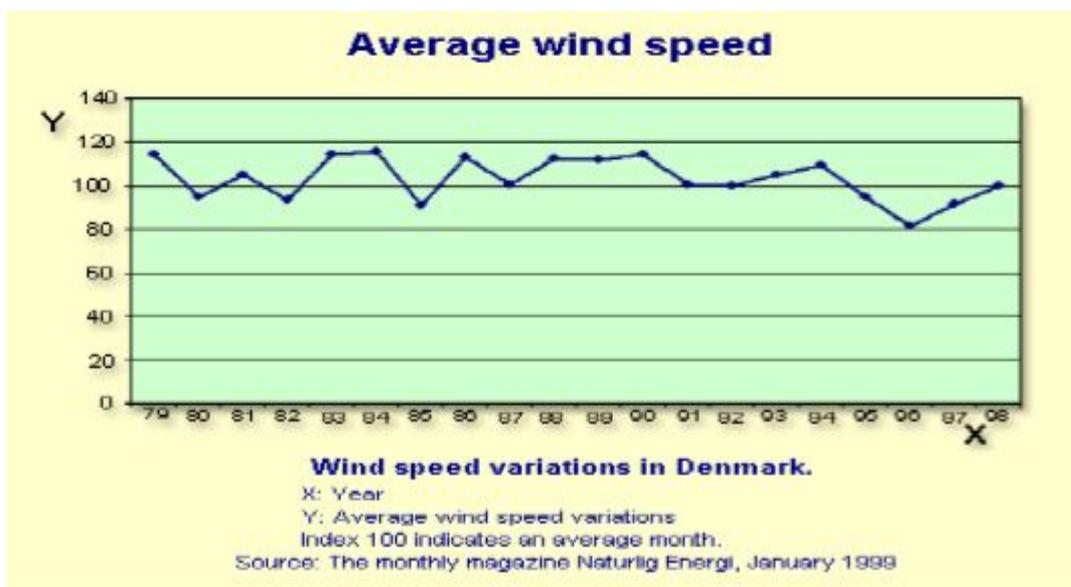


Figure (1-21-b): Variations des vitesses moyennes du vent sur 20 ans [8].



I.6.2 Répartition régionale de la vitesse du vent

Pour implantee une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire ; nous devons donc faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. La (Fig 1-22) montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d'« Energie Eolienne » du CDER.

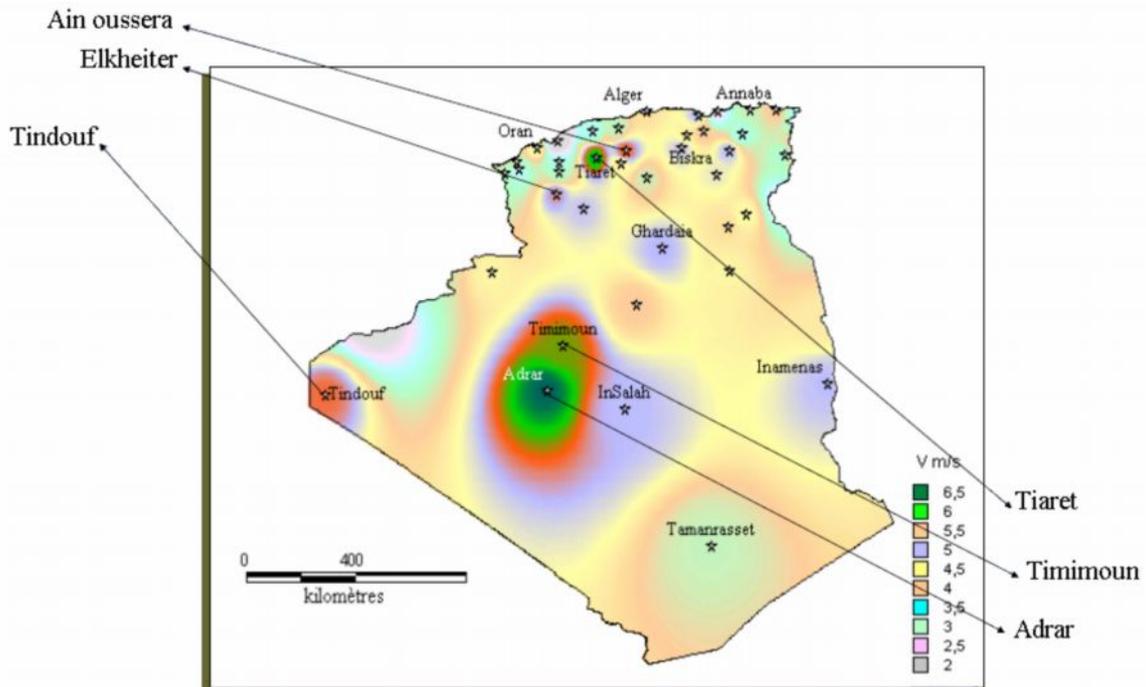


Figure (1-22): les régions ventées en Algérie [26]

D'après les données du CDER, la (Fig 1-23) indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie.

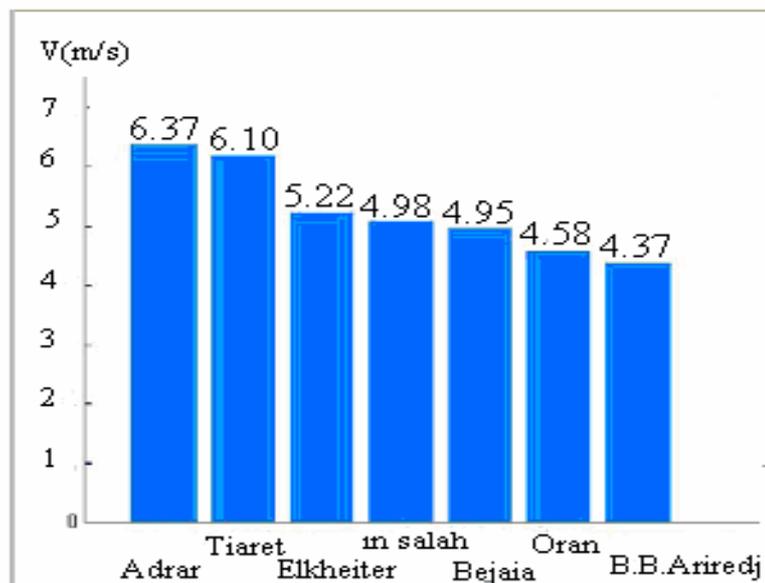


Figure (1-23): Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés [26].



I.6.3 L'histogramme des vitesses de vent

L'histogramme des vitesses des vents ou courbe de durée en vitesse du site est un outil important dans la caractérisation d'un site éolien. La courbe de durée en vitesse représente le temps durant lequel le vent se situe dans chaque fourchette ou palier de valeurs de vitesse. Par exemple, en disposant d'un ensemble N de valeurs mesurées de la vitesse du vent on détermine l'histogramme de la vitesse du vent (la courbe de distribution des vitesses du vent (*Fig 1-24*)) ; l'exemple de calcul est basé sur les données météorologiques de la station de Hassi Rmal [12].

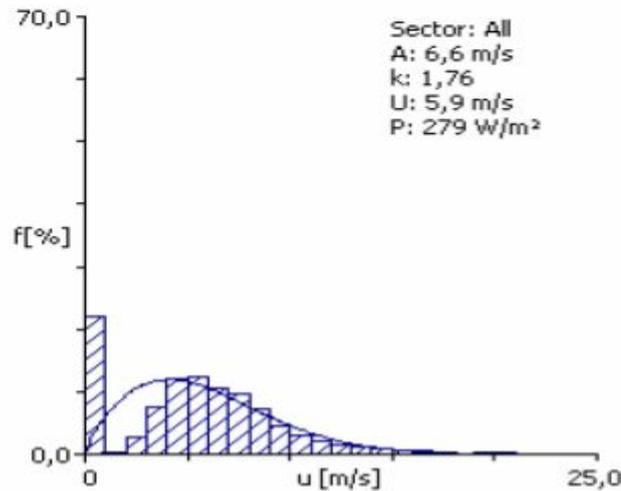


Figure (1-24): Courbe de densité de probabilité à Hassi Rmal donnée par Wasp [12].

I.6.4 Distribution de Weibull

On rappelle que la fonction de répartition $F(v)$ est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur v et que la densité de probabilité $f(v)$ est la dérivée de :

$$f(V) = \frac{dF(V)}{dV} \quad (1-20)$$

Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent. La fonction de répartition Weibull à deux paramètres c et k s'écrit :

$$f(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (1-21)$$

En utilisant la relation donnée par l'équation (1-18), il résulte la fonction de la densité de probabilité

$$f(V) = \left(\frac{k}{V}\right) \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^k \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (1-22)$$

Avec :

- k paramètre de forme caractérise la répartition du vent,
- c paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent (plus c est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses)
- V vitesse du vent « instantanée » (moyennée sur 10 mn).



L'étude statistique des données vent pour les sites de Tiaret, Adrar, et In-Salah donne le graphe suivant :

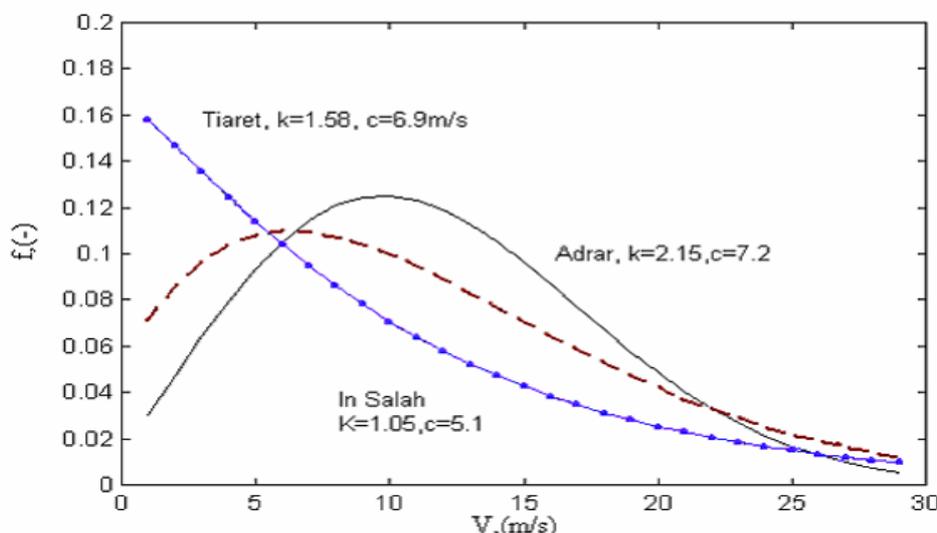


Figure (1-25): Eude statistique des données vent pour les sites de Tiaret, Adrar et In Salah [26]

I.6.5 Influence de la hauteur

Pour définir les caractéristiques d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur de mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent V augmente selon la hauteur h . L'expression (1.20) donne la méthode de ce calcul et on précise que h est la hauteur du mat et h_{mes} la hauteur des appareils de mesure.

$$V_v(h) = V_v(h_{mes}) \cdot \frac{\ln(h/\alpha)}{\ln(h_{mes}/\alpha)} \tag{1.23}$$

Le Tableau (1-2) les valeurs de rugosité α en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement.

Nature du sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0.002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0.0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0.003
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.	0.055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.	0.1
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.	0.2
Grandes villes avec bâtiments hauts	0.8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1.6

Table (1-2) : Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement [1].



Le tableau (1-3) donne un exemple de l'évolution du vent en fonction de la hauteur dans une région ventée par un « vent orographique » (vent existant au niveau d'une région indépendamment des effets de rugosité).

Hauteur	Vitesse moyenne estimée
90 m (vent orographique)	6,8 m/s
80 m	6,5 m/s
70 m	6,3 m/s
60 m	6,0 m/s
50 m	5,7 m/s
40 m	5,3 m/s
30 m	4,9 m/s
20 m	4,3 m/s
10 m	3,5 m/s

Table (1-3) : les vitesses de vent moyen en fonction de la hauteur [25].

I.7 Production Optimale d'énergie

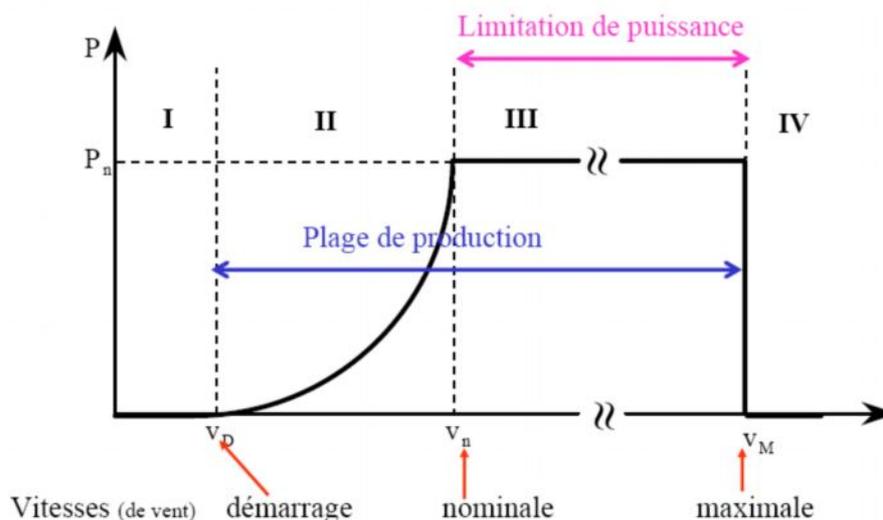


Figure (1-26): Régulation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [8].

Pour garantir un captage maximal de l'énergie incidente, il faut adapter en régularité la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent et l'angle d'incidence des pales. Sur la caractéristique d'exploitation d'une éolienne de la (Fig 1-26). Il existe quatre zones principales qui sont :

- la **zone 1**, où la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage V_D de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas.
- la **zone 2**, dans laquelle la vitesse du vent est comprise dans le domaine $[V_D, V_N]$ correspond à la conversion d'énergie éolienne. La zone où il est possible d'optimiser.
- la **zone 3**, où la puissance développée par l'éolienne est limitée à la puissance nominale P_n . En effet, au-delà de la « vitesse nominale » V_N du vent, le surcoût de dimensionnement



(puissance du générateur, résistance mécanique des structures) ne serait pas amorti par le gain de production.

- la **zone 4** lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne V_M . Dans ce cas, la turbine est arrêtée par le système d'arrêt d'urgence [4].

Il y a trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor :

a- La surface balayée par le rotor

Dépend directement de l'éolienne et de sa taille. Etant donné que la surface balayée par le rotor s'accroît avec le carré du diamètre du rotor, un doublement de celui-ci entraînera une récolte de $2^2 = 2 \times 2 =$ quatre fois plus d'énergie. La (Fig I-27) donne une idée sur la variation de la puissance unitaire en fonction du diamètre du rotor balayé ainsi que d'une prévision en 2010.

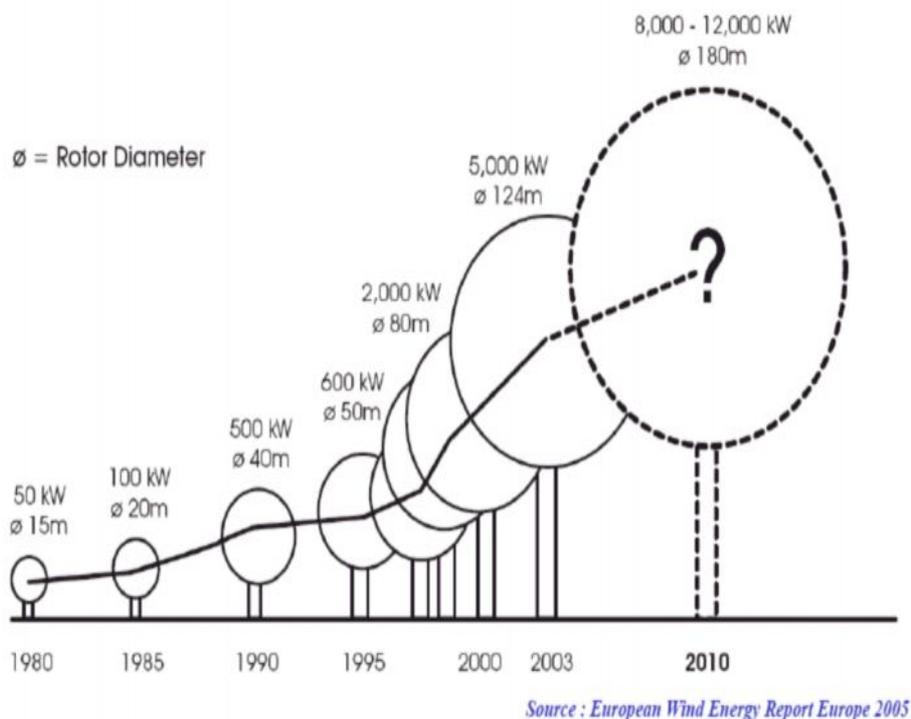


Figure (I- 27): Puissances selon les tailles des éoliennes [8].

b- La densité de l'air et la vitesse du vent

La capacité de production d'une éolienne se caractérise par sa courbe de puissance. Celle-ci fournit sa capacité de production (puissance en Watt) en fonction de sa vitesse de vent moyenne au niveau du moyeu (Fig I-27). Cette courbe de puissance dépend de la température moyenne annuelle du site, de l'altitude du site : la condition *standard* dans lesquelles elle est fournie avec une température moyenne de 15°C et une altitude de 0 m au-dessus de la mer. Dès lors l'énergie produite est l'intégration sur le temps de la courbe de puissance de l'éolienne. Cela s'exprime en fonction de la courbe de puissance P d'une éolienne et de la distribution V de vitesse par :

$$E = \int P(V(t)) \cdot dt \quad \text{en KWh/an}$$



L’atlas de la puissance énergétique récupérable à 50 m en Algérie est donné dans la figure ci-dessous

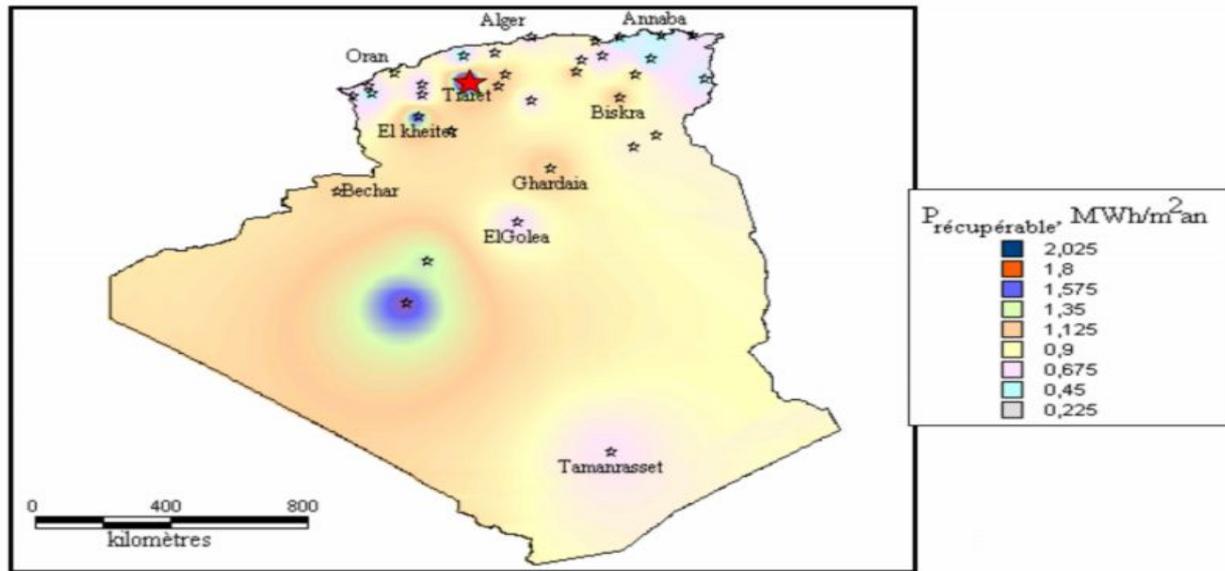


Figure (1- 28): Puissance énergétique récupérable à 50 m Algérie [26].

Une comparaison entre les sites ventés en Algérie est donnée dans la (Fig 1-29).

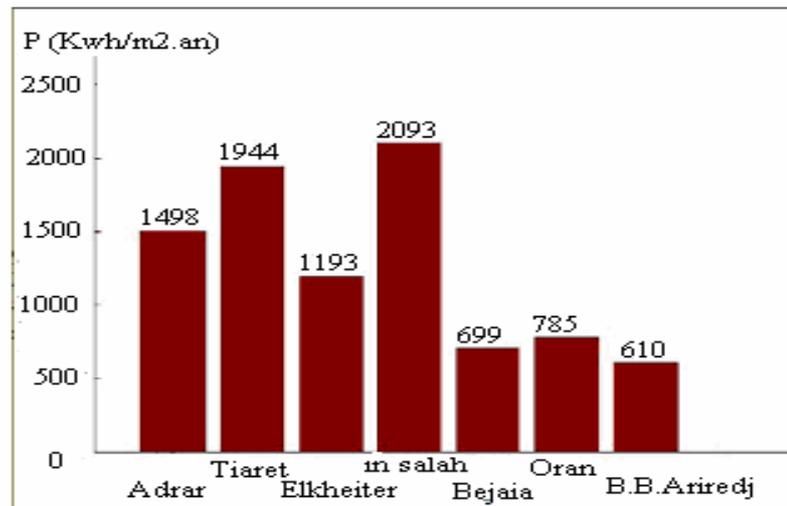


Figure (1- 29): Comparaison entre les vitesses cubiques des Sites Ventés [26]

I.8 Intérêt de la Vitesse Variable

En vitesse variable, on régle le système éolien de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le « **Maximum Power Point Tracking** » (MPPT). La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne $P(\Omega)$. Alors on peut réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance. La (Fig 1-30) montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du



vent. Typiquement, un réglage de vitesse dans une plage de 1 à 2 est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques

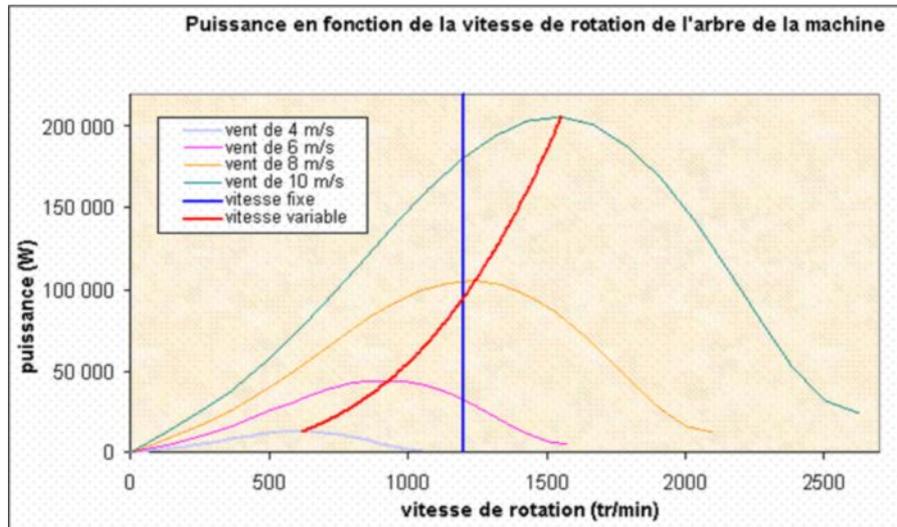


Figure (1-30): Caractéristique de l'éolienne [3]

En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent. Un système à deux vitesses de rotation est possible mais la vitesse variable électronique apporte beaucoup plus en terme énergétique.

I.9 Analyse De Sécurité

I.9.1 Cas des Eoliennes a Axe Horizontal

Cette étude est consiste à estimer l'impact d'un accident sur la sécurité des personnes. Le principal risque d'accident pouvant avoir un impact au-delà de la simple emprise au sol de l'éolienne est celui de l'éjection d'une pale ou d'un morceau de pale (Fig 1-31). Toutes les analyses menées ne tiennent pas compte des effets de portance aérodynamique sur les pales, mais uniquement des effets gravitationnels.

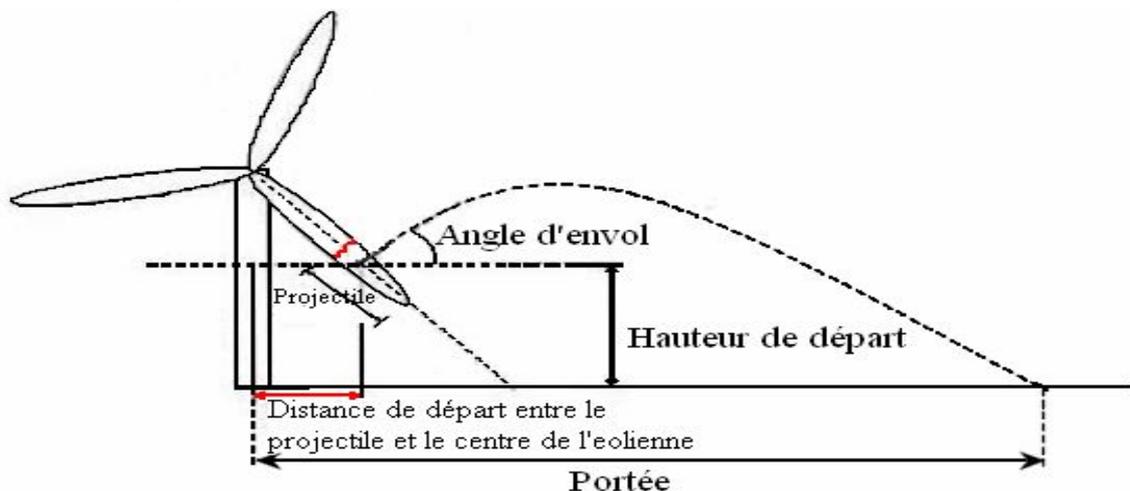


Figure (1-31): schéma illustre la portée de la pale pour une éolienne à axe horizontal [25].



Cette étude est réalisée pour les deux cas suivants :

- une pale d'éolienne qui se décroche ;
- un morceau de glace qui part d'une extrémité d'éolienne.

Eolienne	Hauteur du mat	Longueur de pale (m)	Eolienne implantée au sol				Eolienne implantée sur un bâtiment de 50 m de haut			
			Décrochage d'une pale		Ejection d'un morceau de glace		Décrochage d'une pale		Ejection d'un morceau de glace	
			Portée maximale (m)	Vitesse à l'impact (m/s)	Portée maximale (m)	Vitesse à l'impact (m/s)	Portée maximale (m)	Vitesse à l'impact (m/s)	Portée maximale (m)	Vitesse à l'impact (m/s)
AOC 15/50 50HZ	24	7,2	82	33,8	268	54,9	113	46,1	310	63,2
Auroville AWS 1500	21	1,5	147	40,9	530	73,7	185	51,5	576	80,1
Bergey XL1	20	1,25	123	37,9	439	67,3	160	49,1	484	74,2
Eoltec 5,5-6	24	2,75	149	41,7	443	68,1	187	52,2	488	74,9
Eoltec E10-25	24	5	159	43,2	571	77,1	198	53,3	617	83,2
Eoltec Chinook 17-65	32	8,5	142	42,7	485	72,5	178	53,0	530	78,9
Eoltec Chinook 15-75	32	7,5	142	42,6	485	72,3	178	53,0	530	78,8
Fuhrländer FL30	27	6,5	82	34,3	264	54,7	113	46,5	306	63,0
Fuhrländer FL100	35	10,5	97	38,2	305	59,7	127	49,4	347	67,5
Fuhrländer FL250	50	14,75	133	45,1	417	70,0	164	54,9	459	76,7
Vergnet GEV 5/5	18	2,5	133	39,0	483	70,5	171	50,0	529	77,1

Table (1-4) : portée maximale lors de l'injection d'une pale [25].

Dans le (tab 1-4) ont déterminés la portée maximale et la vitesse à l'impact dans les deux cas. La portée maximale ne dépend au premier ordre que du produit (rayon de la pale x vitesse de rotation) qui augmente fortement pour de petites éoliennes car celles-ci peuvent avoir des vitesses de rotation très importantes. Or la probabilité de casse de pale n'est pas un phénomène complètement marginal, puisque sa probabilité d'occurrence est estimée à 0,1% sur une période de 15 ans par éolienne.

I.9.2 Cas des Eoliennes à Axe Vertical

L'analyse a été menée pour une pale d'éolienne qui se décroche. La (Fig 1-32) illustre la portée de la pale

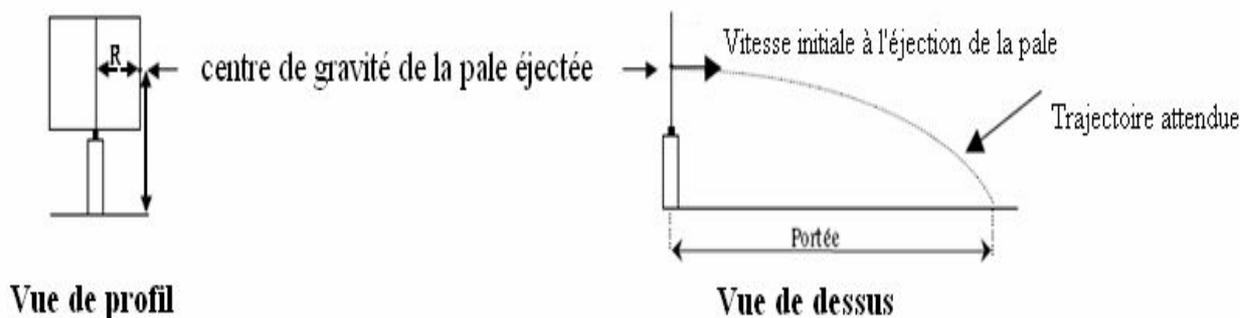


Figure (1-32): schéma illustre la portée de la pale pour une éolienne à axe vertical [25].



La valeur de portée obtenue en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne, pour différentes valeurs de position du centre de gravité de la pale éjectée (R, H) est donnée par la (Fig 1-33).

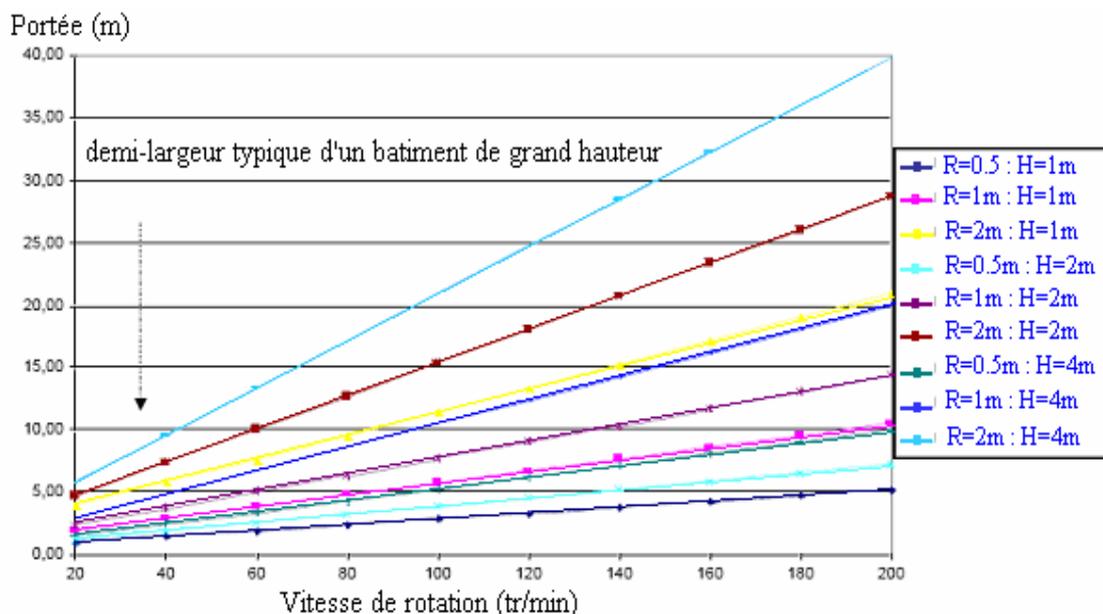


Figure (1-33): Variation de portée en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne [25].

Le graphe précédent montre que dans les régimes de fonctionnement où il y a une vitesse de vent comprise entre 3 et 25 m/s, les pales qui ont un centre de gravité éloigné de moins de 1 m de l'axe de rotation ont la quasi-certitude de ne pas être éjectées à une distance supérieure à 12 m. Cette distance est également la demi-largeur typique d'un bâtiment de grande hauteur. Autrement dit, une pale qui se rompt retomberait sur le toit du bâtiment. Le problème de sécurité lié à l'éjection de pale est donc fortement réduit dans le cas d'éoliennes à axe vertical.



I.10 Quelques Turbines Utilisées dans la Génération d'Énergie Éolienne.

I.10.1 La Turbine « AOC 15/50 50 HZ »

C'est une Éolienne à axe vertical américaine de 60 kW présentée dans sa version 50 Hz (55 kW). Sa conception est proche de celle des éoliennes de grande puissance. Plus de 8 exemplaires sont en fonctionnement à travers le monde (Etats-Unis, Europe, Afrique). La société fabricante a été en liquidation avant d'être rachetée récemment par des investisseurs canadiens.

Rotor	<ul style="list-style-type: none"> - Type de rotor : Axe horizontal - Nombre de pales : 3 - Vitesse de rotation : 65 tr/min - Surface balayée : 177 m² - Vent de démarrage : 4,6 m/s - Vent extrême : 59,5 m/s - Type de régulation : Stall
Pales	<ul style="list-style-type: none"> - Longueur : 7,2 m - Matériau : Epoxy /Fibre de Verre - Poids : 150 kg
Génératrice	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance nominale : 60 kw - Tension nominale : 400V - Type : 3 phases, 4 pôles asynchrones - Vitesse de rotation : 1800 tr/min à 60Hz - Poids : (rotor + génératrice) 2420 kg
Tour / Support	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur 24 m - Poids 3210 kg
Autres	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'exemplaires installés : Plus de 8 - Prix: catalogue : 70110 dollars (turbine et tour) - Maintenance : Semi annuelle
Fabricant	- Atlantic Orient Corp



Figure (1-34-a): Photographie de « AOC 15/50 50 HZ » [25].



I.10.2 La Turbine « FUHRLANDER - FL30 »

Éolienne fiable commercialisée depuis 15 ans identique au niveau technologique des éoliennes de grande puissance.

Rotor	<ul style="list-style-type: none"> - Type de rotor : Axe horizontal - Nombre de pales : 3 - Vitesse de rotation : 47/ 71 tr/min - Surface balayée : 133 m² - Vent de démarrage : 2,5m/s - Vent extrême : 55m/s - Type de régulation : Stall - Poids : 640 kg
Pales	<ul style="list-style-type: none"> - Longueur : 6.5m
Génératrice	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance nominale : 30 kw - Tension nominale : 400V (50/ 60 Hz) - Type : asynchrone - Vitesse de rotation : 1000/ 1500 tr/min - Poids : (rotor + génératrice) 1200 kg
Tour / Support	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur : 18/ 27 m - Poids : 2100/ 3000 kg
Autres	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'exemplaires installés : Plus de 4 - Prix catalogue : 76000 dollars (turbine +t mat)
Fabricant	- Fuhrlander –Allemagne



Figure (1-34-b): Photographie de « FUHRLANDER - FL30 » [25].



I.10.3 La Turbine « GUAL - STATOEOLIEN GSE 4 »

Éolienne à axe vertical s'intégrant sur tout types de bâtiments (privés, collectifs, commerciaux, administratifs, industriels, buildings, ...)

Rotor	<ul style="list-style-type: none"> - Type de rotor : Axe vertical - Nombre de pales : Stator :12 Rotor :8 - Vitesse de rotation: de 0 a 120 tr/min - Surface balayée : 6 m² - Vent de démarrage : 2m/s - Vent extrême : 70m/s - Type de régulation : électronique - Poids : 500kg
Pales	<ul style="list-style-type: none"> Longueur : 1,5m Matériau : PVC ou acier ou inox Poids : Stator : 3 Kg , Rotor : 7 Kg
Génératrice	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance nominale 13500w - Type Synchrone aimants permanents - Vitesse de rotation 1000/ 1500 tr/min - Poids (génératrice) 80kg
Tour / Support	- hauteur : Support urbain
Fabricant	GUAL Industrie – France



Figure (1-34-c): Photographie de « GUAL - STATOEOLIEN GSE 4 » [25].



I.10.4 La Turbine « WINDSIDE - WS-4 »

Éolienne verticale, résiste à des conditions extrêmes (températures, vent, humidité). Produit jusqu'à 60m/s. Connexion réseau et charge de batteries. Très peu bruyante.

Rotor	<ul style="list-style-type: none"> - Type de rotor : Axe vertical - Nombre de pales : 2 - Surface balayée : 4 m² - Vent de démarrage : 1,5m/s - Vent extrême : 60m/s - Type de régulation : électronique - Poids : 660kg
Pales	<ul style="list-style-type: none"> - Longueur : 4760/1020 mm - Matériau : Acier / composite. - Poids : 40 Kg
Génératrice	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance nominale : 1500w - Tension nominale : 1- 400 V/12, 24,48 V - Type : Synchrones aimants permanents - Poids : (total de l'éolienne) 700kg
Tour / Support	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur Défini par le besoin
Autres	<ul style="list-style-type: none"> Nombre d'exemplaires installés : 15 dans 6 pays.
Fabricant	Windside - Finlande



Figure (1-34-d): Photographie de « WINDSIDE - WS-4 » [25.]



I.11 Recherches et Développements en Cours

a) Éolienne Turby

L'université de Delft « Pays-Bas » a un département où plusieurs enseignants travaillent sur la problématique de l'éolien urbain. Après des études théoriques ayant montré que le productible généré par certaines formes d'éoliennes de type Darrieus était amplifié lorsque celle-ci est placée sur le toit d'un immeuble, le développement de ce type d'éolienne a été entrepris. Celui-ci est en cours (Fig 1-35-A).



Figure (1-35 –a): Photographie d'un éolienne Turby [25].

Cette éolienne doit encore être testée en environnement réel. Ses caractéristiques techniques sont les suivantes :

- amplification du rendement énergétique par rapport au flux normal : entre 1,7 et 2,3 ;
- masse : rotor : 90 kg ; tour : 230 kg ;
- encombrement : tour de 5 m + rotor de 3 m de haut pour 1 m de rayon ;
- puissance 2,5 kW.

b) Le système WARP

Le système WARP fait l'objet d'appels d'offres pour des licences de fabrication et de marketing. Le système se compose de modules empilables sous forme de tours dans lesquels le vent est amplifié avant de faire fonctionner des hélices éoliennes. Le système est même prévu pour pouvoir utiliser des cellules photovoltaïques comme matériau externe (Fig 1-35-B) [5].



Figure (1-35–b): Photographie d'un éolienne WARP [5].



c) Le Système des éoliens multirotors

L'entreprise SELSAM, a conçu une éolienne comportant 7 rotors de 3 pales d'un diamètre de 2,1m fournissant une puissance de 6 kW. L'arbre (la tige sur laquelle sont placés les rotors) n'est pas parallèle au sol mais penchée, afin d'éviter les perturbations du flux d'air d'un rotor sur un autre (Fig 1-35-C) [5].



Figure (1-35 -c): Photographie d'une éolienne multirotor [5].

b) Le Système KiteGen

Des chercheurs italiens ont un projet de générateur électrique éolien mû par des cerfs-volants ("kites" en anglais) qui montent jusqu'à 2000 m et qui par leurs mouvements rotatifs font tourner un "moulin à vent" horizontal et pourrait générer beaucoup de courant. D'après ses concepteurs ce sera beaucoup plus rentable que les solutions actuelles (Fig 1-35-D).



Figure (1-35-d): Photographie de « AOC 15/50 50 HZ » [5].

I.12 Quelques Chiffres Prévisionnels :

➤ Rapport Wind-Force 12 (mai 2004)

En 2030 : - la puissance mondiale installée varie entre 2700 GW et 6620 TWh.
 - Prix plancher est entre 2,3 c€/kWh – 0,474 €/W.
 En 2038 : la puissance installée varie entre 3238 GW et 8510 TWh.

➤ Rapport Retombées économiques et environnementales

En 2020 : le secteur éolien fournirait 12% de l'électricité mondiale.
 - générerait 2,3 M emplois.
 - éviterait 11 G tonnes de CO2.

➤ Rapport European Wind Energy Association [EWEA]

En 2010 : Plus de 100 GW au monde (10 GW offshore Plus de 70GW en Europe.



I.13 Exemples de Dimensionnements

I.13.1 Longueur d'une Pale et Vitesse Synchrone de la Génératrice

Pour obtenir une énergie électrique de puissance $P_{elec}=18$ kW à l'aide d'une éolienne, avec les données :

- Le vent qui circulant dans cette région est d'une vitesse $V= 6.5$ m/s.
- La machine est tripale et fonctionne à vitesse fixe.
- La turbine de l'éolienne entraîne une génératrice asynchrone (avec un rendement de $n_{(g)} = 0.8$ et un glissement de $g = -1\%$) et un multiplicateur de vitesse (avec un rendement de $n_{(m)} = 0.9$ et un coefficient de multiplication $K=30$).

Dimensionnement des différents éléments :

a- Dimensions de l'aéromoteur

a-1 la puissance mécanique nécessaire :

$$P_{ele} = P_m \cdot n_m \cdot n_g \Rightarrow P_m = \frac{P_e}{n_m \cdot n_g}$$

Avec:

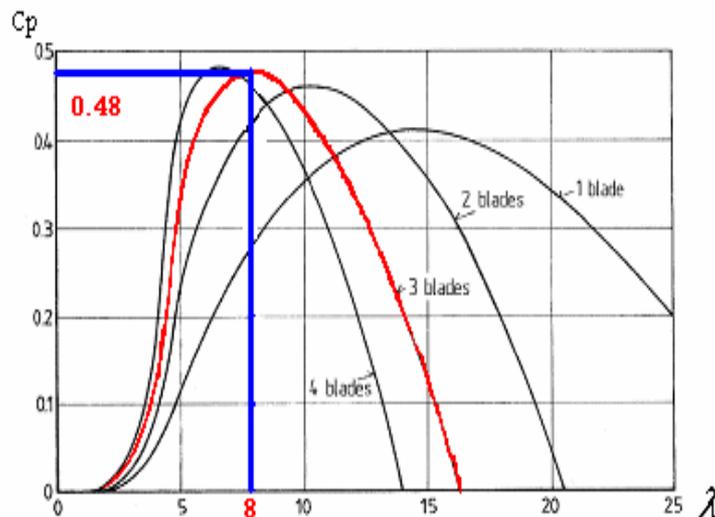
$$\begin{aligned} n_m &= 0.9 \\ n_g &= 0.8 \\ P_{ele} &= 18 \text{ kW} \end{aligned}$$

AN :

$$P_m = 18000 / (0.8 \times 0.9) = 25 \text{ kW}.$$

a-2 Coefficient de puissance C_p :

Pour déterminer les valeurs de C_p et λ on peut utiliser les courbes ci-dessous





a-3 La Longueur de pale:

- pour capter une puissance maximale il s'agit de choisir la valeur maximale du coefficient de puissance $C_{pmax} = 0.48$

- la puissance mécanique s'exprime par:

$$P_m = C_p \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \Rightarrow S = \frac{2 \cdot P_m}{C_p \cdot \rho \cdot V^3}$$

Avec:

$$P_m = 25 \text{ kW.}$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg / m}^3$$

$$V = 6.5 \text{ m/s,}$$

$$C_p = 0,48$$

AN:

$$S = \frac{2 \times 25000}{1,25 \cdot 0,48 \cdot (6,5)^3} = 303.5 \text{ m}^2$$

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

$$R = 10 \text{ m}$$

b- Dimensions de la génératrice

b-1 La vitesse de l'arbre primaire de l'éolienne Ω_L en rad/s et N_L en tr/min

D'après la figure précédente ($C_p = 0.48$ et $\lambda = 8$) et à partir de la formule :

$$\lambda = \frac{R \Omega_L}{V} \Rightarrow \Omega_L = \frac{\lambda \cdot V}{R}$$

Avec:

$$\lambda = 8$$

$$V = 6.5 \text{ m/s}$$

$$R = 10 \text{ m}$$

AN:

$$\Omega_L = 5.23 \text{ rad/s.}$$

$$N_L = \frac{\Omega_L \cdot 60}{2\pi} = 50 \text{ tr/min.}$$

b-2 La vitesse du rotor de la génératrice Ω en rad/s, et N en tr/min

D'après la formule :

$$\Omega = K \cdot \Omega_L$$

Avec:

$$K = 30$$

$$\Omega_L = 5.23 \text{ rad/s}$$



AN:

$$\Omega = 157 \text{ rad/s}$$

$$N = \frac{\Omega \cdot 60}{2\pi} = 1500 \text{ tr/min}$$

Finalement, pour installer une éolienne qui donne une puissance électrique $P_{ele} = 150 \text{ Kw}$, il faudrait choisir les dimensions suivantes :

➤ **Dimensions de l'aéromoteur :**

- La vitesse du vent dans cette région est supérieure à la vitesse $V = 6,5 \text{ m/s}$.
- L'éolienne est tripale.
- La longueur des pales est égale à 10 m .

➤ **Dimensions du multiplicateur :**

- le rapport de multiplication de ce multiplicateur est de $K = 30$.
- Le multiplicateur est fonctionné avec un rendement de $n_m = 0.9$

➤ **Dimensions de la génératrice :**

La Génératrice fonctionne à une vitesse fixe supérieure à la vitesse synchrone $N_S = 1500 \text{ tr/min}$ (glissement négatif $g = -1\%$) avec un rendement de $n_{(g)} = 0.8$.

I.13.2 Relation Entre la Vitesse du Vent Nécessaire et la Hauteur de la Tour

Pour placer une éolienne dans une zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m et une vitesse du vent mesurée à la hauteur de $h_{mes} = 1 \text{ m}$ égale à $V_{mes} = 8 \text{ m/s}$ il est nécessaire de choisir la hauteur de la tour qui donne la vitesse nécessaire.

Pour obtenir une puissance électrique $P = 101 \text{ Kw}$ dans cette zone avec les données suivantes :

- L'éolienne utilisée est tripale avec un diamètre du rotor $D = 2R = 20 \text{ m}$
- La génératrice fonctionne avec un rendement $n_g = 0.8$ et une vitesse de synchronisme $N_S = 1500 \text{ tr/min}$.
- Le multiplicateur caractérisé par un rapport de multiplication $K = 20$ et en rendement $n_m = 0.9$.

Nous allons procéder selon les étapes suivantes :

- **Calculer la puissance mécanique nécessaire :**

$$P_e = P_m \cdot \eta_m \cdot \eta_g \Rightarrow P_m = \frac{P_e}{\eta_m \cdot \eta_g}$$

Avec :

$$n_g = 0,8$$

$$n_m = 0,9$$

$$P_{ele} = 101 \text{ kW}$$



AN :

$$P_{mec} = 140,3 \text{ kW.}$$

- Calculer le coefficient de puissance maximale C_p :

D'après les courbes précédentes pour une éolienne tripale ($C_p = 0,48$ et $\lambda = 8$)

- Calculer la vitesse nécessaire :

$$P_m = C_p \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \Rightarrow V^3 = \frac{2 \cdot P_{mec}}{\rho \cdot C_p \cdot S}$$

Avec:

$$C_p = 0,48$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$R = 10 \text{ m,}$$

$$S = \pi \cdot R^2 = 314 \text{ m}^2$$

$$P_{mec} = 140,3 \text{ kW}$$

AN:

$$V = 11,42 \text{ m/s}$$

- Calculer la hauteur de la tour nécessaire :

D'après la formule de la distribution de Weibull

$$V_V(h) = V_V(h_{mes}) \cdot \frac{\ln(h/\alpha)}{\ln(h_{mes}/\alpha)}$$

$$\Rightarrow \ln(h/\alpha) = \frac{V_V(h)}{V_V(h_{mes})} \cdot \ln(h_{mes}/\alpha)$$

Avec:

$$V_V(h) = 11,42 \text{ m/s}$$

$$h_{mes} = 2 \text{ m}$$

$$V_V(h_{mes}) = 8 \text{ m/s}$$

α : Paramètre de rugosité varie selon la nature du sol dans cette cas $\alpha = 0,1$

AN :

$$h = 6,63 \text{ m}$$

- ✚ Le point de fonctionnement de l'éolienne peut être déterminé à partir de la caractéristique de la puissance P fournie par l'éolienne en fonction de la vitesse de rotation Ω_L de la turbine, pour une vitesse de vent donnée. Le point de fonctionnement nominal est choisi tel que la puissance fournie par l'éolienne soit maximum ; le schéma synoptique (Fig 1-36) donne une idée sur le dimensionnement d'une éolienne.

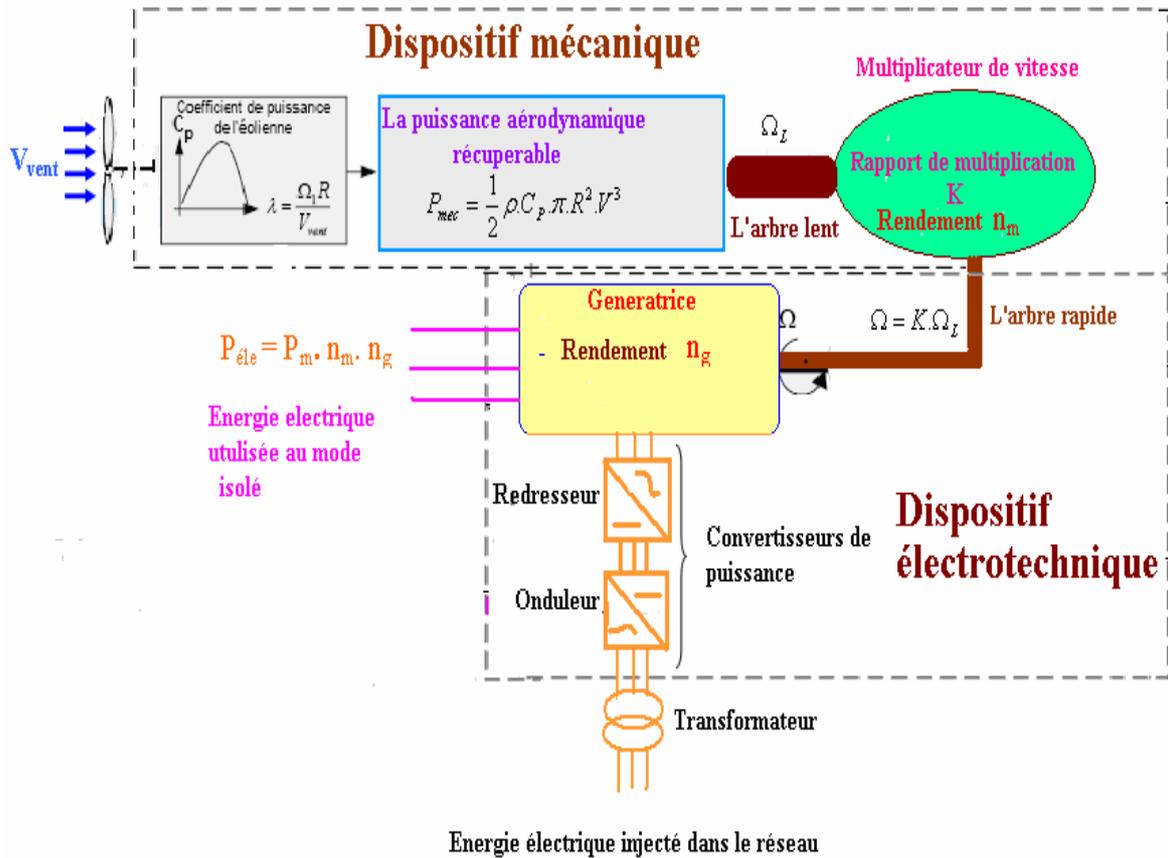


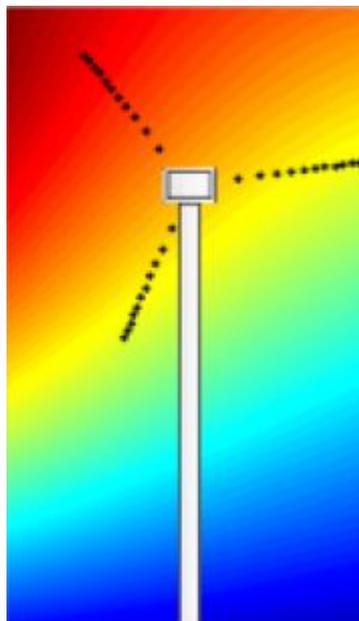
Figure (1-36): schéma macroscopique d'un aérogénérateur éolien

Pour optimiser la puissance électrique active P débitée en fonction du vent, on règle la vitesse de rotation de l'éolienne (Ω_l), le rendement énergétique d'une éolienne varie entre 0.5 et 0.6 selon les propriétés des éléments qui composent l'éolienne : rotor, multiplicateur, génératrice, convertisseur de puissance, filtre, transformateur...etc ...



CHAPITRE II

Chaînes de conversion électrotechniques





Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités.

II.1 Systèmes Utilisant la Machine Synchrone

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Leur proportion est en augmentation constante (un peu plus de 5 % en 2001). La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'entraînement direct, c'est-à-dire lorsque la liaison mécanique entre la turbine éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Il faut cependant que cette génératrice soit nécessairement raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Ou bien la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome:

II.1.1 Machines Synchrone à électroaimants

Les bobines des électroaimants sont alimentées en courant continu à l'aide d'un système de balais et de bagues collectrices fixées à l'arbre de la génératrice. Cette alimentation peut se faire par exemple via un convertisseur qui transforme le courant alternatif du réseau électrique en courant continu. Il existe différents modes de génération de l'excitation :

- À faible puissance (moins de 10 kW), la chaîne de conversion dominante exploite une machine multipolaire à aimants entraînée directement par la turbine (vitesses de rotation relativement plus élevées que celles des éoliennes de grandes puissances) et connectée à un bus continu à travers un simple pont de diodes (Fig 2-1.A). Cette solution a d'ailleurs été étendue à des systèmes de forte puissance. Associé à Scanwind, ABB a déjà réalisé des prototypes à aimants en architecture cylindrique qu'il envisage pour la production offshore jusqu'à 5 MW.

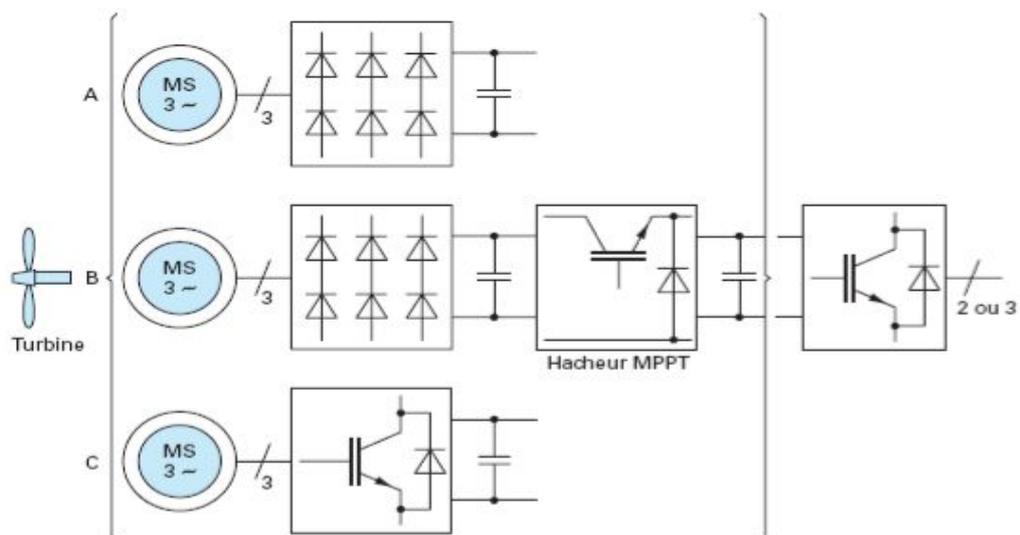


Figure (2-1): Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la machine synchrone [8].



- La (Fig 2-1.B) montre l'amélioration de cette chaîne de conversion, en ajoutant un hacheur contrôlé éventuellement en MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) pour adapter le niveau de tension continue et ainsi la vitesse de rotation de la turbine.
- Enfin, (Fig 2-1.C) donne la structure « idéale » avec redresseur à modulation de largeur d'impulsion qui permet d'absorber des courants sinusoïdaux et de contrôler éventuellement leur phase pour disposer d'un degré de liberté supplémentaire dans l'optimisation énergétique et dans celle du dimensionnement du système. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champ axial) ou à rotor extérieur (Fig 2-2) [8].

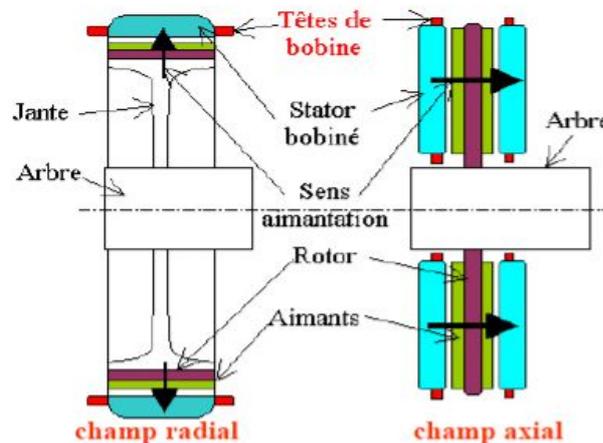


Figure (2-2): Machine à champ radial classique et machine discoïde à champ axial [8].

II.1.2 Machines Synchrones à aimants permanents ou « MSAP ».

La source d'excitation du rotor est indépendante du réseau contrairement à la machine synchrone à électroaimant. Ce type de machine tend à être de plus en plus utilisé par les constructeurs d'éoliennes car elle peut fonctionner en mode autonome. La génératrice à électroaimants est toutefois la plus utilisée actuellement.

II.2 Systèmes Utilisant la Machine Asynchrone

Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines est différente de la vitesse synchrone du champ tournant. Longtemps, les machines asynchrones ont été fortement concurrencées par les machines synchrones dans les domaines de forte puissance et ce, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager... Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes. Pour fonctionner en courant monophasé, les machines asynchrones nécessitent un système de démarrage. Pour les applications de puissance, au-delà de quelques kilowatts, les moteurs asynchrones sont uniquement alimentés par des systèmes de courants triphasés. La plupart du temps, la Machine Asynchrone (MAS) est utilisée car la génératrice est capable de supporter de légères variations de vitesse ce qui est un atout majeur pour des applications du type éolien où la vitesse du vent peut évoluer rapidement notamment lors de rafales. Ces dernières engendrent des sollicitations mécaniques importantes pour le système qui sont ainsi plus réduites avec une machine asynchrone qu'avec une génératrice synchrone fonctionnant normalement à vitesse fixe.



A titre indicatif, les machines les plus utilisées dans les éoliennes sont du type asynchrone avec un rotor à cage (environ 90% en 1997, 60% en 2001). Cependant, leur proportion tend à diminuer. Les génératrices asynchrones à rotor bobiné se sont développées ces dernières années (de 3% des machines utilisées en 1997, on passe à environ 30 % en 2001).

II.2.1 Machine Asynchrone a Cage D'écreuil

Ce type de machine a été inventé par « Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski » au début des années 1890. Les machines asynchrones à cage, standardisées jusqu'à des puissances de l'ordre du mégawatt, bénéficient d'un avantage économique particulier dans les applications directement connectées au réseau. Aux vitesses de rotation « classiques » (1 000 à 1 500 tr/ min), leur coût spécifique est d'environ 4 à 6 c€/W ; il augmente avec le nombre de pôles car la puissance doit être obtenue à plus basse vitesse (couple et masse supérieurs). Ces machines « rapides » nécessitent d'être associées à leur turbine éolienne, beaucoup plus lente, à travers un multiplicateur de vitesse mécanique. Les rotors de ces machines sont constitués de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par deux anneaux de court-circuit (*Fig 2-3*) [13]. Les tôles ferromagnétiques servent à canaliser les lignes de champ tandis que les barres sont siège de courants induits.

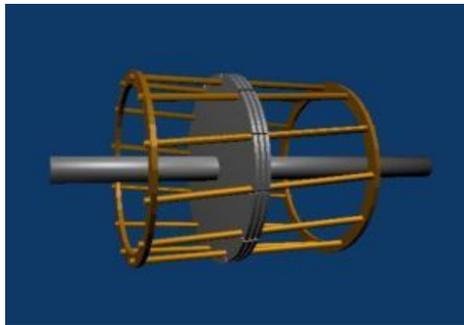


Figure (2-3): Structure d'un rotor en cage d'écreuil [13].

L'inclinaison des barres de la cage permet de diminuer la variation de la réluctance du circuit magnétique au cours de la rotation du rotor (ou « effet d'encoches ») et de diminuer ainsi les oscillations de couple. C'est cette inclinaison des encoches qui donne à l'ensemble barres plus anneaux de court-circuit la forme d'une cage d'écreuil déformée. Ci-dessous est représentée une chaîne de conversion associée (*Fig 2-4*) [3].

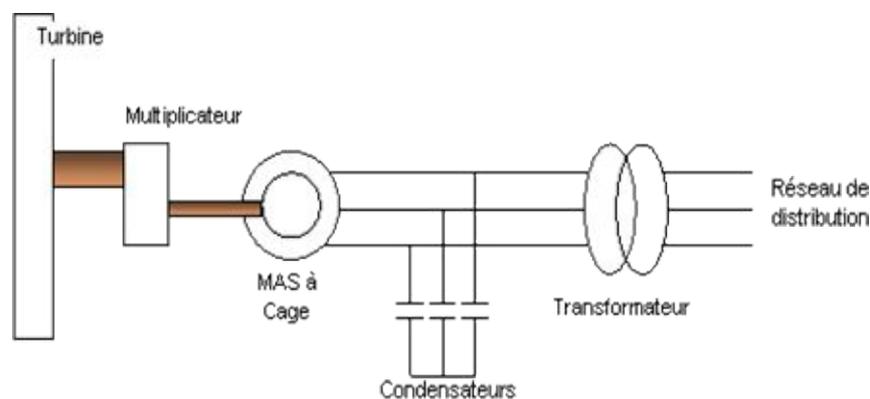


Figure (2-4): Schéma de connexion au réseau de l'éolienne avec MAS à cage d'écreuil [3].



II.2.2 Machine Asynchrone à Double Stator

Cette configuration d'éolienne, permet un point de fonctionnement à deux vitesses. On réalise un double bobinage au stator (Fig 2-5) qui induit un nombre de paires de pôles variable et donc des plages de vitesses différentes. On peut imposer 2 vitesses de synchronisme par changement du nombre de pôles. D'une part, on a un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. En effet, la puissance est donnée par :

$$P_{mg} = \Gamma \cdot \Omega_s \quad (2.1)$$

Avec :

P_{mg} La puissance transmise par la génératrice, Γ Le couple électromagnétique, Ω_s La vitesse de synchronisme, ω La pulsation du réseau et p le nombre de paires de pôles. A une faible puissance correspond une faible vitesse, la vitesse étant liée au nombre de paires de pôles par :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (2.2)$$

A une faible vitesse correspond un nombre de paires de pôles élevé. D'autre part, on a un stator de forte puissance correspondant à une vitesse élevée et donc à faible nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent élevées pour la connexion au réseau ont utilisé des commutateurs.

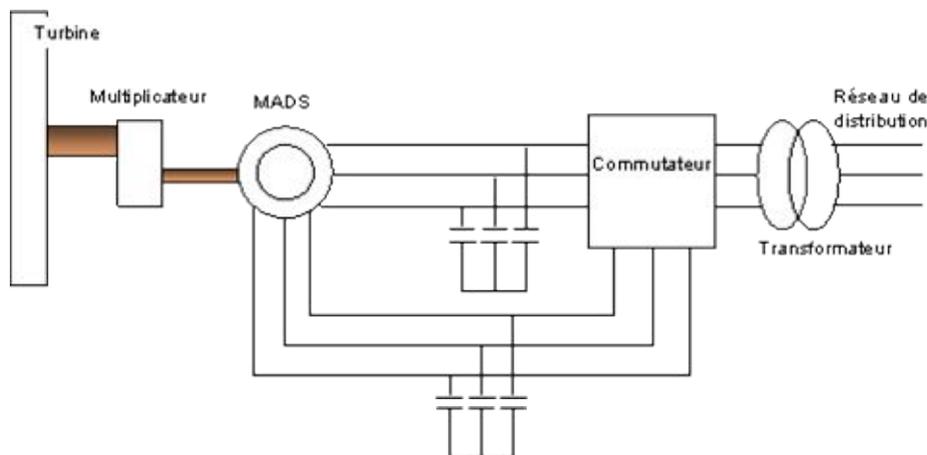


Figure (2-5): Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator [3].

II.2.3 Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution.

Contrairement à certaines machines synchrones qui ont des convertisseurs traversés par 100% de la puissance nominale, les convertisseurs de la MADA sont dimensionnés pour laisser passer 25% de la puissance nominale seulement. Ils coûtent moins chers et sont moins encombrants. Ils permettent de piloter la MADA par le rotor en réglant sa vitesse de rotation mécanique. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hyposynchrone et hypersynchrone, selon ces convertisseurs on peut réaliser des plusieurs types de ces machines :



II.2.3.1 Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless"

Cette machine est constituée de deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Fig 2-6).

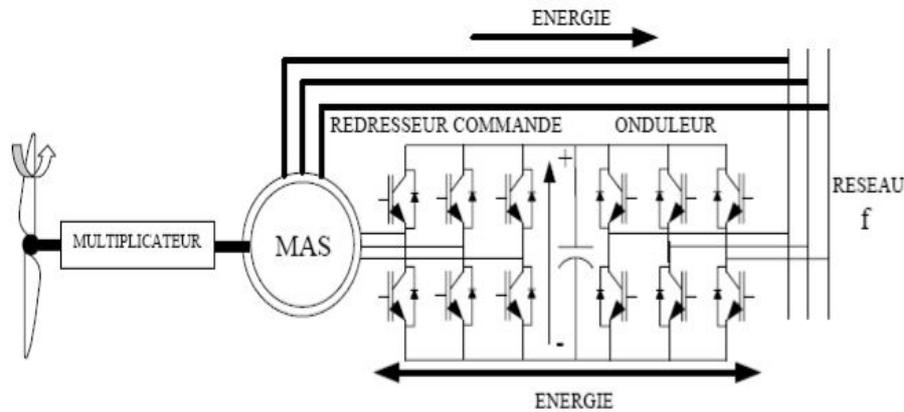


Figure (2-6): Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau. [7].

II.2.3.2 Machine Asynchrone à Double Alimentation Type « Rotor Bobiné »

Le rotor d'une machine asynchrone à rotor bobiné ou à bagues est constitué de trois bobines. Chaque bobine est reliée à une bague. Les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor. Ce type de rotor a été conçu pour permettre la variation de résistance du rotor en insérant des résistances en série avec les bobines afin de réaliser un démarrage rotorique.

Ce dispositif a ensuite permis la variation de vitesse avec un rendement acceptable au moyen d'un procédé appelé cascade hyposynchrone. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Pour cette configuration, il y a trois structures possibles.

(a) MADA – structure de Kramer

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Fig 2-7), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur et un onduleur est placé en sortie du redresseur. L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine

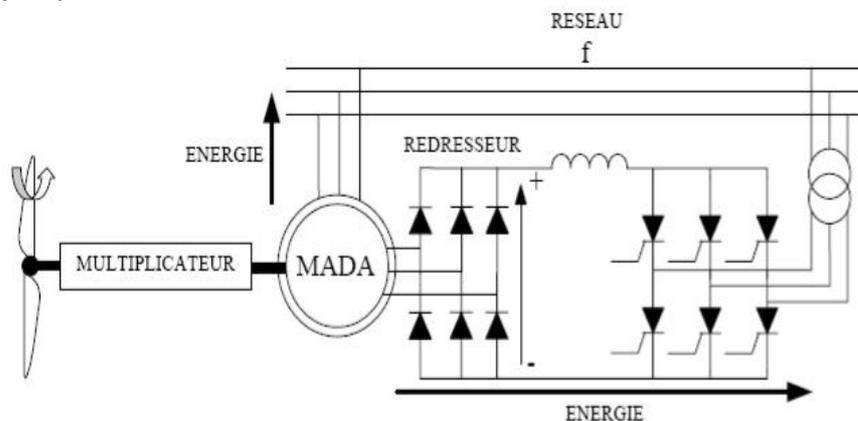


Figure (2-7): MADA - structure Kramer [7].



(b) MADA à énergie rotorique dissipée

La (Fig 2-8) représente cette configuration avec le stator connecté directement au réseau et le rotor connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage torique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone

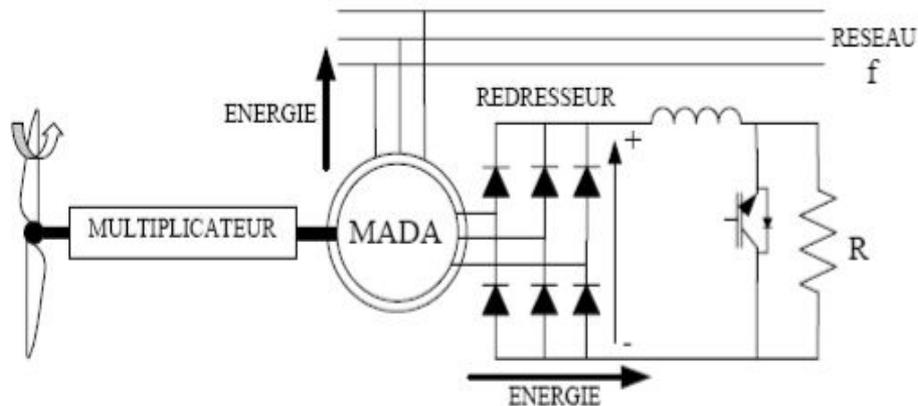


Figure (2-8): MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée [7].

(c) MADA – structure de « Scherbius » avec cycloconvertisseur

Quand on remplace l'association redresseur - onduleur par un cycloconvertisseur (Fig 2-9) pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius » représenté (Fig 2-10). La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la (Fig 2-8).

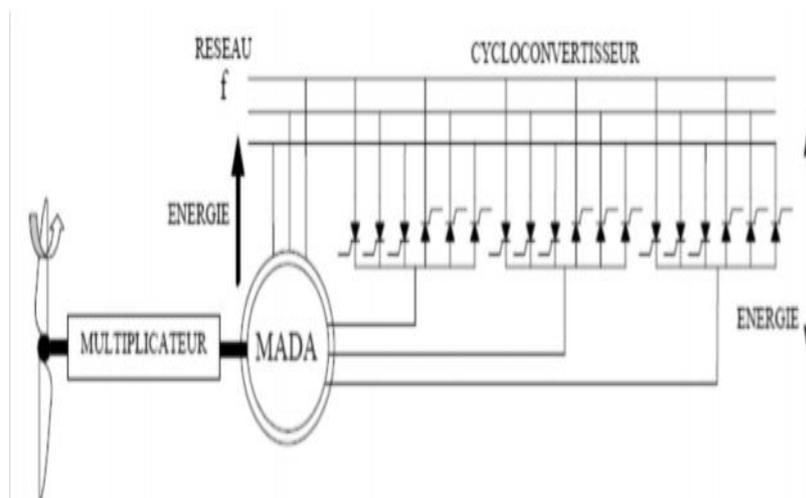


Figure (2-9): Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur [7].

(d) MADA – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration (Fig 2-10) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois, les interrupteurs utilisés dans cette configuration (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en



modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

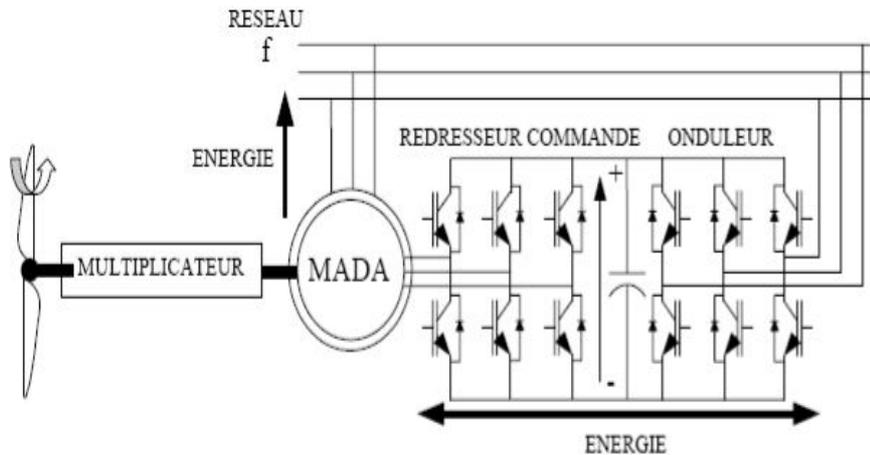


Figure (2-10): structure de Scherbius avec convertisseurs MLI [7].

II.3 Machine a Réluctance Variable

II.3.1 Machine a Réluctance Variable a Double Saillance Excitée

Parmi les génératrices à l'étude, plus particulièrement pour les entraînements directs, figurent les machines à réluctance variable dites *MRV*, type « pures » (sans excitation) ou excitées. C'est leur atout économique (faible coût de fabrication) et de robustesse (rotor sans bobinage ni aimant) qui a permis leur développement. La (Fig 2-11) montre un ensemble convertisseur génératrice à réluctance variable à double saillance (*GRVDS*). Les courants étant unidirectionnels, chaque phase est alimentée indépendamment par un onduleur en demi-pont asymétrique.

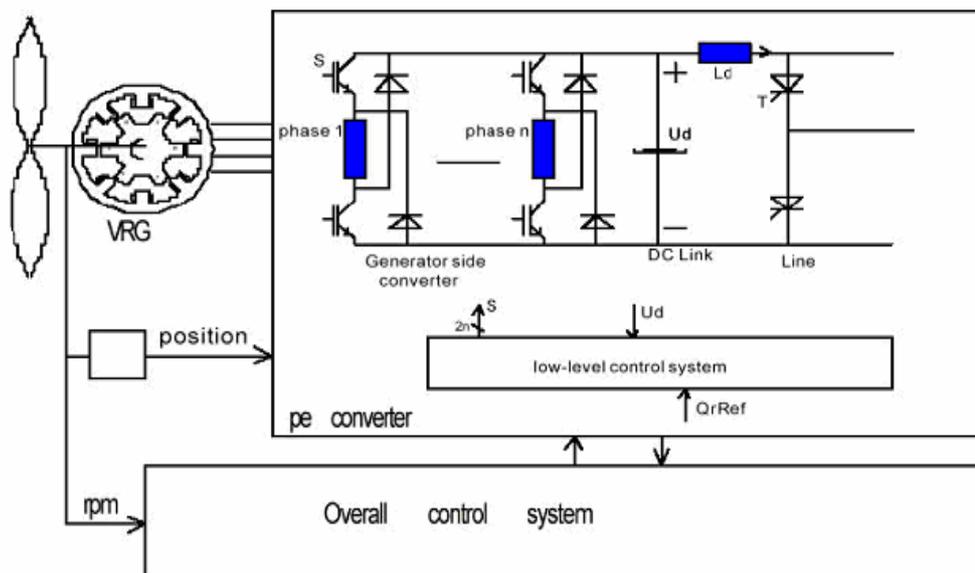


Figure (2-11): Génératrice à réluctance variable à double saillance [8].



Des machines à réluctance variable excitées par des bobinages inducteur ou par des aimants peuvent également être envisagées. Dans ce cas, il est plus intéressant de les alimenter en courants bidirectionnels (Fig 2.12). On utilise alors de « traditionnels » onduleurs à MLI triphasés.

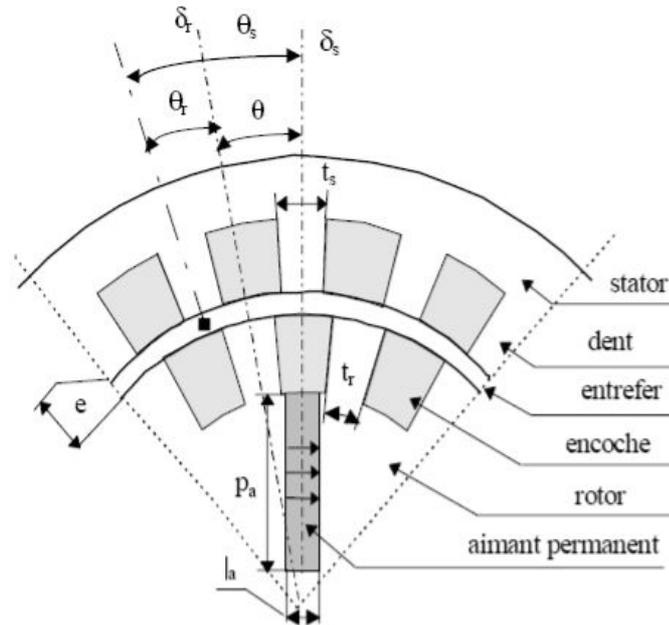


Figure (2.12): Structure de génératrices à réluctance variable excitée par Aimants [15]

II.3.2 Machine A Réluctance Variable Non Excitée

La Machine à réluctance variable non excitée représentée (Fig 2-13) comprend 48 dents au stator réparties sur douze plots et 64 dents au rotor. Pour l'étude de cette machine, on détermine d'abord les dimensions principales puis on optimise, à l'aide d'une méthode génétique couplée à la méthode des éléments finis, la forme et les dimensions des encoches.

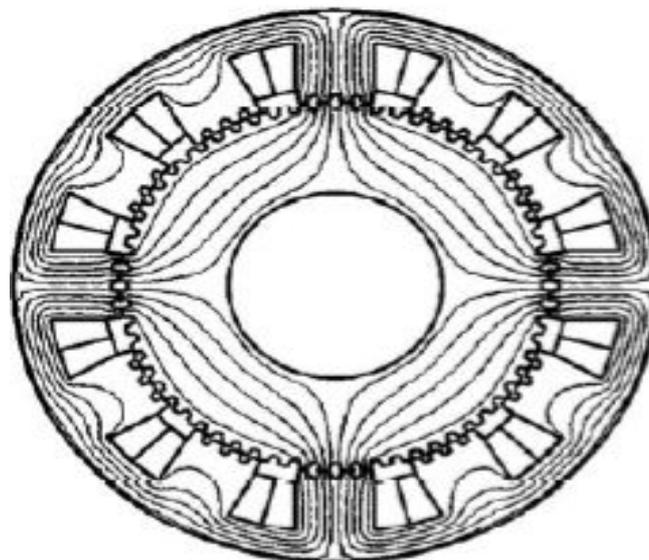


Figure (2-13): Génératrice à réluctance variable non excitée [3].



II.4 Comparaison entre les Convertisseurs Electromécaniques

La (Fig 2.14) montre une comparaison des performances énergétiques pour différentes chaînes de conversion sur une machine tripale de 600 kW [14]. La solution de référence est à régulation stall et à génératrice asynchrone à cage à une vitesse. La plus performante est à régulation pitch, à entraînement direct de type synchrone. On peut remarquer que c'est aux faibles vitesses de vent que l'on obtient les gains énergétiques les plus importants.

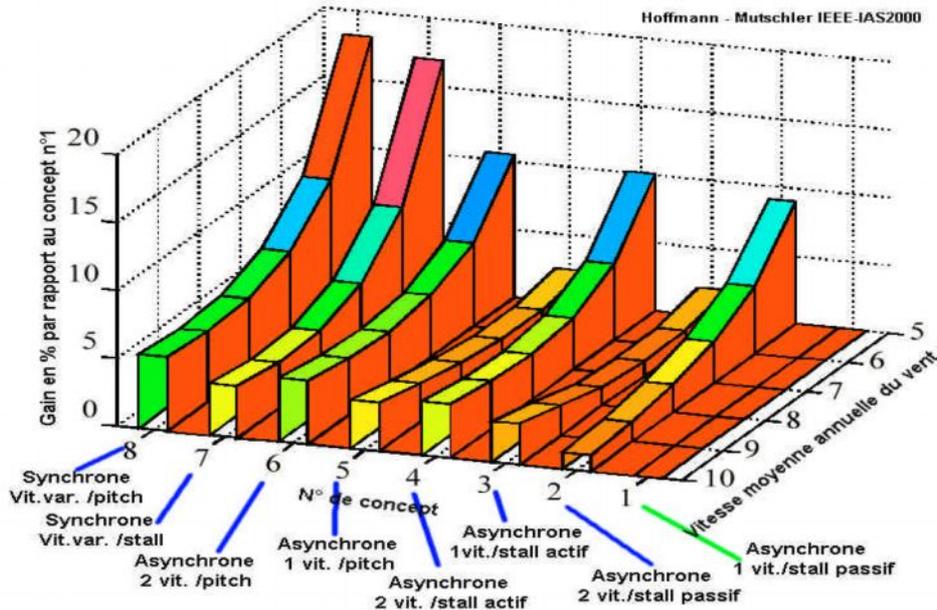


Figure (2-14): Comparaison des performances de différentes chaînes éoliennes [14].

Ces résultats dépendent également du profil des pales, des conditions de vent, notamment de l'intensité des turbulences (ici 10%), de la vitesse de base normalisée (ici $\lambda = 6$), du moment d'inertie du rotor (ici 500 kg.m²).

Le Tableau (2-1) synthétise les avantages et les inconvénients des trois types de machines.

	<i>Machine Synchrone</i>	<i>Machine Asynchrone</i>	<i>MRV</i>
Avantages	*bon rendement	*Autorise le fonctionnement à vitesse variable	* suppression totale ou partielle du multiplicateur de vitesse.
Inconvénients	*faibles puissances, adaptée aux faibles vitesses mais prix élevé !	<p>En autonome.</p> <p>* Nécessité de capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine.</p> <p>Connectée au réseau</p> <p>*Obligation de fonctionner au voisinage du synchronisme.</p>	*Etudes actuellement en cours.

Table (2-1) : avantages et inconvénients des générateurs associés aux éoliennes.



Etude comparative entre les deux machines les plus utilisées dans le domaine éolien :

<i>Critères</i>	<i>MS</i>	<i>MAS</i>
<i>Construction</i>	<p>* Elle nécessite une bobine d'excitation qui doit être alimentée en courant continu, soit par une source externe soit par l'intermédiaire d'une machine auxiliaire alternative et des diodes tournantes.</p>	<p>* Les rotors à cage d'écureuil sont simples et robustes. Il en résulte une grande fiabilité. Les générateurs moteurs asynchrones sont fabriqués en très grande série pour les petites et moyennes puissances.</p>
<i>Maintenance et pièces détachées</i>	<p>* Le risque de réparations est plus grand, surtout aux niveaux des charbons, des diodes tournantes, des bobines d'excitation. Les pièces détachées ne sont pas toujours disponibles à cause du marché restreint surtout dans certaines régions comme les pays en développement.</p>	<p>* L'entretien est réduit au minimum. Les pièces détachées sont toujours disponibles grâce à l'utilisation très répandue des moteurs asynchrones.</p>
<i>Synchronisation</i>	<p>* Pour un fonctionnement sur un réseau interconnecté, nécessité d'un synchronoscope pour contrôler les 3 conditions de synchronisation.</p> <p>* Pour les machines de très petite puissance (<1kVA), on peut à la limite se dispenser de cet équipement.</p>	<p>* Pas nécessaire. Toutefois, à l'enclenchement sur le réseau, il apparaît une pointe de courant dont la durée dépend de la valeur du glissement au moment de la connexion.</p>



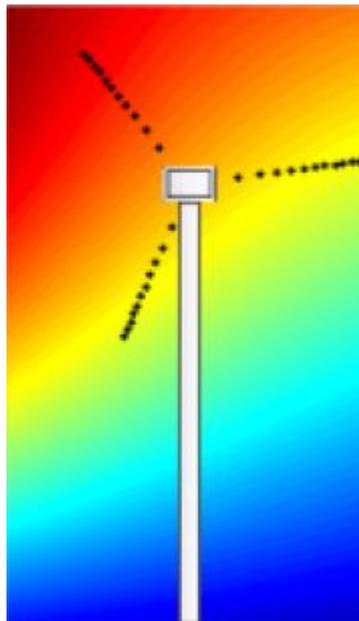
<i>Système d'excitation en réseau interconnecté</i>	<ul style="list-style-type: none"> * Alimentation du système d'excitation, associée au régulateur de tension, par le réseau industriel. * Si l'on désire régler le $\cos \varphi$, on agira sur le courant d'excitation par l'intermédiaire du régulateur. * Pour des génératrices de petite puissance (<500kW), on peut fonctionner, par souci d'économie, à courant d'excitation fixe, c'est-à-dire sans régulateur de tension. 	<ul style="list-style-type: none"> * La puissance réactive d'excitation étant fournie par le réseau, aucune capacité n'est en principe nécessaire. Cependant, il est préférable de compenser le ($\cos\varphi$) de la génératrice par une capacité en parallèle (en général pour obtenir un $\cos \varphi$ égal à 0,9), dimensionnée pour la charge nominale
<i>Système d'excitation en réseau isolé</i>	<ul style="list-style-type: none"> * Alimentation du système d'excitation, associée au régulateur de tension, par soutirage sur la machine synchrone 	<ul style="list-style-type: none"> * Au moyen de capacités en parallèle. Les charges inductives doivent être compensées pour elles-mêmes au moyen de capacités. Si leur puissance réactive varie, celle-ci doit être compensée à la valeur minimale. Une valeur trop élevée de capacité peut provoquer une augmentation excessive de la tension lorsque la charge baisse.
<i>Rendement</i>	<ul style="list-style-type: none"> * Le rendement est encore bon à charge partielle. 	<ul style="list-style-type: none"> * Le rendement et le facteur de puissance diminuent fortement à puissance réduite (vitesse inférieure à la vitesse nominale). Le rendement est inférieur à celui des machines synchrones.

Table (2-2) : comparaison entre Ms et Mas [24].



CHAPITRE III

Étude et Simulation de la GAS à Cage en Mode Isolé





III.1 Introduction

La machine asynchrone triphasée à cage d'écurueil est particulièrement utilisée en production décentralisée d'énergie électrique comme génératrice d'éolienne. Dans le cas où la machine est connectée à un réseau électrique, elle n'a pas besoin d'un artifice additionnel d'excitation, si ce réseau peut lui fournir la puissance réactive nécessaire. Par contre, en marche en isolée, il est nécessaire de brancher un banc de condensateurs aux bornes de cette génératrice asynchrone pour éventuellement assurer son auto-excitation. Ce banc de condensateurs, combiné au reste de magnétisation (le rémanent) de la machine, permet à cette dernière de s'amorcer.

L'objectif de ce chapitre est la modélisation et l'étude de la GAS à cage utilisée dans la conversion éolienne. Toutefois, nous entamons en premier lieu la modélisation biphasée de la GAS à cage tout en tenant compte de la saturation du circuit magnétique ; nous abordons ensuite la détermination de la capacité d'excitation et la modélisation de l'auto-amorçage de la GAS à cage ; nous allons ensuite modéliser les différentes charges statiques et les différentes formes de compensations ; nous commenterons enfin les résultats relatifs à ce type de générateur après illustration et visualisation des caractéristiques de simulation sous *Matlab*.

III .2 Équations de la Machine Asynchrone Triphasée

III .2.1 Rappel sur les lois de l'électromagnétisme

a- Loi de Faraday

La loi de Faraday exprime la relation entre la tension V aux bornes d'une bobine de résistance R et d'inductance L , le courant I et la variation du flux totalisé Φ_t :

$$\frac{d\Phi_t}{dt} = V - RI \quad (3-1)$$

b- Théorème de Ferraris

Considérons trois bobinages répartis dans l'espace de telle sorte que l'on passe de l'un d'entre eux à son voisin par une rotation de centre O d'angle $2\pi/3$. Ces bobinages sont alimentés par un système triphasé équilibré de courants. La structure se présente ainsi (Fig. 3-1).

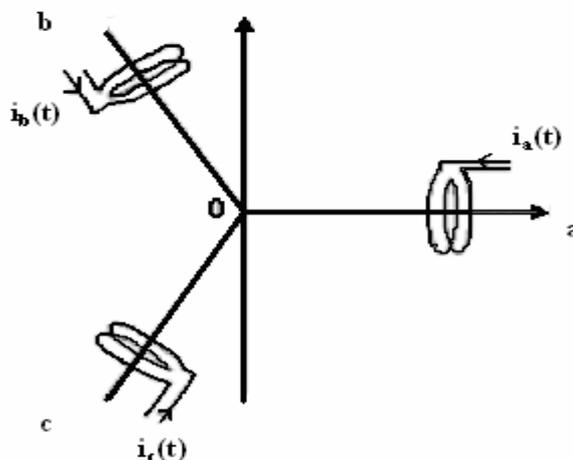


Figure (3-1): structure d'un bobinage triphasé [17].

A partir des expressions des champs des 3 bobines:

$$H_a(t) = H_m \cdot \cos(\omega_s t) \cdot \cos(p\theta) \tag{3-2.1}$$

$$H_b(t) = H_m \cdot \cos(\omega_s t - 2\pi/3) \cdot \cos(p\theta - 2\pi/3) \tag{3-2.2}$$

$$H_c(t) = H_m \cdot \cos(\omega_s t - 4\pi/3) \cdot \cos(p\theta - 4\pi/3) \tag{3-2.3}$$

Nous déduisons l'expression spatio-temporelle du champ tournant résultant :

$$H(\theta, t) = (3H_m/2) \cdot \cos(p\theta - \omega_s t) \tag{3-3}$$

D'où le théorème de Ferraris : p bobines/phase d'un enroulement triphasé régulièrement réparties sur le périmètre d'un entrefer (décalage spatial de $2\pi/3p$) et alimentées par un système de courants triphasé de pulsation électrique ω_s créent un champ unique à p paires de pôles tournant à la vitesse angulaire $\Omega_s = \omega_s/p$.

III .2.2 Fonctionnements de la Génératrice Asynchrone à cage d'écureuil

Une génératrice asynchrone se compose de:

- **un stator :** constitué d'un circuit magnétique sur lequel on a réalisé des bobinages. Le stator du moteur asynchrone triphasé comprend 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle répartis sur un circuit magnétique feuilleté. Ces enroulements ayant un même nombre de pôles sont alimentés par un système triphasé de tension. Il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine en vertu du « théorème de **FERRARIS** » [18]. La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est :

$$n = f/p \text{ [tr/s]} = 60 \cdot (f/p) \text{ [tr/min]}$$

Avec : f = fréquence d'alimentation [Hz], p = paires de pôles)

- **Un rotor :** constitué d'un circuit magnétique bobiné ou à cage d'écureuil comportant un ensemble de barres conductrices court-circuitées par 2 anneaux. La (Fig. 3-2) indique la position des axes des phases statorique et rotorique

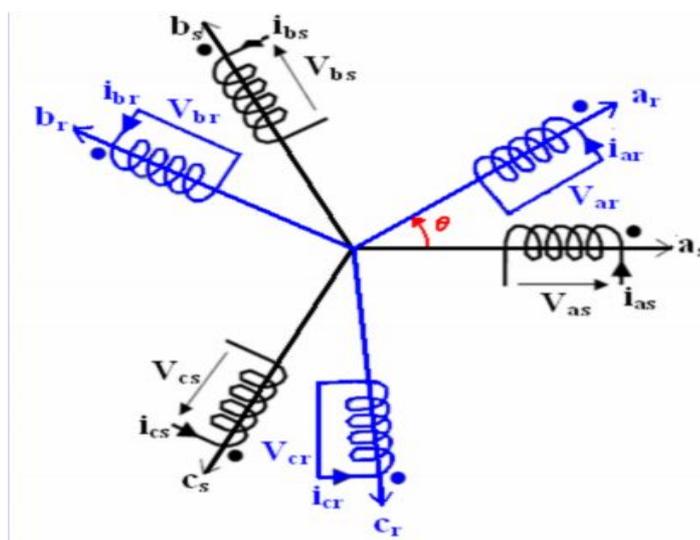


Figure (3-2): représentation de la MAS triphasée dans le repère (a, b, c) [18].

Comme dans toutes les machines électriques tournantes, la production d'un couple est la conséquence de l'interaction entre deux forces magnétomotrices l'une produite par le stator et l'autre par le rotor. Dans une machine à courant continu ou synchrone ces deux forces magnétomotrices peuvent être indépendantes et réglables sans trop d'efforts mais la machine asynchrone à cage d'écureuil possède une force magnétomotrice au rotor qui dépend de celle au stator (phénomène d'induction) et d'une grandeur qui exprime la vitesse relative du rotor ω_r par rapport à la vitesse du champ tournant ω_s dite glissement g :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \tag{3-4}$$

- Si le rotor de cette machine tournait à la vitesse du champ magnétique il n'y aurait plus de courant induit donc plus de couple.
- Si l'on freine le rotor (couple résistant de la charge), le système est un moteur à asynchrone.
- Si l'on augmente la vitesse, le système est une génératrice asynchrone (fonctionnement *hypersynchrone*) : pour avoir un générateur, il faut que le rotor tourne plus vite que le champ magnétique (Fig. 3-3).

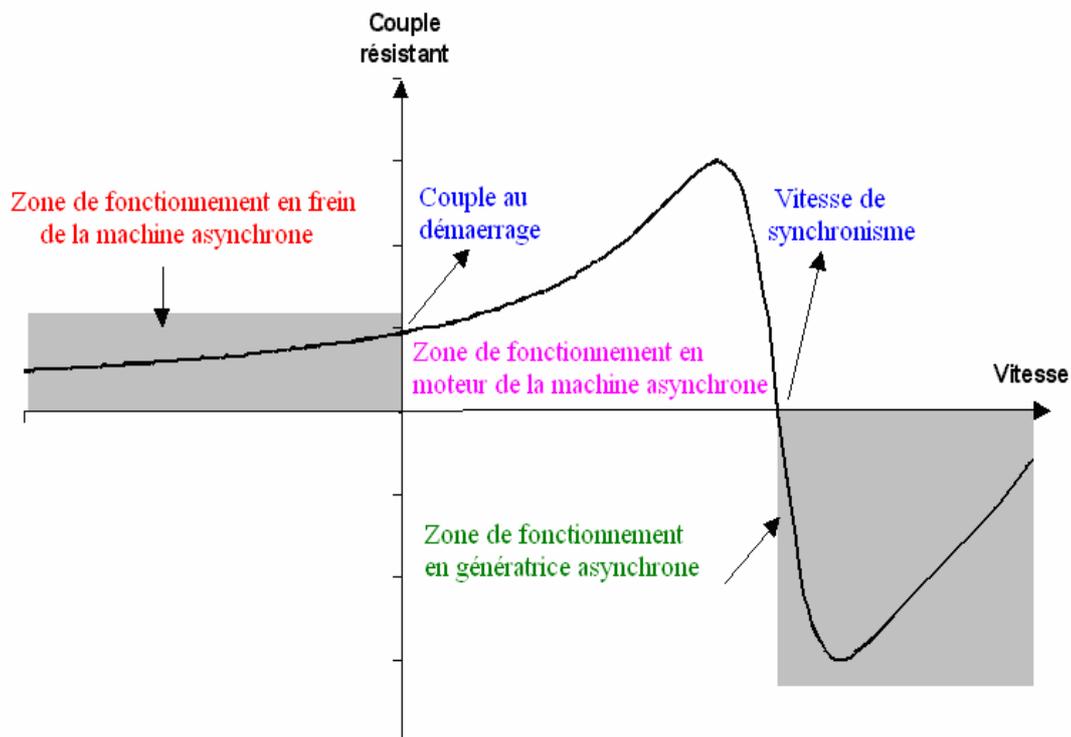


Figure (3-3): Différentes zones de fonctionnement de la MAS.

III .3 Modélisation Mathématique de la Génératrice Asynchrone

III .3.1 Hypothèses Simplificatrices

La machine électrique étant un système très complexe, nous allons simplifier son étude moyennant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- entrefer constant
- effet des encoches négligé
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer
- circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante
- pertes ferromagnétiques négligeables
- l'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes ces hypothèses, on peut citer :

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

III .3.2 Modèle de la Génératrice Asynchrone dans le Repère (a.b.c)

Pour les détails de la mise en équation, on pourra se référer à [18], [20] et [22]. Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué (Fig. 3-2) où les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles même ($V_r=0$).

En posant :

θ : L'angle électrique entre l'axe de la phase « a » statorique (s) et la phase « a » rotorique (r).

La loi de Faraday (3-8) permet d'obtenir l'écriture matricielle condensée pour les 3 phases statoriques:

$$\begin{bmatrix} v_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{abc} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

Et pour le rotor (à cage) en court-circuit, donc tensions nulles :

$$[v_{abcr}] = [R_r][i_{abcr}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{abcr}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3-7)$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = [R_r] \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

Où :

v_{as}, v_{bs}, v_{cs} , sont les tensions simples triphasées au stator de la machine.

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} , sont les courants au stator de la machine.

$\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$, sont les flux propres circulants au stator de la machine.

v_{ar}, v_{br}, v_{cr} sont les tensions simples triphasées au rotor de la machine.

i_{ar}, i_{br}, i_{cr} sont les courants au rotor de la machine.

$\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$, sont les flux propres circulants au rotor de la machine.

Sous forme matricielle, les équations de la machine deviennent :

$$\frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] = [v_{sabc}] - [R_s][i_{sabc}] \quad (3-9)$$

$$\frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}] = [v_{rabc}] - [R_r][i_{rabc}] \quad (3-10)$$

Avec :

$$[R_s] = R_s \cdot [I]$$

$$[R_r] = R_r \cdot [I]$$

Où :

$$[I] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



III .3.3 Modèle de la Génératrice Asynchrone dans le Repère de Park (dq)

III .3.3.1 Transformation de Park

La transformée de Park (1929) est une opération mathématique qui permet de passer d'un système triphasé d'axes magnétiques décalés d'un angle électrique de cent vingt degrés à un système à trois axes orthogonaux. En fait ce n'est rien d'autre qu'un changement de base pour les axes magnétiques du système.

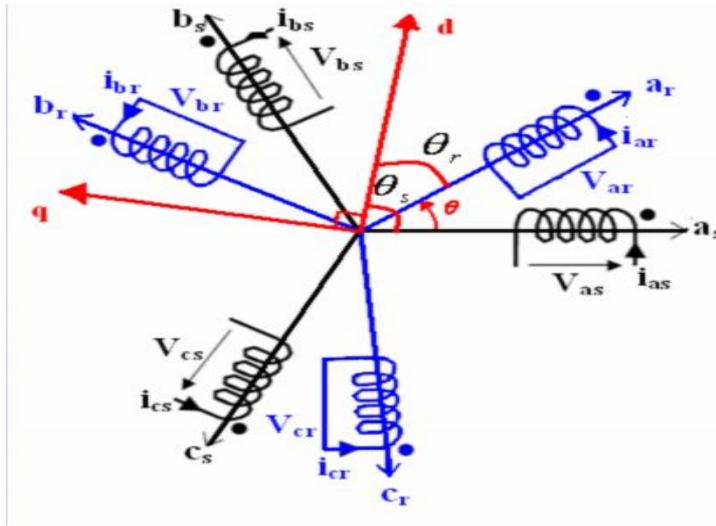


Figure (3-4): Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique [19].

Il existe une relation qui les lie et qui simplifie les équations et par la même le modèle final. Les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations (Fig. 3-4). Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par :

$$[x_{dq}] = [P(\theta)] [x_{abc}] \tag{3-11}$$

Où :

$$p(\theta) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

Avec :

Ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation : $\theta = \theta_s - \theta_r$

En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel (eq. 3-9 et 3-10), un modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires :

- **Au stator :**

$$[v_{dqos}] = [R_s][i_{dqos}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{dqos}] + [\lambda][\Phi_{dqos}]\theta_s \tag{3-12}$$

- **Au rotor :**

$$[v_{dqor}] = [R_r][i_{dqor}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{dqor}] + [\lambda][\Phi_{dqor}]\theta_r \tag{3-13}$$

Avec :

$$[\lambda] = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Où :

- θ_s et θ_r sont les dérivées des angles des transformations de Park des grandeurs statoriques et rotoriques respectivement.
- $[v_{dqos}]$ est la vectrice tension statorique dans le repère de Park.
- $[i_{dqos}]$ est le vecteur courant statorique dans le repère de Park.
- $[\Phi_{dqos}]$ est le vecteur flux statorique dans le repère de Park.
- $[v_{dqor}]$ est la vectrice tension rotorique dans le repère de Park.
- $[i_{dqor}]$ est le vecteur courant rotorique dans le repère de Park.
- $[\Phi_{dqor}]$ est le vecteur flux rotorique dans le repère de Park.

La (Fig. 3-5) donne alors une représentation interprétée de la machine de Park dans l'espace électrique.

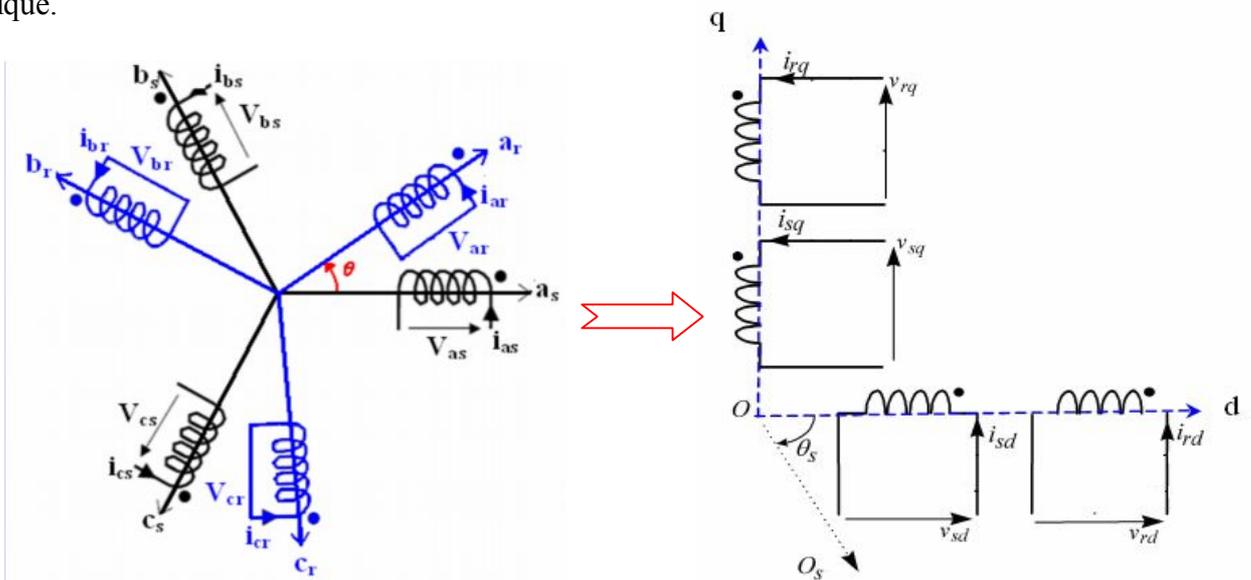


Figure (3-5): Représentation des enroulements de la machine de Park [20].



III.3.3.2 Équations de flux en coordonnées de Park

Cependant, c'est au niveau de l'écriture des flux que ça devient intéressant. Le système matriciel de flux peut également s'écrire sous la forme suivante :

- **Au stator :**

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3-14)$$

- **Au rotor :**

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_m \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qr} = L_m \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3-15)$$

Ou bien :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dqos} \\ \Phi_{dqor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dqos} \\ i_{dqor} \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

Avec :

- $L_s = L_m + l_{fs}$ est l'inductance propre d'une phase statorique.
- $L_r = L_m + l_{fr}$ est l'inductance propre d'une phase rotorique.
- l_{fs} et l_{fr} est l'inductance cyclique des fuit
- L_m est l'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor sur l'axe d .

III.3.3.3 Équation de tension dans le référentiel de Park

D'après les équations (eq. 3-7 et 3-8) les équations aux tensions deviennent :

- **Au stator :**

$$\begin{cases} v_{d.s} = R_s \cdot i_{d.s} + \frac{d\Phi_{d.s}}{dt} - \Phi_{q.s} \left(\frac{d\theta_s}{dt} \right) \\ v_{q.s} = R_s \cdot i_{q.s} + \frac{d\Phi_{q.s}}{dt} + \Phi_{d.s} \left(\frac{d\theta_s}{dt} \right) \end{cases} \quad (3-17)$$

- **Au rotor :**

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{d.r} + \frac{d\Phi_{d.r}}{dt} - \Phi_{q.r} \left(\frac{d\theta_r}{dt} \right) \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{q.r} + \frac{d\Phi_{q.r}}{dt} + \Phi_{d.r} \left(\frac{d\theta_r}{dt} \right) \end{cases} \quad (3-18)$$

III .3.3.4 Expression de couple

Le couple électromécanique synchrone développé par champ tournant est donné par la formule :

$$T_e = (3p_s/2) \cdot [\Psi_{ds} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{ds}] = (3p_s/2) \cdot [\Psi_{qr} \cdot i_{dr} - \Psi_{dr} \cdot i_{qr}] = dW_{méc} / \Omega_2 \cdot dt \quad (3-19)$$

III .4 Choix du référentiel dq

Jusqu'à présent, nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère dq qui fait un angle électrique θ avec le stator et qui fait également un angle électrique θ_r avec le rotor mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est à dire qu'il est libre. Il existe trois choix possibles :

III .4.1 Référentiel lié au stator

Ce référentiel est souvent nécessaire lors des études des de la vitesse de rotation. Dans ces conditions, nous avons [21] :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{Et} \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m \quad (3-20.1)$$

III .4.2 Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est intéressant dans les problèmes de régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante. Nous avons, donc [21] :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_m \quad \text{Et} \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad (3-20.2)$$

III .4.3 Référentiel lié au champ tournant

C'est le seul référentiel qui n'introduit pas de simplification dans les équations de la machine. Il est utilisé lorsque la fréquence d'alimentation est constante et à fréquence variable lors des petites perturbations autour d'un régime donné. Ce type de référentiel est caractérisé par les relations:

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{Et} \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m \quad (3-20.3)$$



III.5 Conditions d'auto-amorçage

Le phénomène d'auto-amorçage de la génératrice est schématisé par la (Fig. 3-6). Il commence par le flux rémanent et avec la rotation du rotor, il donne une petite tension/courant aux bornes de la Gas à cage et à travers le condensateur d'auto-amorçage qui va augmenter la tension/courant (fourniture de réactif). Ce processus va se répéter jusqu'à l'instant où la tension/courant renvoyée par le condensateur soit égale à celle envoyée par la génératrice (point de fonctionnement).

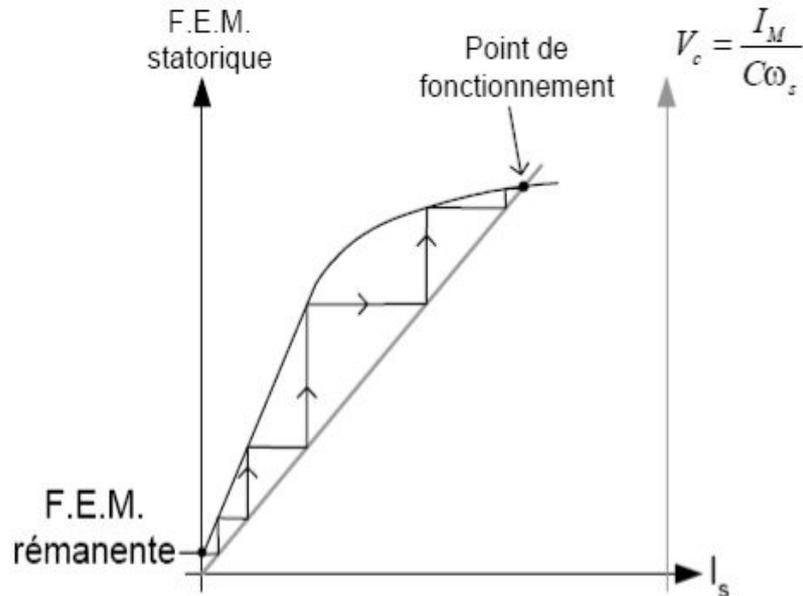


Figure (3 -6): Phénomène d'auto-amorçage [7].

- Fonctionnement Hypersynchrone

Si la vitesse devient supérieure au synchronisme (lorsque la machine est entraînée), c'est à dire que le couple change de signe : $n_2 > n_1 \Rightarrow g = (n_1 - n_2) / n_1 < 0 \Rightarrow \text{couple} < 0$.

Lorsque la machine est entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme « fonctionnement hypersynchrone » la machine fonctionne en générateur alternatif. Mais son stator doit être forcément relié au réseau ou bien à l'aide de condensateurs connectés sur le stator dans le fonctionnement autonome car lui seul peut renforcer le champ magnétique rémanent nécessaire pour magnétiser la machine et générer ainsi les courants rotoriques.

- Connexion de condensateur C

Pour créer un courant réactif qui va renforcer le champ rémanent précédant et augmenter ainsi les F_{em} statoriques. C'est cette réaction cyclique qui va permettre à la machine d'atteindre le point de fonctionnement situé dans la zone saturée. D'après la (Fig. 3-6) lorsque la machine n'est pas saturée, la caractéristique de magnétisation $\phi(I_m)$ est une droite de pente sensiblement égale à la mutuelle L_m . Pour travailler en régime saturé il faut donc que l'inductance magnétique $L_m(I_m) \neq \text{constante}$



III.6 Fonctionnement de la Génératrice asynchrone à vide

III.6.1 Capacité d'auto amorçage

Soit un schéma équivalent d'une une génératrice à vide d'impédance Z_g débitant sur une impédance Z_c (Fig. 3-7) :

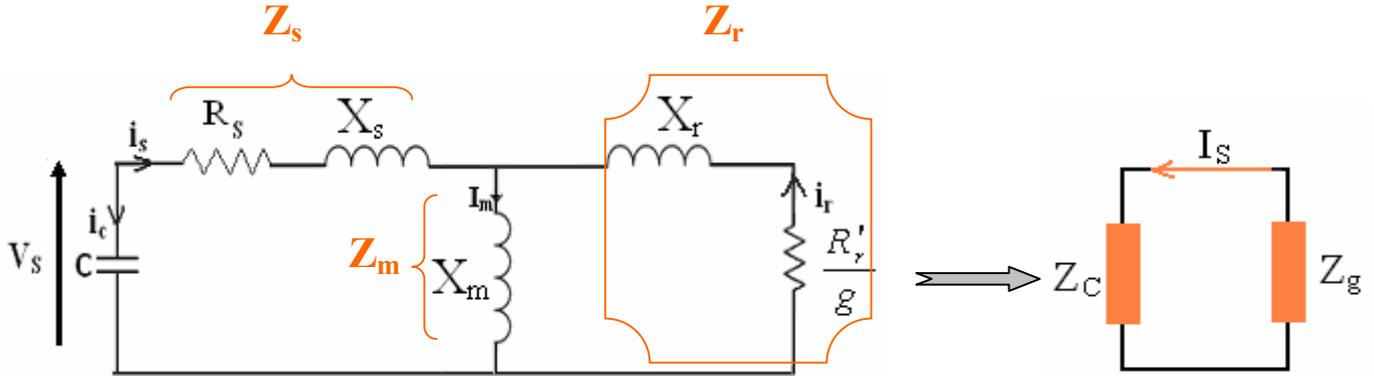


Figure (3 -7): schéma équivalent de la génératrice à vide

On suppose que : $Z_{TOT} = Z_c + Z_g$ (3-21)

Avec :

Z_{TOT} est l'impédance totale de la génératrice

On écrit l'équation des courants sortant et entrant :

$$Z_c \cdot I + Z_g \cdot I = 0 \Rightarrow Z_{TOT} \cdot I = 0 \quad (I_S \neq 0)$$

$$\Rightarrow Z_{TOT} = 0$$

Supposons que:

$$Z_g = Z_s + Z_1 \quad (Z_1 = Z_r // Z_m)$$

Soit :

$$Z_g = R_s + \frac{X_m \cdot X_r \cdot \left(\frac{R'_r}{g}\right) - X_m \cdot (X_m + X_r) \cdot \left(\frac{R'_r}{g}\right)}{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + (X_m + X_r)^2} + X_s + \frac{X_m \cdot X_r \cdot (X_m + X_r) + X_m \cdot \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2}{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + (X_m + X_r)^2}$$
 (3-22)

$$Z_g = \text{Re}(Z_g) + j\text{Im}(Z_g)$$

Avec:

$\text{Re}(Z_g)$ est la partie réelle de l'impédance.

$\text{Im}(Z_g)$ est la partie imaginaire de l'impédance.



Où :

$$Re(Z_g) = R_s - \frac{X_m \cdot X_r \cdot \left(\frac{R'_r}{g}\right) - X_m \cdot (X_m + X_r) \cdot \left(\frac{R'_r}{g}\right) - X_s \cdot X_r \cdot (X_m + X_r)}{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + (X_m + X_r)^2} \quad (3-23)$$

$$Im(Z_g) = \frac{X_m \cdot X_r \cdot (X_m + X_r) + X_m \cdot \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + X_s \cdot \frac{R'_r}{g}}{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + (X_m + X_r)^2} \quad (3-24)$$

$$Z_{TOT} = Re(Z_g + Z_c) + Im(Z_g + Z_c)$$

$$Z_c = 0 + Im(Z_c) \Rightarrow Z_{TOT} = Re(Z_g) + Im(Z_c + Z_g)$$

Les conditions d'amorçage donnent une puissance active négative :

$$(P = R'_r \cdot \left(\frac{1-g}{g}\right)) < 0 \Rightarrow Re(Z_{TOT}) < 0$$

Pour déterminer l'intervalle du glissement qui correspond au fonctionnement de la génératrice on utilise la figure ci-dessous avec ($R_s = 1.6 \Omega$, $R_r = 2.75 \Omega$, $L_m = 0.181 H$, $n = 1500 \text{ tr/min}$, $p = 2$).

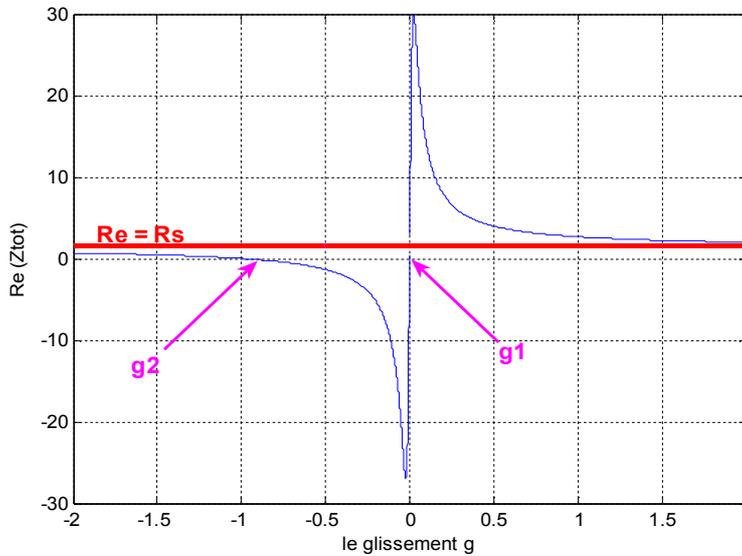


Figure (3-8): Variation du glissement

Les valeurs du glissement qui correspondent à $Re(Z_{TOT}) = 0$ sont :

$$g_1 = \frac{-R_r \cdot X_m + \sqrt{\Delta}}{2R_s \cdot (X_m + X_r)}$$

$$g_2 = \frac{-R_r \cdot X_m - \sqrt{\Delta}}{2R_s \cdot (X_m + X_r)}$$

Avec:

$$\sqrt{\Delta} = \sqrt{(R_r \cdot X_m)^2 - 4R_s^2 R_r^2 (X_m + X_r)^2}$$



III .6.2 Présentation de la Génératrice asynchrone à vide

Le modèle équivalent de la GAS à vide dans le repère (d,q) conduit au schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone (Fig. 3-9) où L_s et L_r sont les inductances propres d'une phase statorique et rotorique respectivement, L_m l'inductance magnétisante, R_r la résistance rotorique et R_s la résistance statorique.

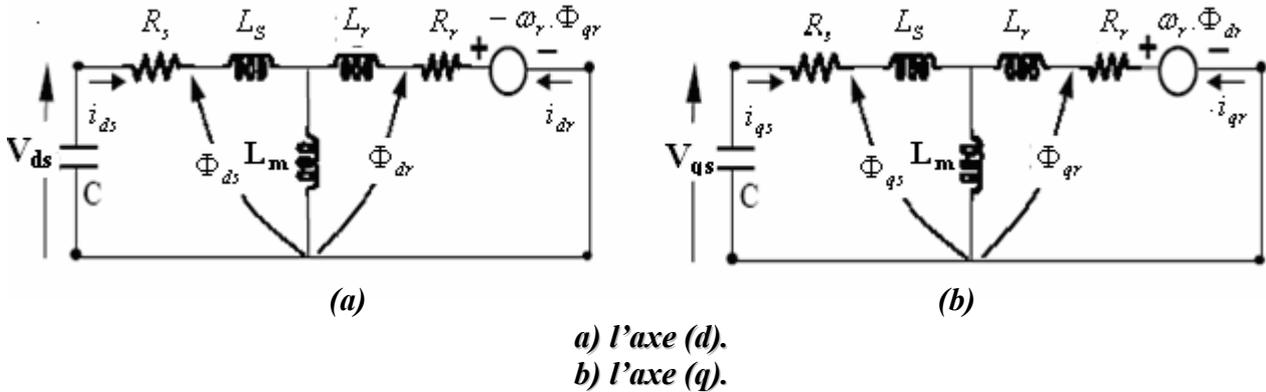


Fig. (3-9): modèle de MAS à cage dans le repère (d,q) à vide [23].

D'après les équations (3-17) et (3-18) avec :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \Phi_{qs} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

En choisissant un référentiel (d, q) lié au stator ($\omega_s = 0$), ($\omega = -\omega_r$), le système devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + L_m \frac{dI_{dr}}{dt} = -R_s \cdot I_{ds} - V_{ds} \\ L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + L_m \frac{dI_{qr}}{dt} = -R_s \cdot I_{qs} - V_{qs} \\ L_m \frac{dI_{ds}}{dt} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} = -\omega \cdot L_m I_{qs} - R_r \cdot I_{dr} - \omega \cdot L_r \cdot I_{qr} \\ L_m \frac{dI_{qs}}{dt} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} = \omega \cdot L_m \cdot I_{ds} + \omega \cdot L_r \cdot I_{dr} - R_r \cdot I_{qr} \end{array} \right. \quad (3-25)$$

D'après le schéma monophasé de chaque phase (d) et (q) à vide représenté dans la (Fig. 3-10)

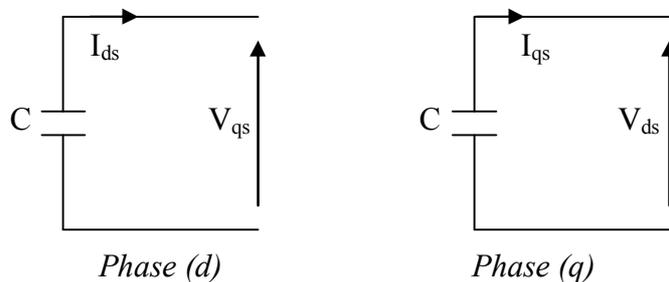


Figure (3-10): schéma monophasé statorique dans le repère (d,q).



En appliquant la loi d'Ohm à chaque phase, on obtient:

$$\begin{cases} C. \frac{dv_{ds}}{dt} = i_{ds} \\ C. \frac{dv_{qs}}{dt} = i_{qs} \end{cases} \quad (3-26)$$

C'est à dire six équations. L'écriture sous forme matricielle de ce système est:

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dI_{ds}}{dt} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} \\ \frac{dV_{ds}}{dt} \\ \frac{dV_{qs}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -\omega.L_m & -R_r & -\omega.L_r & 0 & 0 \\ \omega.L_m & 0 & \omega.L_r & -R_r & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

Nous avons modélisé la machine asynchrone sous forme d'état, soit un système de six équations où on a choisi le vecteur d'état de la façon suivante:

$$[X] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}; [L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -\omega.L_m & -R_r & -\omega.L_r & 0 & 0 \\ \omega.L_m & 0 & \omega.L_r & -R_r & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ce modèle est d'écrit par :

$$[\dot{X}] = [A]. [B]. [X] \quad (3-28)$$

Où :

$$[\dot{X}] = \frac{d}{dt} [X] = S X \quad \text{et} \quad [A] = [L]^{-1}$$

- [L] : représente la matrice d'inductance.
- S : l'opérateur de LAPLACE.



III.6.3 Résultats de Simulation

L'interaction des deux phénomènes (rémanence et magnétisation des condensateurs) entraîne l'amorçage de la machine jusqu'au point de fonctionnement en régime permanent. L'observation de ces courbes montre aisément que les valeurs du rémanent et des condensateurs peuvent modifier l'emplacement du point de fonctionnement sur la caractéristique de magnétisation. L'auto-amorçage est simulé pour le cas où la machine est entraînée à 1500 tr/min à vide et magnétisée par les capacités d'auto-excitation de 60 μ F. La figure 3-11 représente les courbes de la tension et du courant statorique depuis le transitoire jusqu'au permanent.

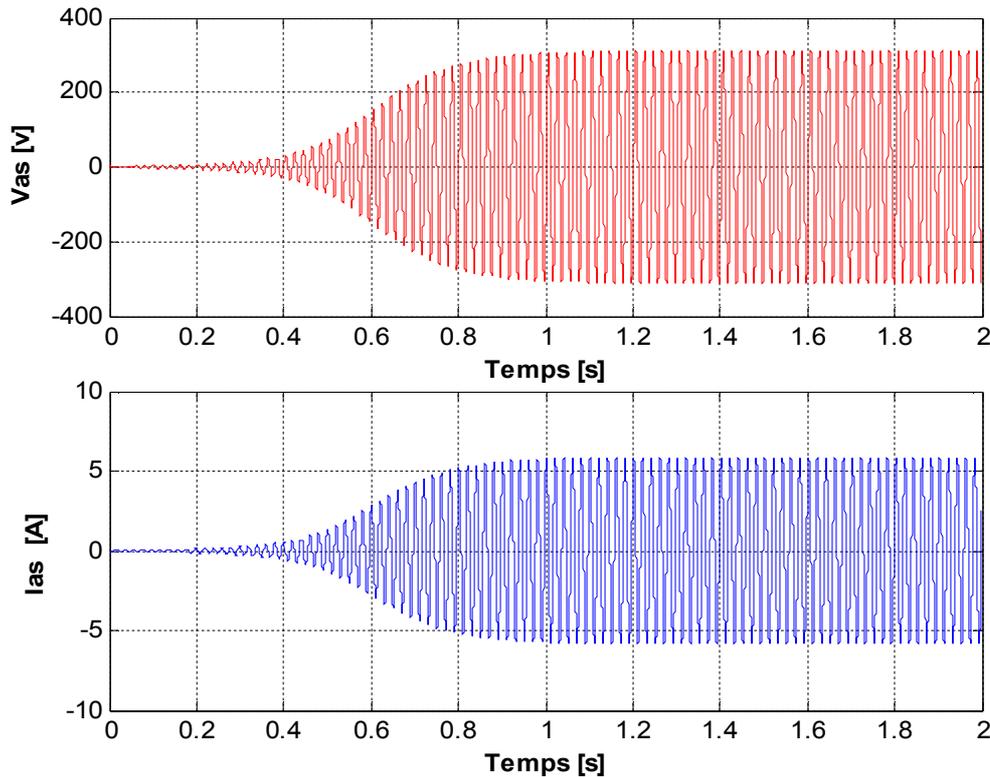


Figure (3-11): Tension et courant d'auto-amorçage à vide

Nous remarquons que la tension et le courant statorique croient d'une façon exponentielle dans la zone du non saturation $t = [0,1]$ puis elles convergent vers une valeur fixe dans la zone saturée où $t = [1,2]$. Le délai d'amorçage jusqu'au régime permanent est de l'ordre de 1s. Les amplitudes des tensions et des courants statoriques obtenues en régime permanent sont égales à 270V et 5.079 A, avec une fréquence de 50Hz. Le courant rotorique donné dans la figure 3-12 est négligeable à vide.

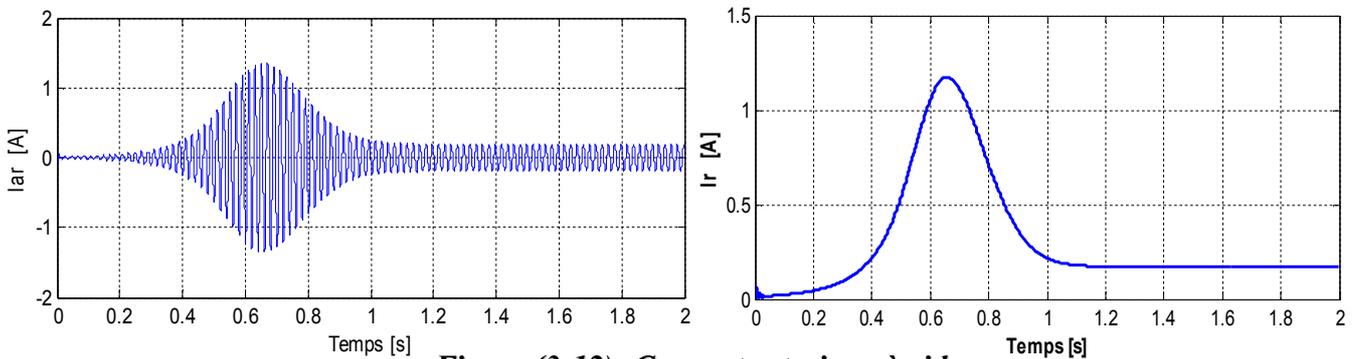


Figure (3-12): Courant rotorique à vide.



III.6.3.1 Influence de la saturation

D'après la (Fig. 3-13), on constate que l'inductance magnétisante varie de manière non linéaire selon la loi « $L_m = f(v)$ » ; on atteint l'amorçage en régime saturé avec un délai de 1s.

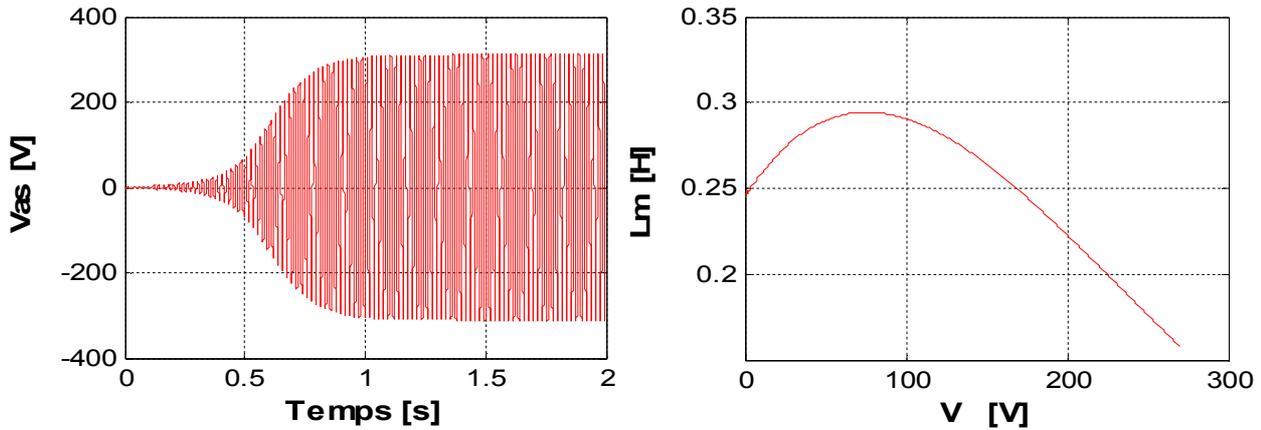


Figure (3-13): Caractéristique en régime saturé.

Si l'inductance magnétisante est considérée comme constante et égale à sa valeur en régime non-saturé, la caractéristique de magnétisation ne présente alors pas de coude de saturation. L'auto-amorçage est alors possible mais la tension statorique augmente alors jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie (Fig. 3-14).

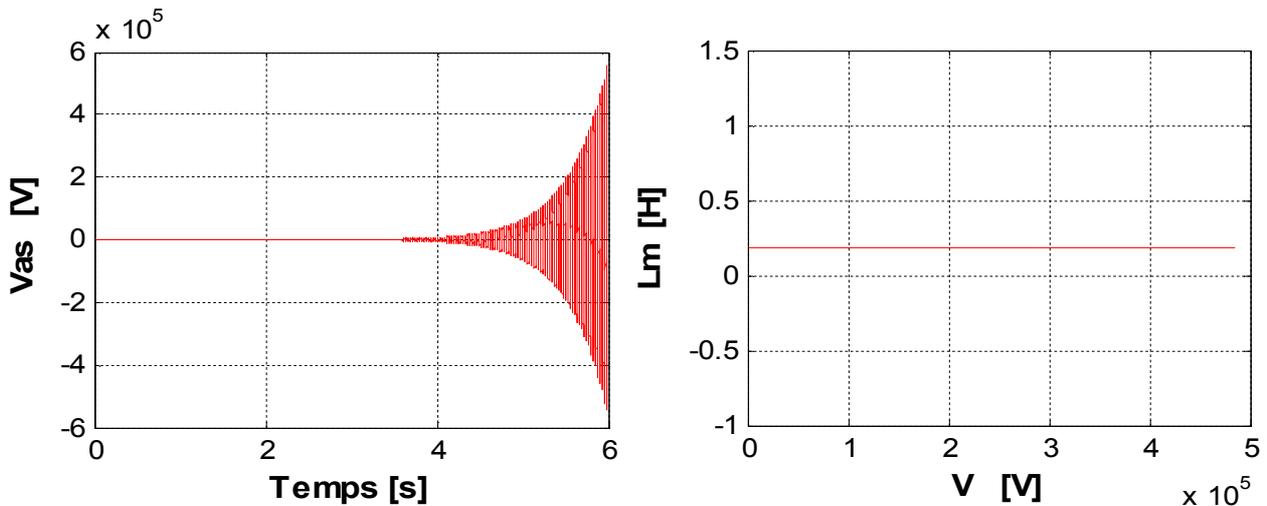


Figure (3-14): Caractéristiques en régime non saturé.

III.6.3.2 Influence de la capacité

Les résultats de simulation illustrée dans la figure 3.15 présentent l'évolution de la tension lorsque l'excitation nécessaire à l'auto-amorçage varie par la variation du condensateur. On constate que l'augmentation et la diminution de la valeur de la capacité influe sur le transitoire de la tension ; les courants statorique et de magnétisation augmentent pour $C > 60 \mu F$, et diminuent pour $C < 60 \mu F$. Par contre cette variation n'a pas beaucoup d'effet sur la fréquence de la tension mais seulement la vitesse.

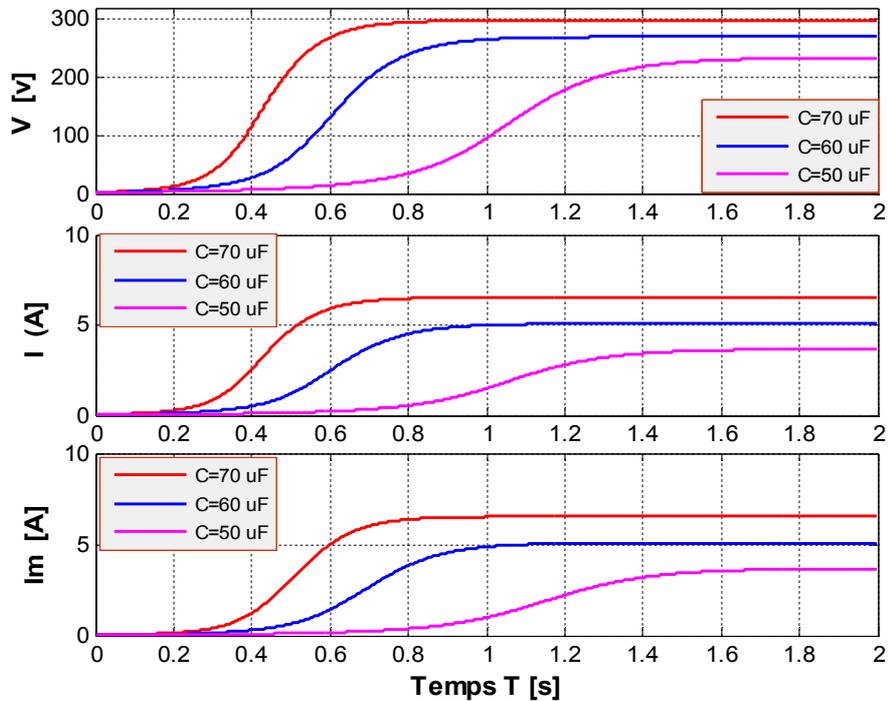


Figure (3-15): L'effet de la capacité sur les caractéristiques (tension- courant) statorique et le courant de magnétisation

Capacité Minimum d'Auto Amorçage

A vide le courant dans le rotor est pratiquement nul. Il faut donc que les capacités fournissent cette puissance réactive. Si la valeur du condensateur est telle que $C = \frac{1}{L_m \omega_s^2}$ La tension et le courant après oscillation décroissent rapidement puis s'annulent ; donc il n'y a pas d'amorçage possible pour une valeur inférieure $C_{min} \approx 40\mu F$. Cela signifie que cette valeur ne donne pas la quantité de courant nécessaire pour l'excitation de la machine.

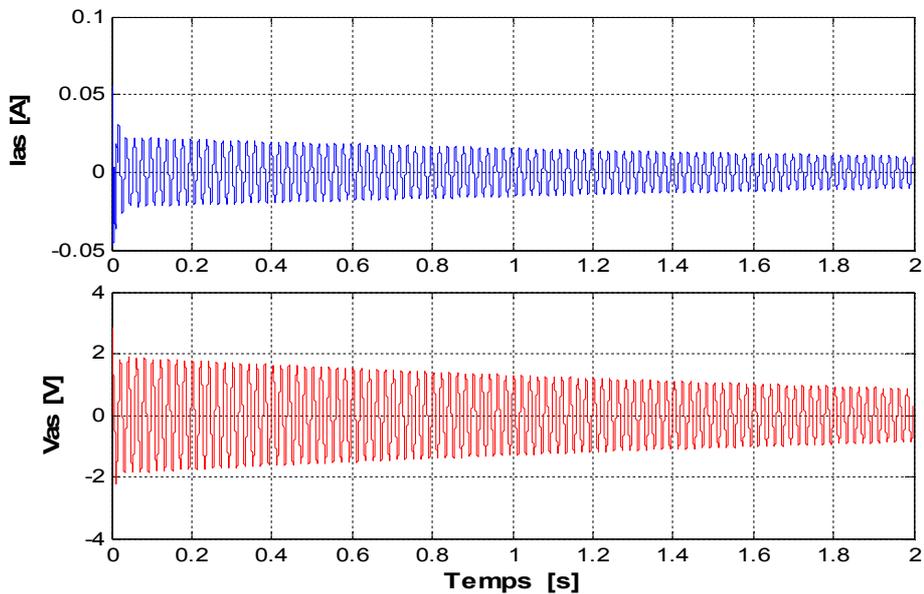


Figure (3-16): Résultats obtenu pour (C=38μF ; n=1500 tr/min)



Par contre quand on augmente la valeur de la capacité on obtient un amorçage jusqu'à une valeur $C_{max} = 206 \mu F$ qui au dessus de la quelle la solution diverge.

III.6.3.3 Influence du champ rémanent

Le champ rémanent est le reste de magnétisation de la machine, qui permet à cette dernière de s'amorcer. L'augmentation de ce reste conduit à réduire le délai d'amorçage ; la (Fig. 3-17) est obtenue pour deux valeurs du champ rémanent x_1 et x_2 avec $x_1 > x_2$ et $n=1500$ tr/min, $C=60 \mu F$.

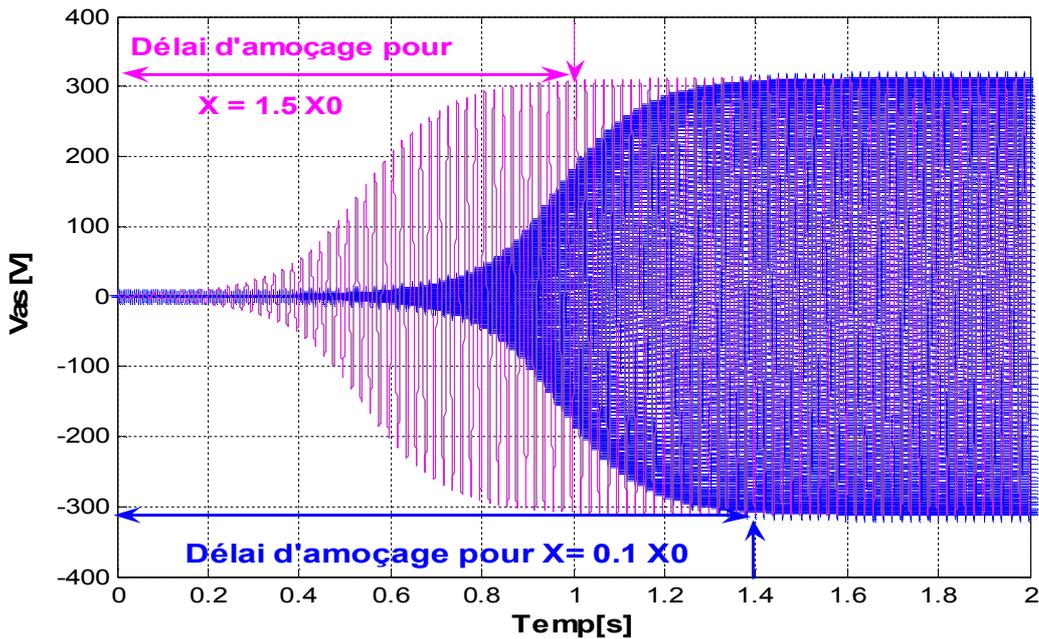


Figure (3-17): l'effet du champ rémanent sur le délai d'amorçage

Les résultats obtenus avec les deux valeurs de x avec : $x_1 = 1.5x_0$ et $x_2 = (0.5) x_0$ et x_0 Avec (x_0 : représente le champ rémanent pour $i_{ds} = i_{qs} = i_{dr} = i_{qr} = 0.01 A$) les résultats sont représentés (Fig. 3-18).

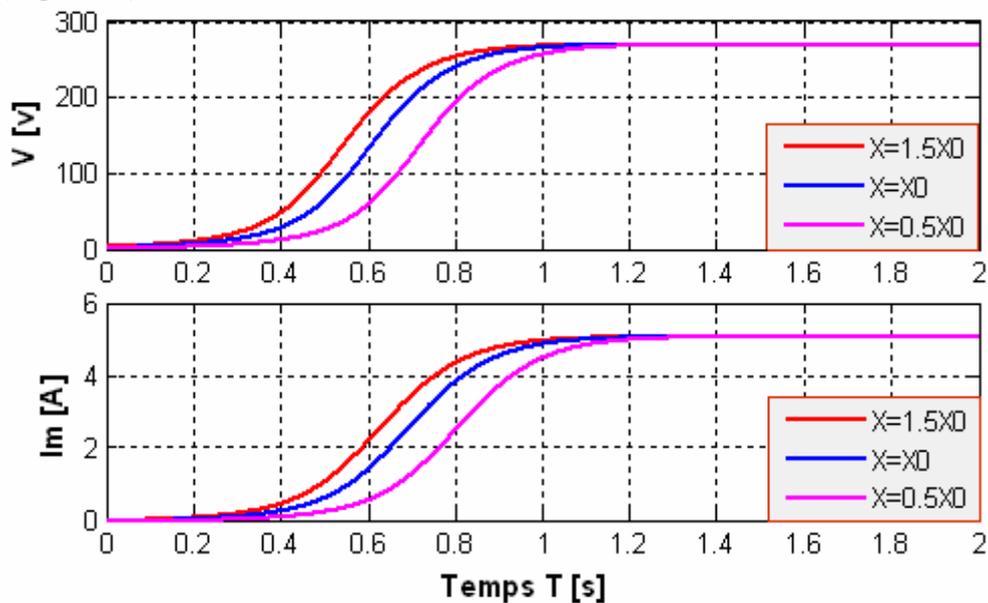


Figure (3-18): l'effet du champ rémanent sur les caractéristiques de la génératrice.



III.6.3.4 Influence de la Vitesse

La vitesse a une influence directe sur la tension, pour un même courant magnétisant, Un passage de 1800 tr/min à 1500 tr/min qui représente une variation de 16.7 % provoque une variation de la tension V de 19% ce qui est illustré dans la figure (3-19) ; la fréquence est linéairement liée à la

vitesse sous la relation $f_s = \frac{np}{60}$ ($g \approx 0$)

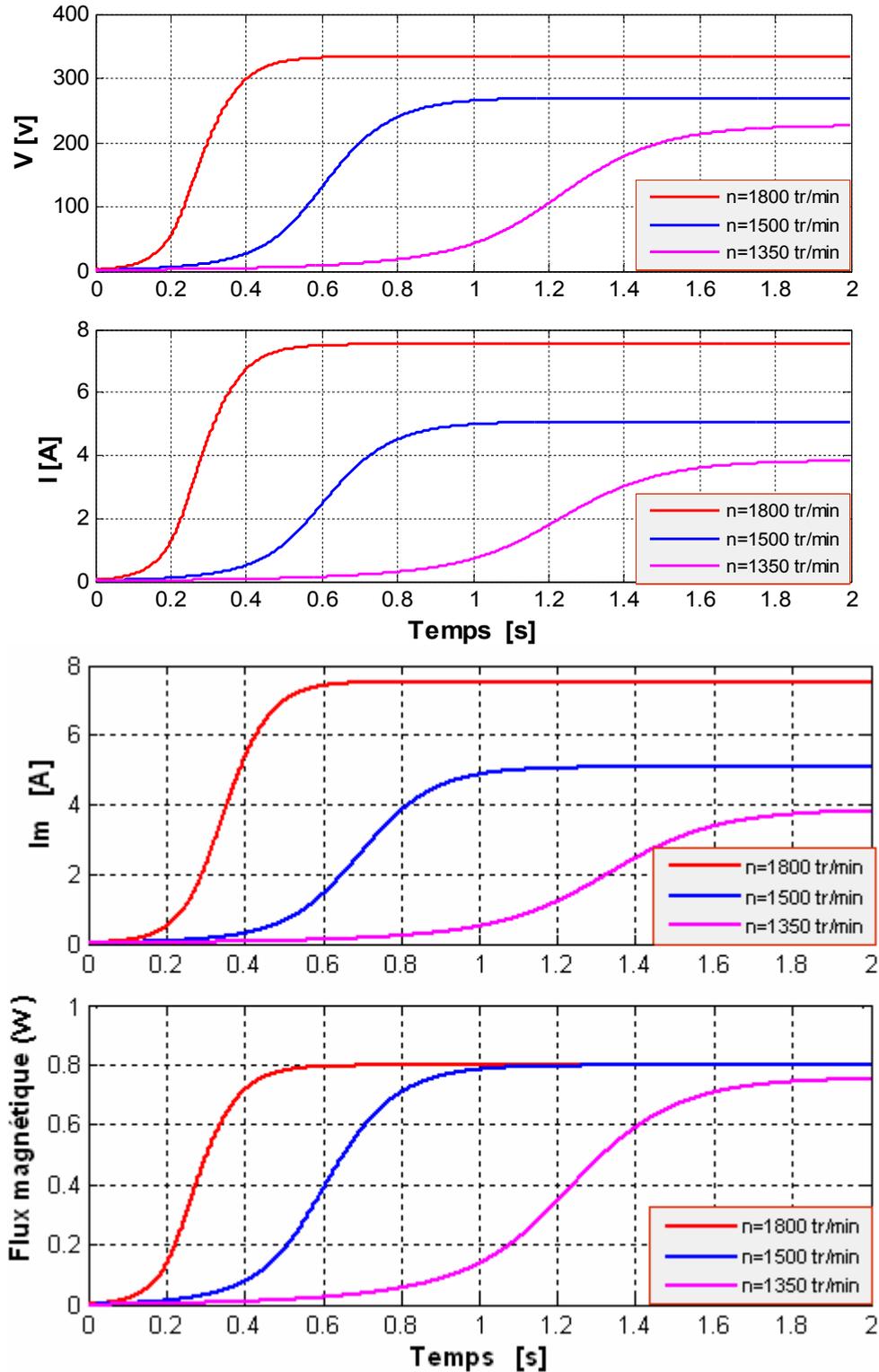


Figure (3-19): Simulation de l'effet de la vitesse sur caractéristiques de la génératrice.



a- Variation soudaine de la vitesse

La machine est entraînée à la vitesse $n=1500$ tr/min jusqu'à $t=1.4$ s ; à $t=1.4$ s en diminuant la vitesse à $n=1200$ tr/min, l'influence de cette variation sur la tension et le courant statorique est représentée dans la (Fig. 3-20).

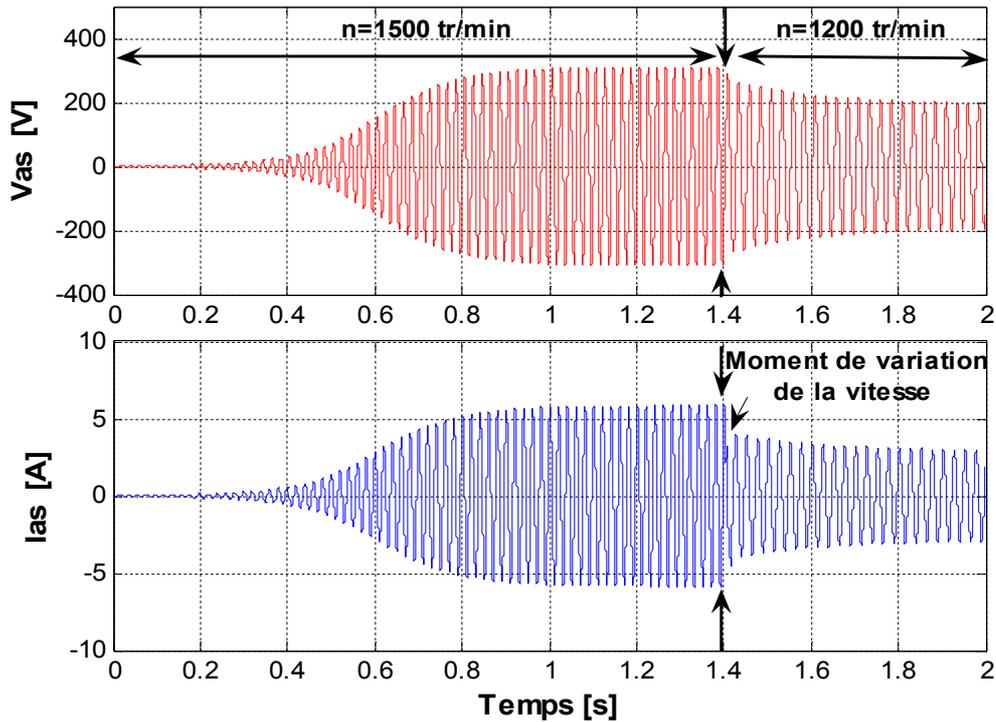


Figure (3-20): Influence de la vitesse sur le courant et la tension statorique.

Une diminution de 20% de la vitesse statorique donne une diminution de 45% de la tension et une diminution de 48% du courant de magnétisation et de 50% du flux magnétique.

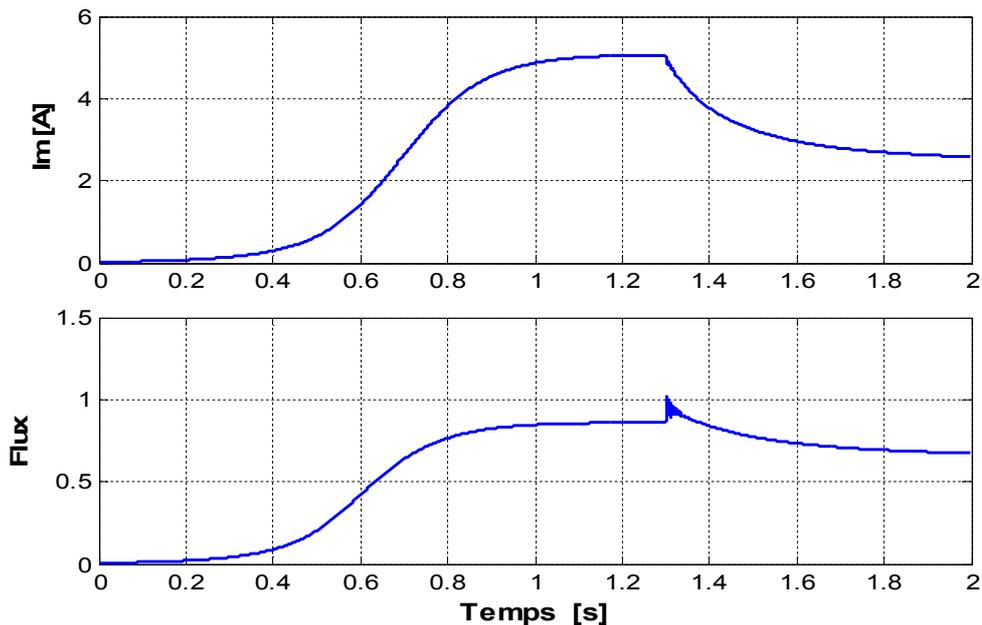


Figure (3-21): Simulation de l'effet de la vitesse sur les paramètres magnétique.



D'après la relation qui donne la fréquence statorique en fonction de la vitesse $f = (p.n)/60$ la (Fig. 3-22) confirme cette loi. On constate que la variation de la vitesse dans une éolienne donne une chute de tension et une variation de fréquence.

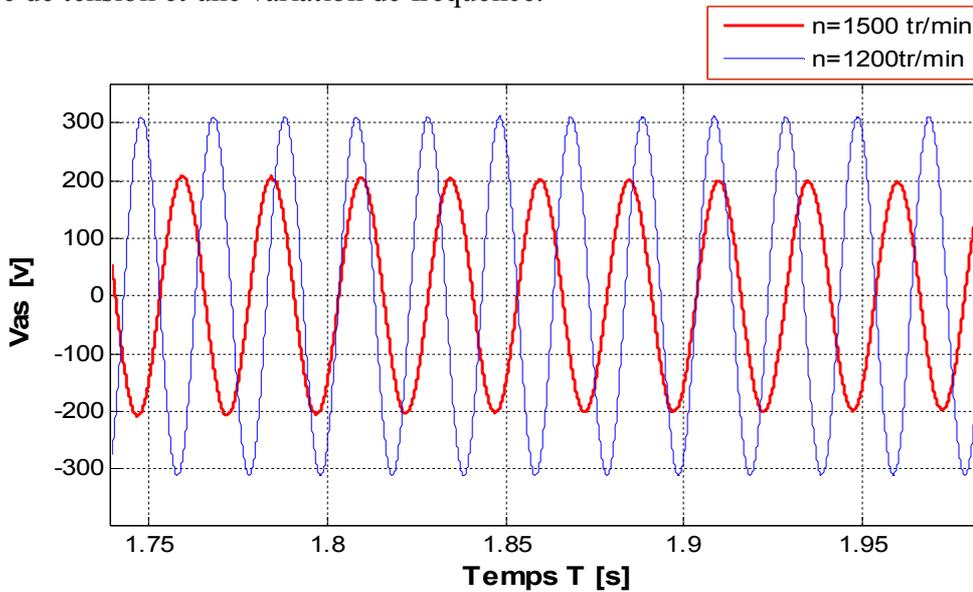


Figure (3-22): Effet de la vitesse minimum sur le phénomène d'amorçage

b- Vitesse Minimum d'auto amorçage

Pour obtenir un amorçage il y a une plage de variation de la vitesse entre 1230 à 2433 tr/min au dessous de la valeur $n_{min}=1230$ tr/min il n'y a pas d'amorçage (V et I)=0, au dessus de $n_{max}=2433$ tr/min le système diverge ; la (Fig. 3-23) montre la variation de la tension ainsi du courant statorique pour $C=60 \mu F$ et $n=1200$ tr/min.

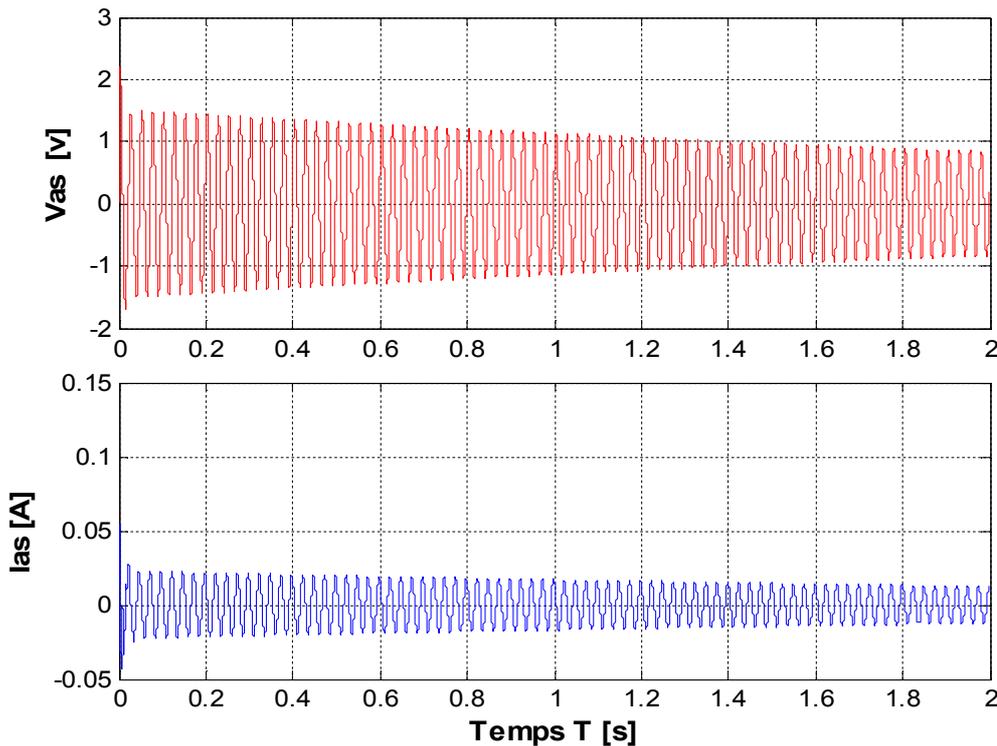


Figure (3-23): Effet de la vitesse minimum sur la phénomène d'amorçage



III .7 Fonctionnement de la Génératrice asynchrone en charge R :

Quand on branche une charge R aux bornes de la génératrice auto-excitée, le schéma équivalent de la GAS en charge résistive R peut alors être modifié comme indiqué sur la (Fig. 3-24) où L_f est l'inductance de fuites totales ($L_f = L_{fs} + L_{fr}$), L_m l'inductance magnétique, R_r résistance rotorique ramenée au stator et g le glissement.

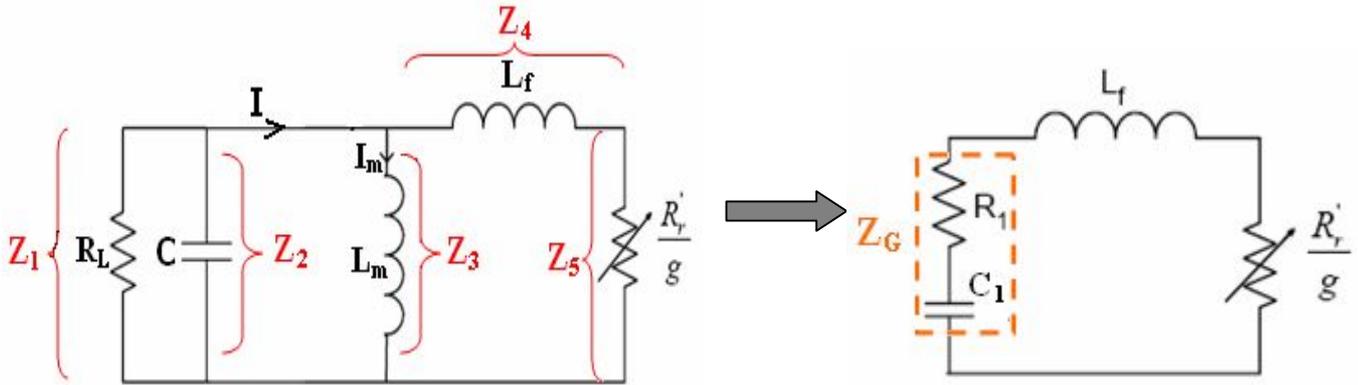


Figure (3-24): Echéma équivalent de la GAS en charge résistive.

D'après le schéma ci-dessus la formule de l'impédance totale Z_{TOT} est donnée par :

$$Z_{TOT} = (Z_5 + Z_4) + (Z_3 // Z_2 // Z_1)$$

On suppose que :

$$Z_G = (Z_3 // Z_2 // Z_1)$$

Alors :

$$Z_G = \frac{R}{1 + \left[R \cdot \left(\frac{1}{L_m \cdot \omega_s} - C \cdot \omega_s \right) \right]^2} + j \frac{R^2 \cdot \left(\frac{1}{L_m \cdot \omega_s} - C \cdot \omega_s \right)}{1 + \left[R \cdot \left(\frac{1}{L_m \cdot \omega_s} - C \cdot \omega_s \right) \right]^2}$$

Soit :

$$Z_G = R_1 - j \frac{1}{C_1 \omega} \tag{3-29}$$

Avec :

$$R_1 = \frac{R}{1 + \left[R \cdot \left(C \cdot \omega_s - \frac{1}{L_m \cdot \omega_s} \right) \right]^2}$$

$$C_1 = \frac{1 + \left[R \left(C \omega_s - \frac{1}{L_m \omega_s} \right) \right]^2}{R^2 \omega_s \left(C \omega_s - \frac{1}{L_m \omega_s} \right)}$$

$$Z_{TOT} = \left(R_1 + \frac{R_r}{g} \right) + J \left(L_f \omega_s - \frac{1}{C_1 \omega_s} \right) \quad (3-30)$$

Condition d'auto-amorçage :

1- Pour la puissance active :

$$P=0 \Rightarrow \frac{R_r^1}{g} + R_1 = 0$$

$$\Rightarrow \frac{R_r^1}{g} + \frac{R}{1 + \left[R \left(C \omega - \frac{1}{L_m \omega} \right) \right]^2} = 0$$

Soit :

$$g = \frac{R_r^1}{R} \left[1 + R^2 \left(C \omega - \frac{1}{L_m \omega} \right)^2 \right] \quad (3-31)$$

2 - pour la puissance réactive :

$$(Q = 0) \Rightarrow L_f \omega_s - \frac{1}{C_1 \omega_s} = 0$$

$$\Rightarrow L_f = \frac{R^2 \left(C \omega_s - \frac{1}{L_m \omega_s} \right)}{\omega_s \cdot \left[1 + \left[R \left(C \omega_s - \frac{1}{L_m \omega_s} \right) \right]^2 \right]} \quad (3-32)$$

D'après La (Fig. 3-25) il y a deux courbes avec:

- $F(\omega_s)$ est toujours inférieur à L_f , (courbe b), il n'y a pas d'amorçage possible.



- $F(\omega_s)$ est toujours supérieur à L_f , (courbe b), il existe deux pulsations ω_1 et ω_2 seule ω_1 est intéressante car ω_2 correspond à un fonctionnement instable.
- $L_f = 22.8 \cdot 10^{-3}$ H

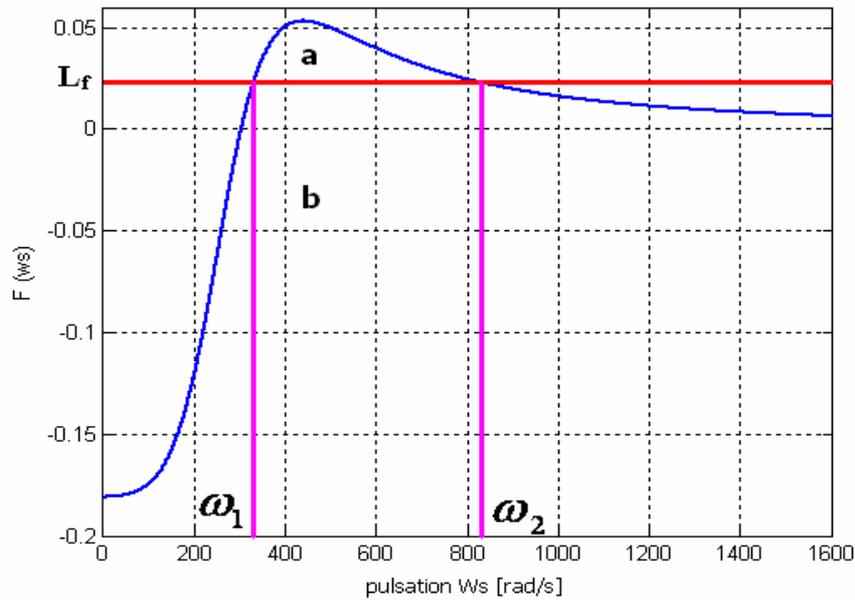


Figure (3-25): Caractéristique $F(\omega_s)$

(Fig. 3-26) montre que deux glissements g_1 et g_2 correspondent aux pulsations ω_1 et ω_2 avec un glissement g_2 qui correspond à la pulsation ω_2 très élevée.

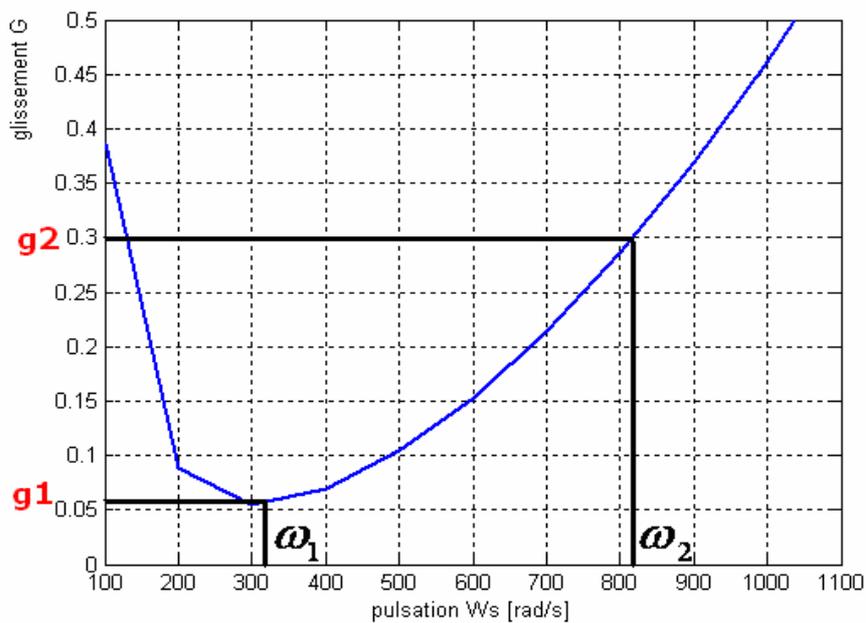


Figure (3-26): Caractéristique du glissement



III .7.1 Présentation de la Génératrice asynchrone en charge R

On utilise le schéma monophasé coté stator dans le repère (d,q), représenté dans la (Fig. 3-27)

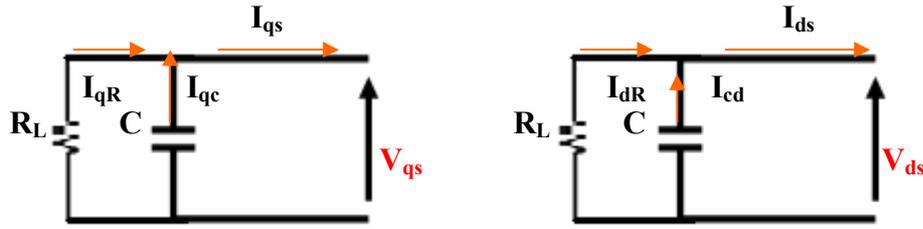


Figure (3-27): Schéma monophasée statorique à cage R dans le repère (d, q)

D'après le schéma ci-dessus le courant statorique I_s est donné par la formule suivante dans le repère (d-q) :

$$\begin{cases} I_{ds} = I_{dR} + I_{dC} \\ I_{qs} = I_{qR} + I_{qC} \end{cases} \quad (3-33)$$

Avec :

$$\begin{cases} I_{dR} = \frac{V_{ds}}{R} \\ I_{dC} = C \cdot \frac{dV_{ds}}{dt} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} I_{qR} = \frac{V_{qs}}{R} \\ I_{qC} = C \cdot \frac{dV_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (3-34)$$

Après remplacement de l'équation 19 dans l'équation 20 on obtient :

$$\begin{cases} \frac{dV_{ds}}{dt} = \frac{I_{ds}}{C} - \frac{V_{ds}}{RC} \\ \frac{dV_{qs}}{dt} = \frac{I_{qs}}{C} - \frac{V_{qs}}{RC} \end{cases} \quad (3-35)$$

Le système d'équation d'état devient :

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dI_{ds}}{dt} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} \\ \frac{dV_{ds}}{dt} \\ \frac{dV_{qs}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -\omega L_m & -R_r & -\omega L_r & 0 & 0 \\ \omega L_m & 0 & \omega L_r & -R_r & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}$$



III.7.2 Résultats de Simulation

Après le branchement de la charge R , nous remarquons que la tension diminue à l'instant où la charge est introduite ; par contre le courant augmente durant cet instant puis il diminue jusqu'à atteindre sa valeur initiale qui confirme la loi ($P=V.I$) ; la figure ci-dessous montre les résultats pour ($C=60\mu\text{F}$, $n=1500$ tr/min, $R=55\ \Omega$).

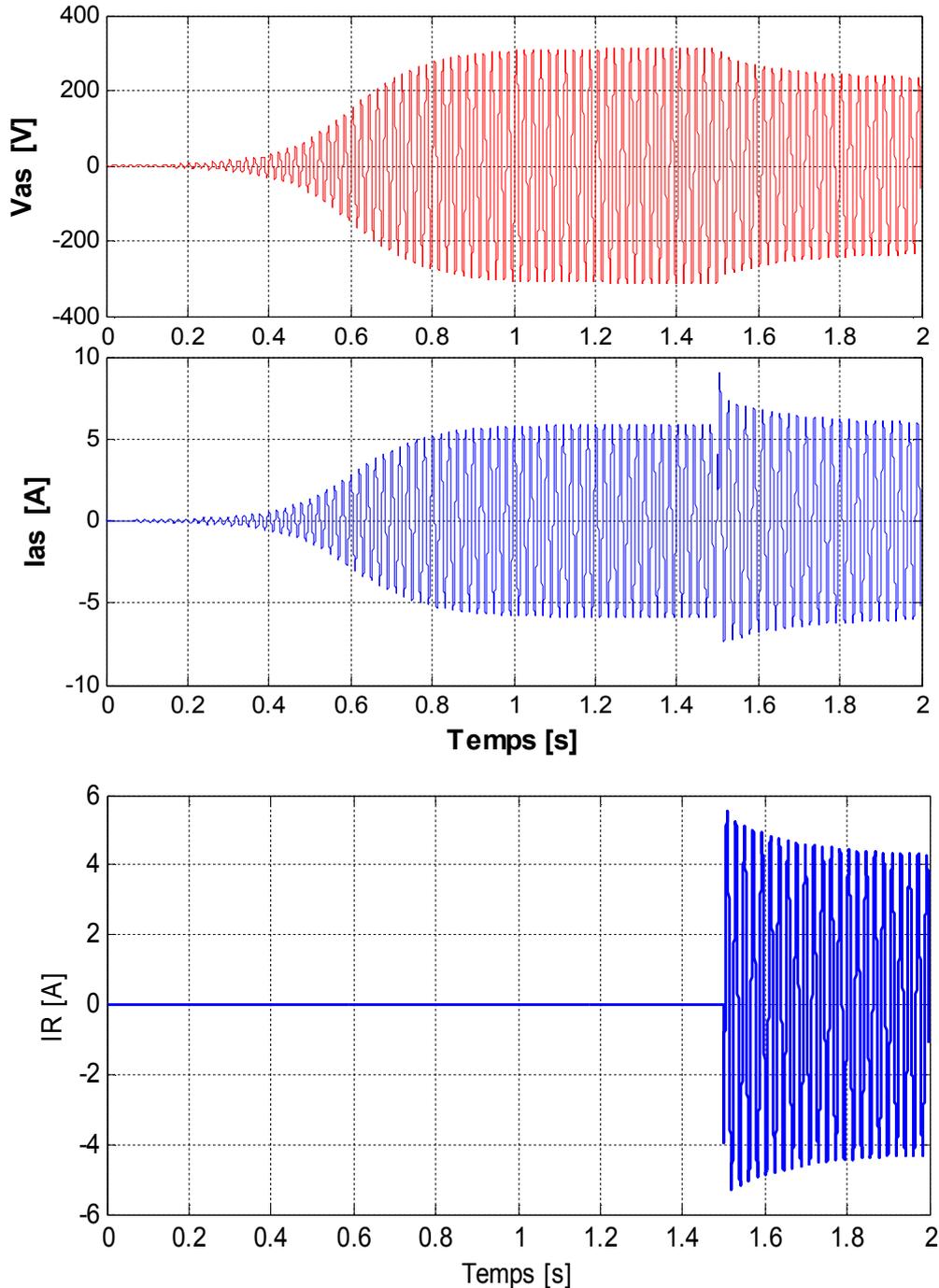


Figure (3-28): L'effet de la connection d'une charge R sur le courant de la charge.

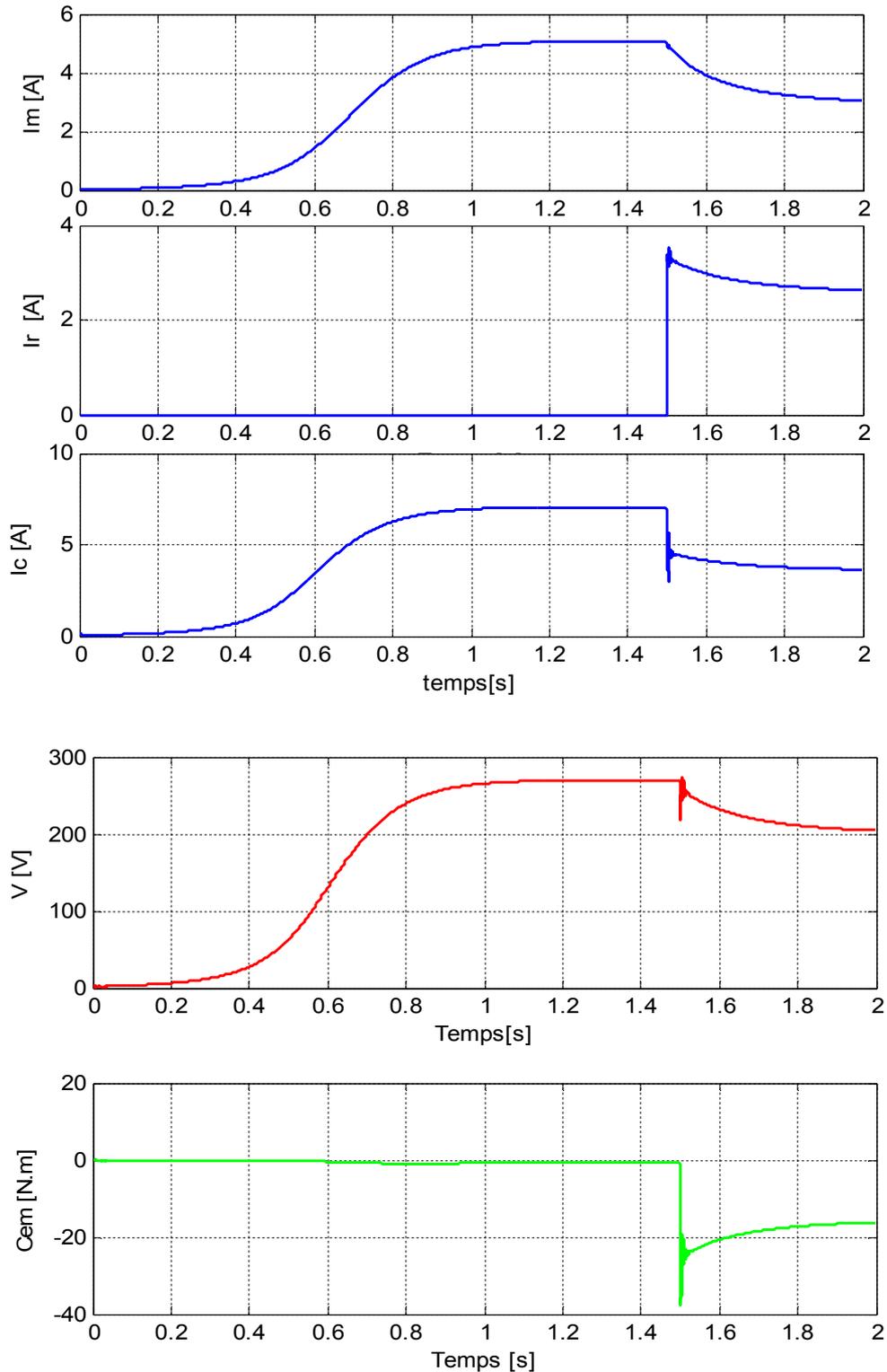


Figure (3-29): Performances de la Gas à cage débitant sur une charge résistive ($R=55\Omega$).

D'après les résultats de simulation illustrés dans (Fig 3-29) et (Fig 3-30) on constate que :

- La tension V_{as} générée par la Gas à cage chute après l'insertion de la charge résistive et dépend de la valeur de celle-ci.
- Le courant de charge I_r est lié au courant généré par la génératrice,
- Le couple électromagnétique transite d'un état stable à vide à un état instable défini par la charge.



Résistance $R(\Omega)$	65	60	55	50
Tension à vide (V)	269.9	269.9	269.9	269.9
Tension générée en charge (V)	219.6	212.9	204.4	193.1
Variation de tension $\frac{(V_{\text{vide}} - V_{\text{charge}})}{V_{\text{vide}}}$	18.64%	21.12%	24.27%	28.45%
courant magnétisant à vide (A)	5.07	5.07	5.07	5.07
courant magnétisant en charge (A)	3.45	3.27	3.051	2.78
Variation de courant magnétisant $\frac{(I_{m\text{vide}} - I_{m\text{charge}})}{I_{m\text{vide}}}$	31.95%	35.50%	39.82%	45.17%

Table (3-1): Effet de la connexion d'une charge résistive sur la GAS auto-excitée

Le tableau 3-1 récapitule les valeurs de la tension et du courant pour les différentes valeurs de R . On constate une diminution de la tension et du courant de la génératrice asynchrone à l'instant d'introduction de la charge résistive. Le courant de la ligne augmente pour fournir le courant de charge, par contre le courant magnétisant diminue de la même façon que la tension.

La cause principale des diminutions des tensions et des courants est due au courant de magnétisation I_m qui traduit l'état magnétique de la génératrice. Ce dernier dépend de la valeur des résistances connectées aux étoiles du stator.

a- Déconnection de la charge R

L'auto-amorçage ayant déjà lieu à vide, la charge résistive est déconnectée à $t = 2$ s. Les trois capacités d'auto-excitation sont fixées à $60 \mu\text{F}$.

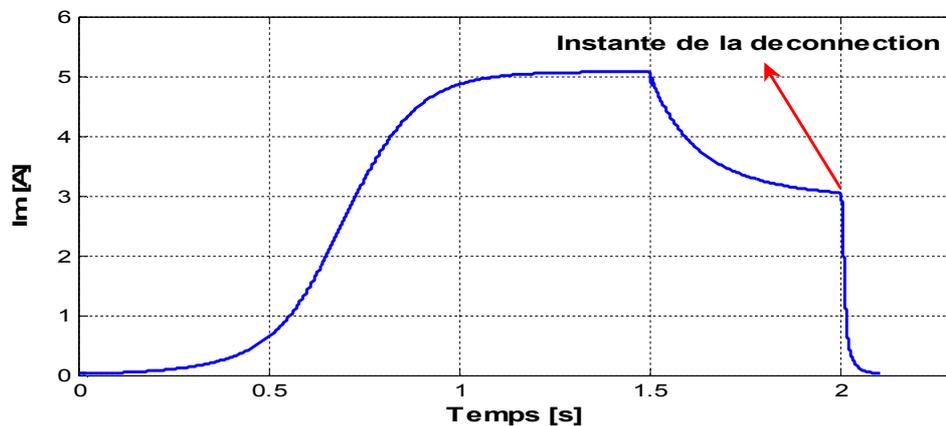


Figure (3-30): Simulation de l'effet de la déconnection de la charge R soudainement



Nous pouvons constater que l'impact de la réduction importante de la valeur de R désamorce la machine et il y a une réduction importante du courant de magnétisation (Fig. 3-30), il existe alors un risque important de démagnétisation. La chute de tension et de courant illustrée dans la figure (Fig.3-31)

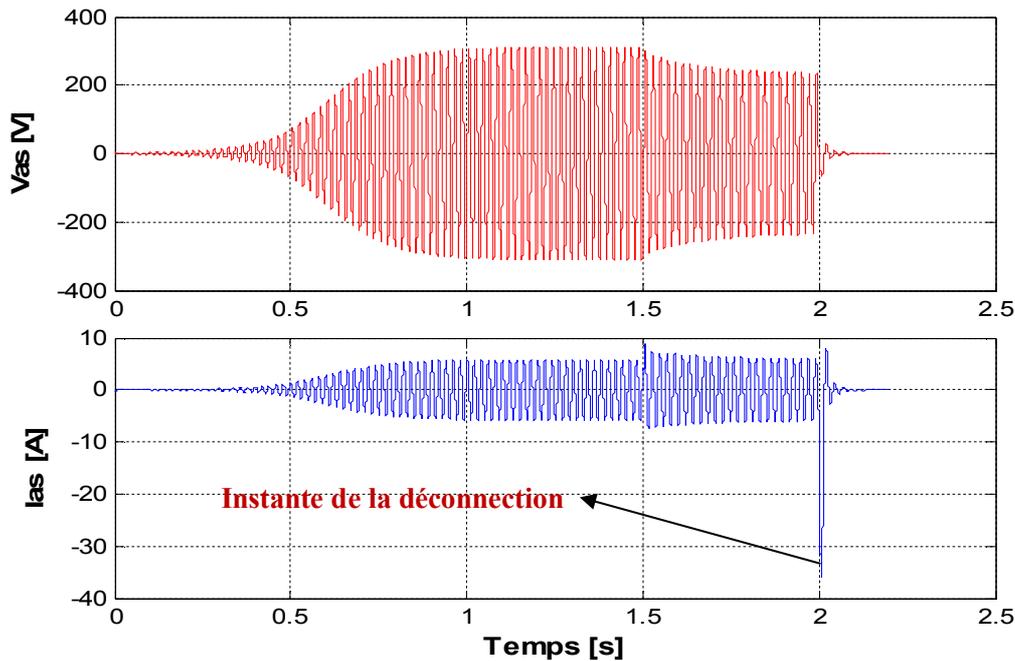


Figure (3-31): Effet de la déconnexion de la charge R soudainement sur la tension et le courant

b- Résistance minimum

La plage de la variation d'une résistance R connecté sur une MAs auto-excitée varie entre $R=25\Omega$ et $R=190\Omega$; au dessous de la valeur $R_{\min}=37\Omega$ la tension s'annule et le courant augmente rapidement jusqu'à atteindre une énorme valeur puis il s'annule. La (Fig. 3-32) est un résultat pour $R=20\Omega$,

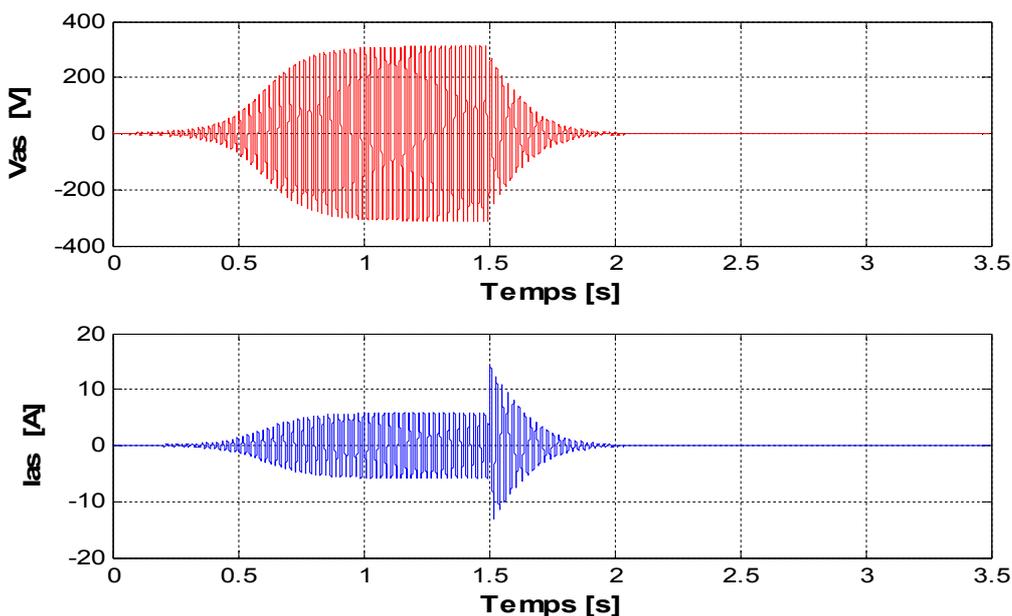


Figure (3-32): Effet de R_{critique} sur la tension et le courant ($C=60 \mu\text{F}$, $n=1500 \text{ tr/min}$).

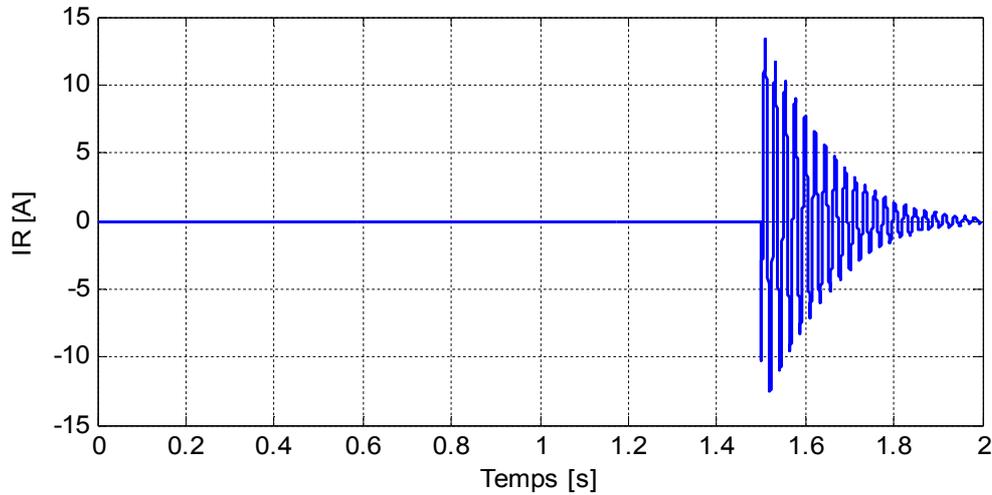


Figure (3-33): Effet d'une résistance au dessous de R_{min} sur la tension et le courant ($C=60 \mu F$, $n=1500 \text{ tr/min}$).

On constate sur les figures ci-dessus que pour une charge critique, la variation de la tension est d'environ de 99.28% et la variation de fréquence de 10%. Ce qui conduit au désamorçage de la GAS suivi d'un court circuit causé par cette charge qui nécessite un contrôle.

Au dessus de la valeur de $R_{max}=190\Omega$, la tension et le courant restent fixés à la valeur du permanent et ne changent plus ; la (Fig. 3-34) est un résultat pour $R=250\Omega$.

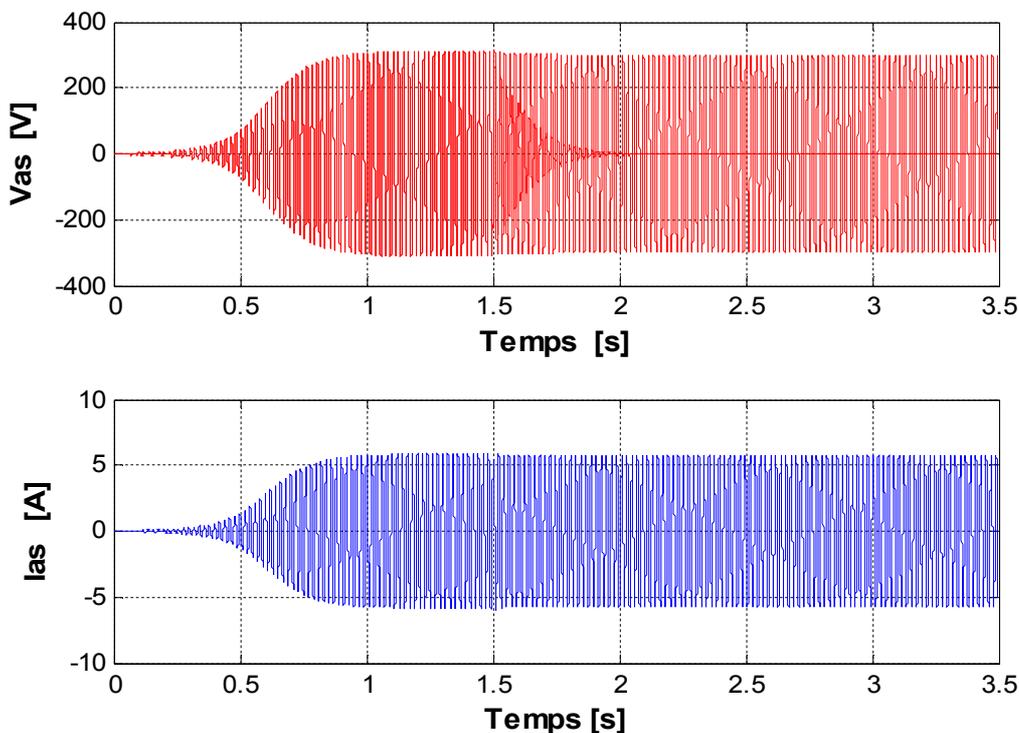


Figure (3-34): Effet d'une résistance R_{max} sur la tension et le courant ($C=60 \mu F$, $n=1500 \text{ tr/min}$)

Pour une valeur de $R_{max}=190\Omega$ il n'y a aucun effet sur la tension et le courant statorique mais il y a une chute de 89.3% du courant de la charge R ; mais il est possible de fournir une tension et une fréquence fixes par une simple méthode qui consiste à connecter en plus des capacités en parallèle, d'autres capacités en série avec la charge cette approche « short-shunt connexion » permet de diminuer la chute de tension de charge.



III .8 Fonctionnement de la Génératrice asynchrone en charge RL :

III .8.1 Présentation de la machine asynchrone en charge RL

Le schéma équivalent de la GAS en charge inductive peut alors être modifié comme indiqué sur la (Fig. 3-35) ou la charge est constituée d'une résistance R en série avec une inductance L.

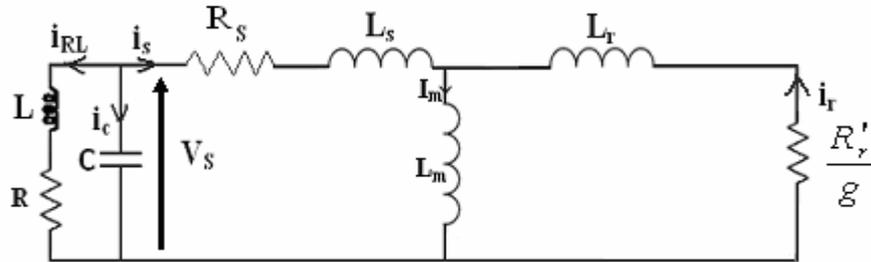


Figure (3-35): Charge mixte R-L

Pour déterminer l'équation d'état d'une machine asynchrone à charge mixte (R-L) on peut utiliser la figure ci-dessous :

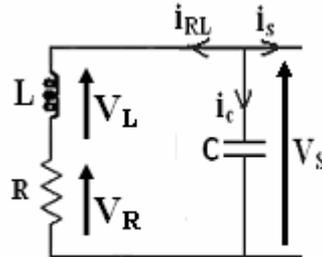


Figure (3-36): Coté stator d'une GAS connecté avec une charge mixte R-L.

D'après la figure ci-dessus :

$$\begin{cases} V_s = V_R + V_L = R.I_{RL} + L.\frac{dI_{RL}}{dt} \\ I_s = I_C + I_{RL} = C.\frac{dV_s}{dt} + I_{RL} \end{cases} \quad (3-36)$$

Alors :

$$\begin{cases} \frac{dV_s}{dt} = \frac{1}{C}.I_s - \frac{1}{C}.I_{RL} \\ \frac{dI_{RL}}{dt} = \frac{1}{L}.V_s - \frac{R}{L}.I_{RL} \end{cases} \quad (3-37)$$

Dans le repère (d-q) :

$$\begin{cases} \frac{dV_{ds}}{dt} = \frac{1}{C}.I_{ds} - \frac{1}{C}.I_{dRL} \\ \frac{dV_{qs}}{dt} = \frac{1}{C}.I_{qs} - \frac{1}{C}.I_{qRL} \end{cases} \quad \text{Et} \quad \begin{cases} \frac{dI_{dRL}}{dt} = \frac{1}{L}.V_{ds} - \frac{R}{L}.I_{dRL} \\ \frac{dI_{qRL}}{dt} = \frac{1}{L}.V_{qs} - \frac{R}{L}.I_{qRL} \end{cases} \quad (3-38)$$



En ajoutant les équations (3-37) au système d'équations (3-38), on obtient l'équation d'état suivante :

$$[X\dot{\bullet}] = [A][B][X] \quad (3-39)$$

Ou :

$$[A] = \text{inv}[L]$$

$$[X] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \\ i_{dRL} \\ i_{qRL} \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega L_m & -R_r & -\omega L_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega L_r & 0 & \omega L_r & R_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$$



III .8.2 Résultats de Simulation

La génératrice fonctionne à vide jusqu'à $t=1.5s$, on branche une charge R_{ch} en parallèle à la capacité C , à $t=2s$ une charge inductive L_{ch} est brancher en série avec R_{ch} , les deux en parallèle à la capacité C . ; les résultats sont donnés (Fig. 3-37) avec :

$$C=60 \mu F, n=1500 \text{ tr/min}, R_{ch}=55 \Omega, L_{ch}=0.125 \text{ H.}$$

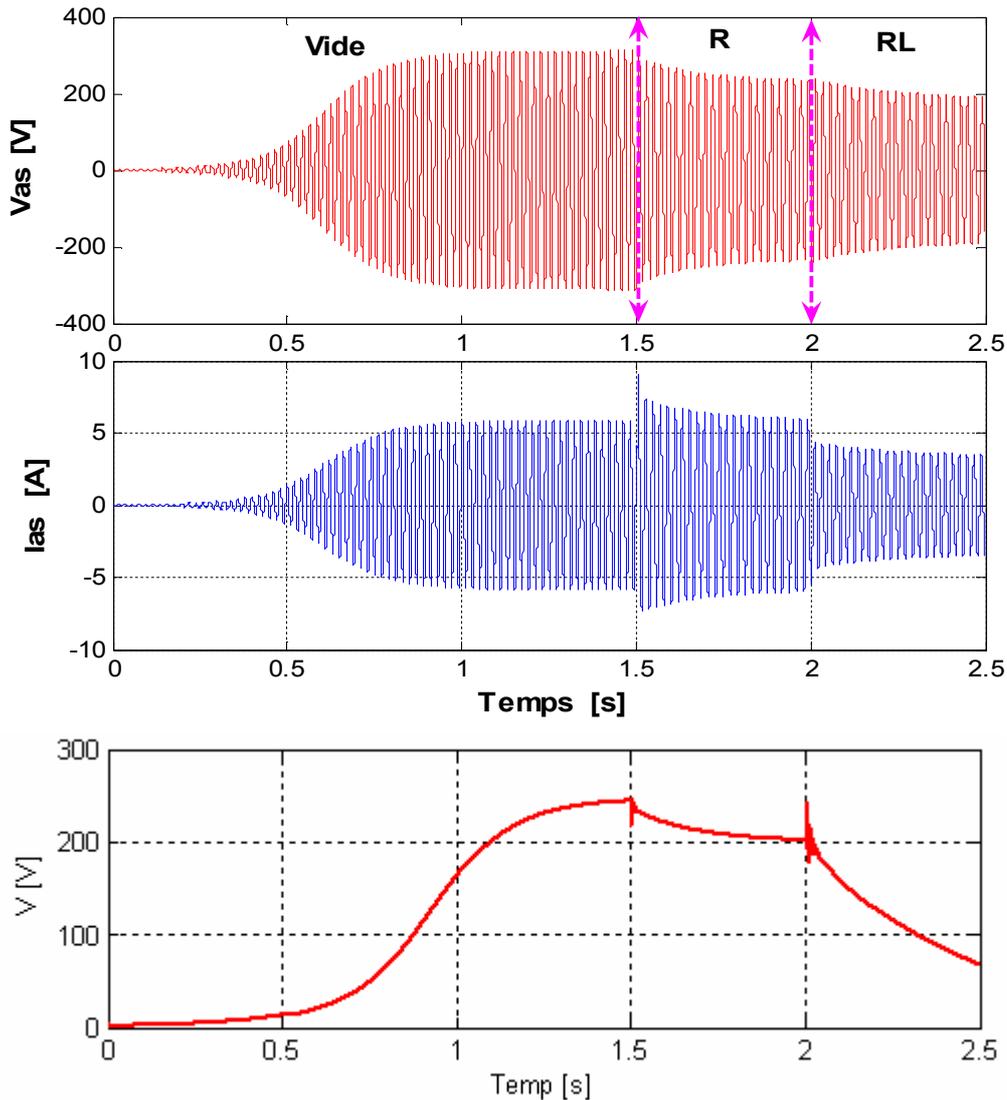


Figure (3-37): Passage d'un GAs fonctionné à vide vers un GAs à charge (R) puis un GAs à (RL)

D'après la (Fig. 3-37) on constate que le branchement d'une charge inductive génère une chute de tension comme dans le cas d'une charge résistive, mais une chute très importante du courant par rapport au premier cas.

III .8.3 Influence de la capacité

C'est la capacité qui doit partager la puissance réactive qu'elle produit entre la machine et les inductances. La connexion d'une charge inductive étant consommatrice d'énergie réactive, nous avons vu son effet sur la magnétisation de la machine. Ce qui donne une chute de tension c'est-à-

dire l'auto amorçage de la génératrice est lié à la condition suivante : $X_c < X_L$. Pour une valeur critique de C_{ch} on constate la chute dans les courants et les tensions selon le tableau (3-2).

Capacité $C (\mu F)$	70	65	60
Résistance $R_{ch}(\Omega)$	55	55	55
Inductance $L_{ch}(H)$	0.4	0.35	0.3
Tension à vide $V_{vide} (V)$	297.7	284.6	269.9
Tension générée avec inductance $V_{ch}(V)$	218.9	176.7	105
Variation de tension (%) $\frac{(V_{vide} - V_{charge})}{V_{vide}}$	26.46	37.91	61
courant à vide $I_{vide}(A)$	6.53	5.799	5.07
courant générée avec inductance $I_{ch}(A)$	3.358	2.369	1.215
Variation de courant (%) $\frac{(I_{mvide} - I_{mcharge})}{I_{mvide}}$	48.57	59.1	76.03

Tab. (3-2): Effet de la connexion d'une charge mixte(R-L) sur une MAS auto-excitée

Les résultats donnés dans le tableau (3-2) sont obtenus lorsqu'on fait varier la capacité et l'inductance de la charge tout en maintenant la partie réelle de la charge constante (55Ω) avec une vitesse d'entraînement constante.

Ces résultats montrent que la variation de tension en fonction de la charge est d'environ 41 % et la variation du courant de 60%. La connexion d'une charge inductive est consommatrice d'énergie réactive, donc elle diminuera le courant d'excitation qui est fourni par le condensateur. Cette diminution du courant signifie moins de flux, ce qui nuit à la magnétisation de la machine car ce sont les capacités qui doivent donner la puissance réactive qu'elles produisent entre la machine et les inductances.

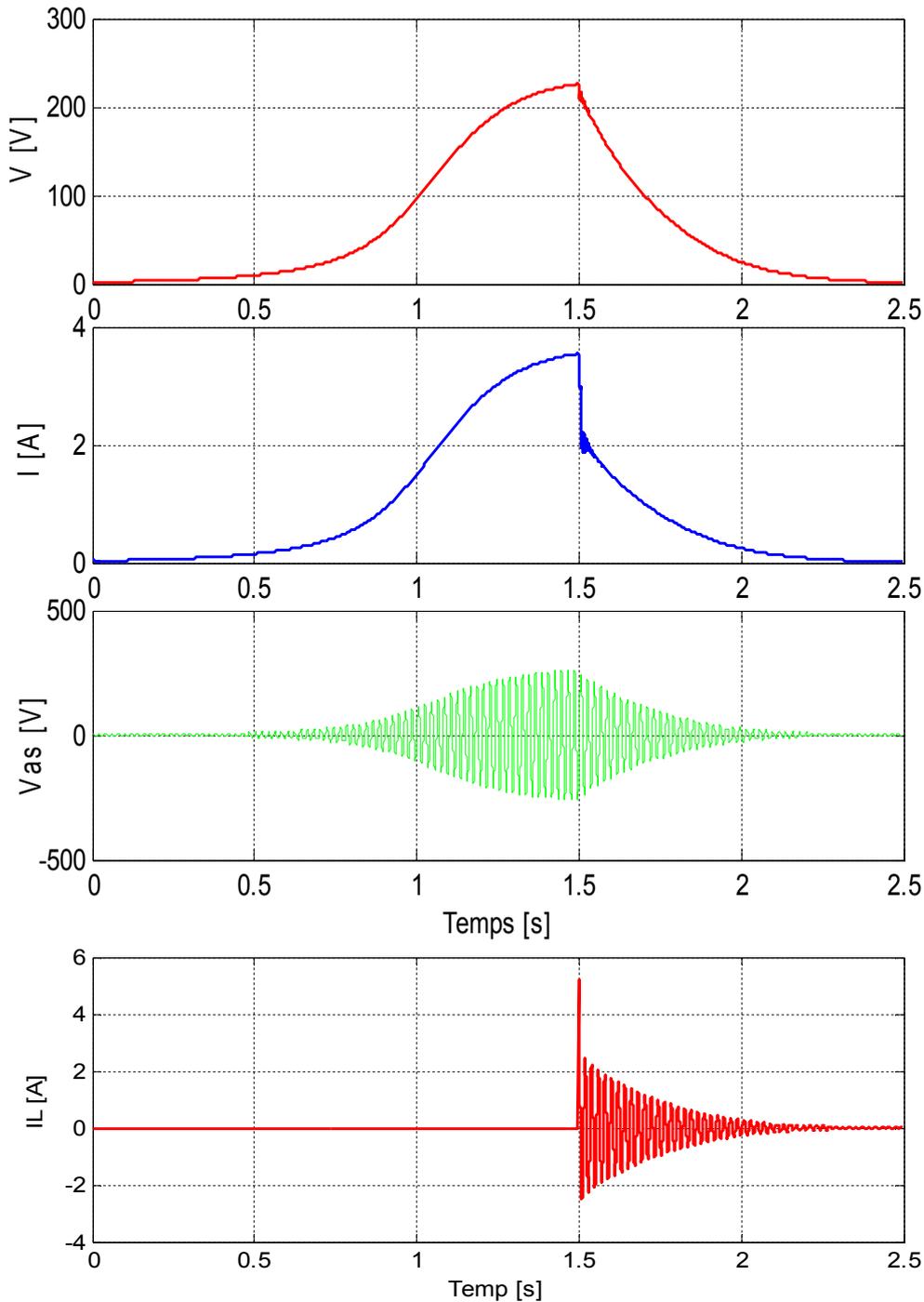


Figure (3-38): L'effet de la Capacité critique d'auto amorçage pour GAs connecter en charge RL

La valeur de C_{critique} ne donne pas l'énergie réactive nécessaire pour magnétiser la machine ce qui signifie l'augmentation de la valeur de C_{min} dans le cas d'une charge RL, ce qui donne une diminution d'énergie réactive qui partagé entre L_m et L_{ch} et il y a un risque de démagnétisation de la génératrice avec une chute de tension et du courant vers le 100%. Comme représenté dans (Tab.3-6).

La caractéristique tension en fonction de la puissance est représentée dans le même repère ci-dessous pour une excitation de $C=70\mu\text{F}$, $C=60\mu\text{F}$ et $C=50\mu\text{F}$ respectivement de couleur rouge bleue et rose.

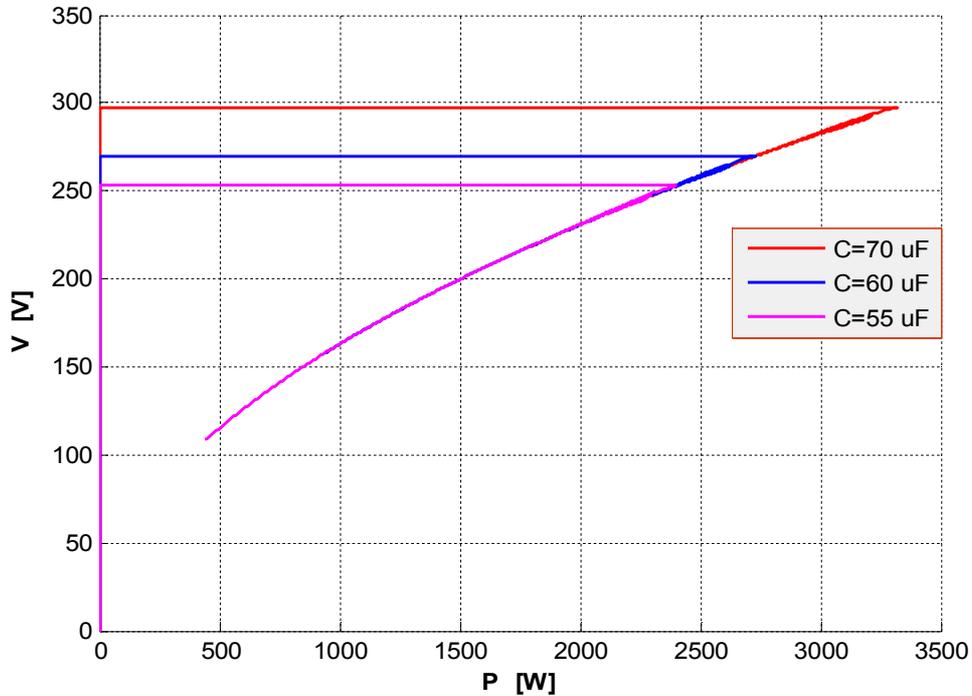


Figure (3-39): Caractéristique tension en fonction de la puissance ($L_{ch}=0.3 H$).

- Lorsque l'excitation est de ($C=70\mu F$) on constate que le décrochage de la génératrice intervient à partir d'une puissance maximale de 3322 W.
- Pour une excitation de $C=60\mu F$ le point de décrochage est repoussé à une puissance maximale de 2700 W.
- Pour l'excitation est de $C=55\mu F$, on constate que le décrochage de la génératrice intervient à partir d'une puissance maximale de 2400 W.

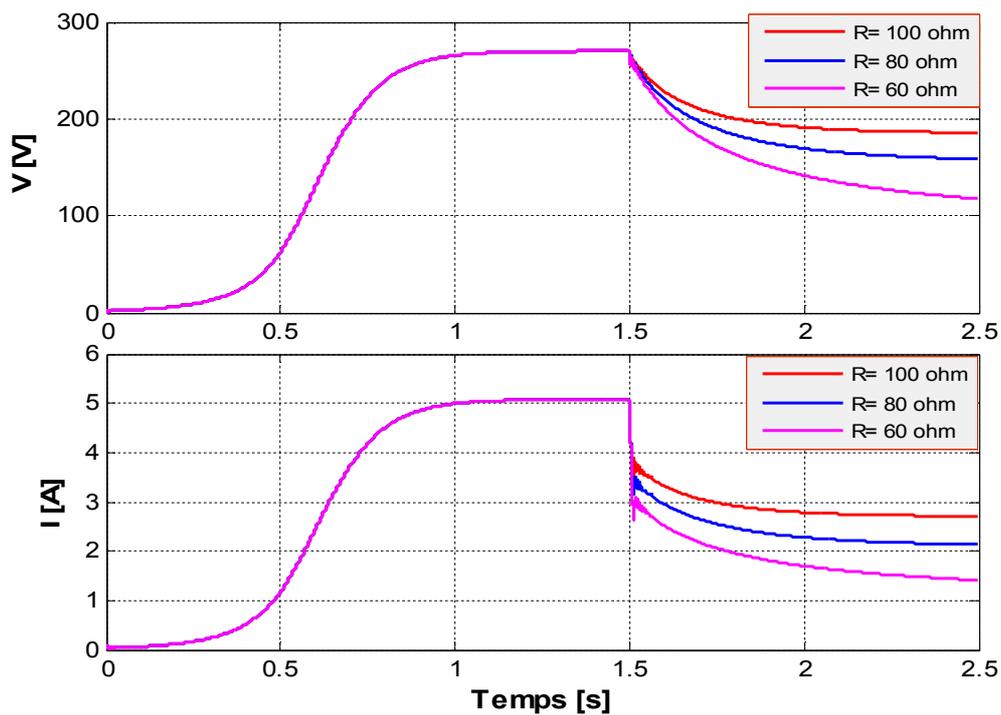


Figure (3-40): L'effet de la résistance R_{ch} pour ($L_{ch}=0.3H, n=1500 \text{ tr/min}, C=60\mu F$).



En revanche on observe des valeurs plus importantes de la tension aux bornes des enroulements du stator, il ne faudrait donc pas « sur-exciter » la machine notamment à faible charge. Dans tous les cas on s'aperçoit que la tension diminue et de ce fait la puissance réactive aussi.

L'augmentation de R_{ch} ou L_{ch} signifie l'augmentation de l'impédance et la diminution du courant circulé dans (RL), par conséquent l'augmentation du courant de magnétisation qui donne une diminution de la chute de tension et du courant dans (Fig. 3-39) et (Fig. 3-40).

III .8.4 Influence de l'inductance

Dans le but de mieux voir et expliquer l'influence de l'inductance sur les performances de la génératrice, on a procédé à trois tests (on garde la valeur de $R_{ch}=55\Omega$) : dans le premier test ($L_{ch}=0.3H$). Dans le deuxième test, (on garde la valeur de $R_{ch}=55\Omega$), et on varie ($L_{ch}=0.4H$). Dans le troisième test, (on garde la valeur de $R_{ch}=55\Omega$), et on varie ($L=0.4H$).

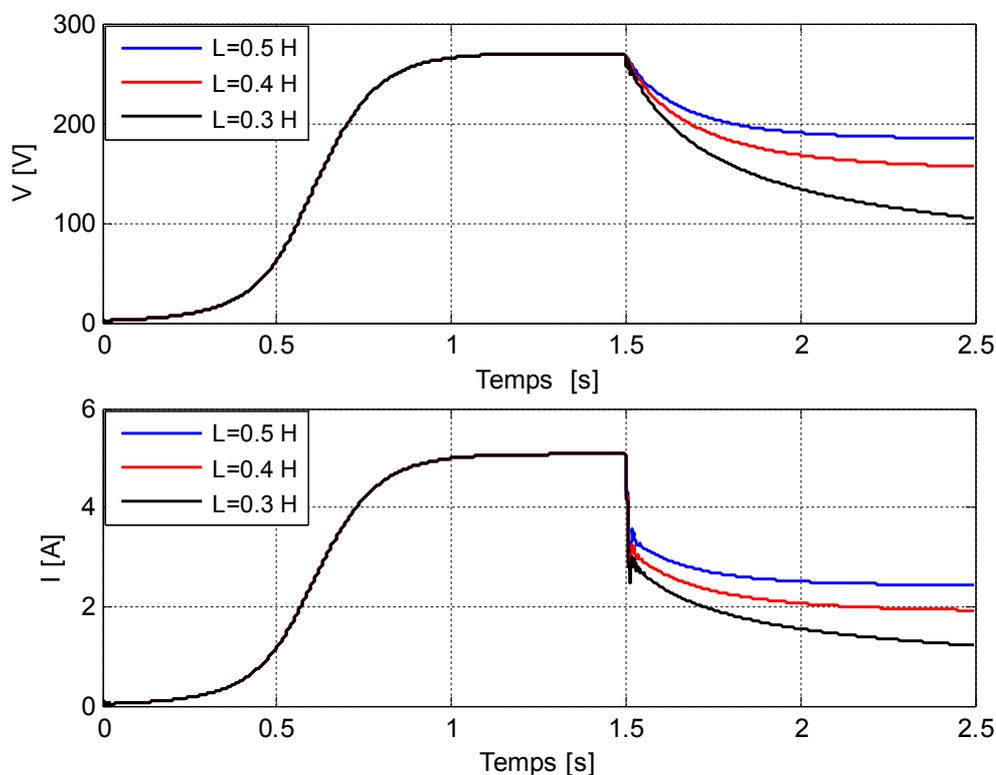


Figure (3-41): L'effet de l'inductance pour ($R_{ch}=55\Omega$, $n=1500$ tr/min, $C=60\mu F$).

L'effet que la charge inductive est consommatrice d'énergie Réactive, ce qui est nuisant à la magnétisation de la machine et engendre des diminutions supplémentaires des caractéristiques, car se sont les capacités d'excitations qui doivent partager la puissance réactive qu'elles produisent entre la machine et les inductances.



III .9 GAS à cage en charge résistive R avec Compensation série

III .9.1 Modélisation

Cette approche ("*short-shunt connexion*") permet de diminuer la chute de tension de la charge. Le rôle des capacités parallèles reste le même, mais les capacités en séries servent de régulateurs. De plus, en fonctionnement autonome, le système est destiné à alimenter un consommateur isolé. Cela suppose que la charge n'est pas forcément équilibrée et qu'elle est variable dans le temps. La charge est constituée d'une résistance R en série avec une capacité C_{ch} montées en parallèle avec le condensateur d'excitation C . Le schéma équivalent peut alors être modifié comme indiqué sur la (Fig. 3-42).

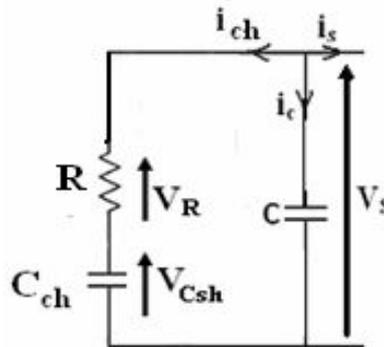


Figure (3-42): Coté stator d'une GAS connecté avec une charge mixte R-C.

La tension aux borne de la charge est donnée par :

$$\begin{cases} V_{ds} = RI_{dch} + \frac{1}{C_{ch}} \int_{dch} dt \\ V_{qs} = RI_{qch} + \frac{1}{C_{ch}} \int_{qch} dt \end{cases}$$

En dérivant cette équation on a :

$$\begin{cases} \frac{dV_{ds}}{dt} - R \frac{dI_{dch}}{dt} = \frac{1}{C} I_{dch} \\ \frac{dV_{qs}}{dt} - R \frac{dI_{qch}}{dt} = \frac{1}{C} I_{qch} \end{cases} \quad (3-40)$$

Aux équations (3-40) on doit les ajouter le système (3-35). L'équation d'état de ce système devient :

$$[X \cdot] = [A][B][X] \quad (3-41)$$



Ou :

$$[X] = \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \\ i_{dch} \\ i_{qch} \end{pmatrix}$$

$$[A] = inv[L]$$

$$[L] = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -R \end{pmatrix}$$

$$[B] = \begin{pmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega.L_m & -R_r & -\omega.L_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega.L_r & 0 & \omega.L_r & -R_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{ch}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{ch}} \end{pmatrix}$$



III .9.2 Résultats de Simulation

Les résultats de simulation pour ($n=1500 \text{ tr/min}$, $R=55 \Omega$, $C_{ch}=30 \mu F$, $C=60 \mu F$) sont présentés par les figures ci-dessous.

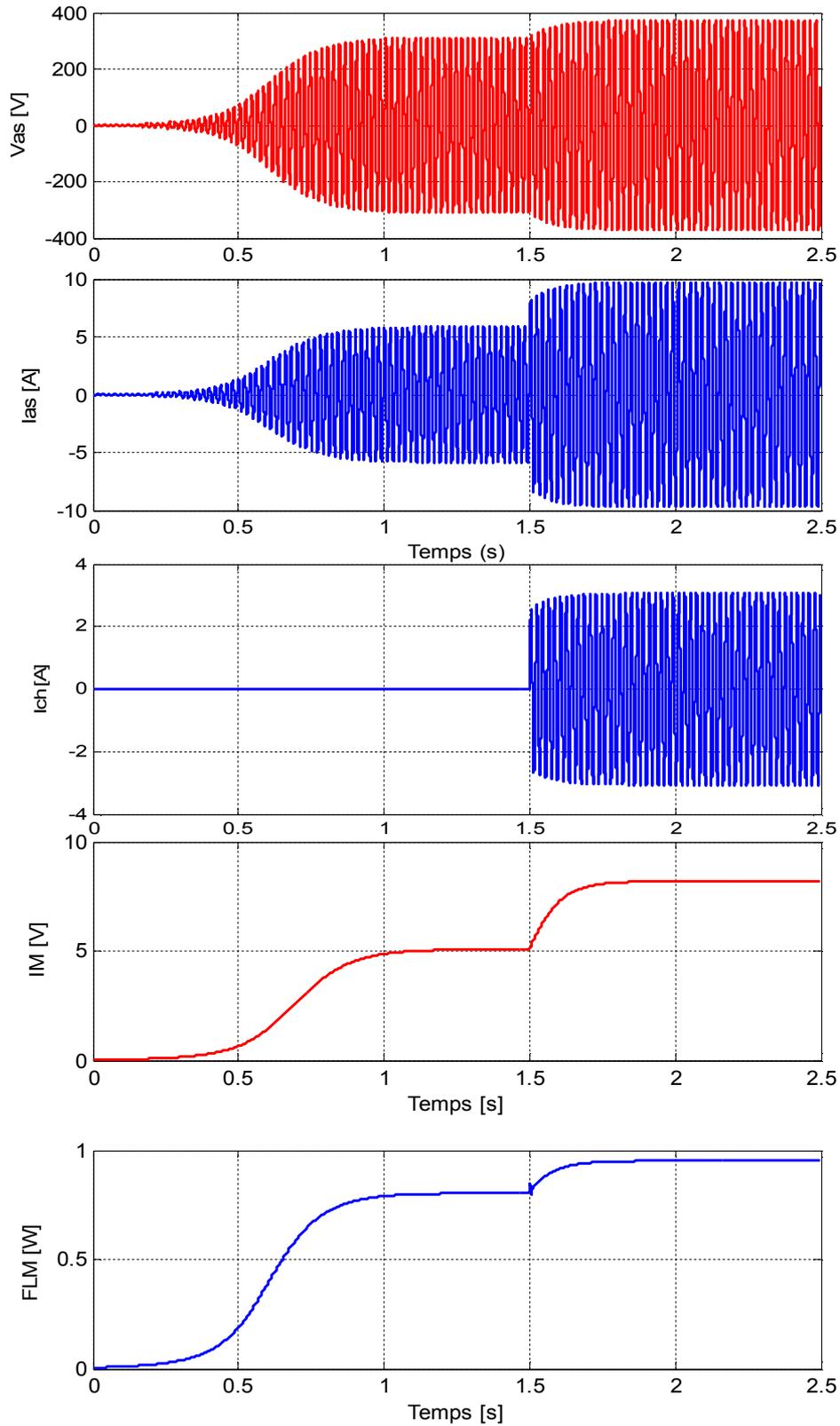


Figure (3-43): Courants et flux de magnétisation l'ors de l'insertion du condensateur.

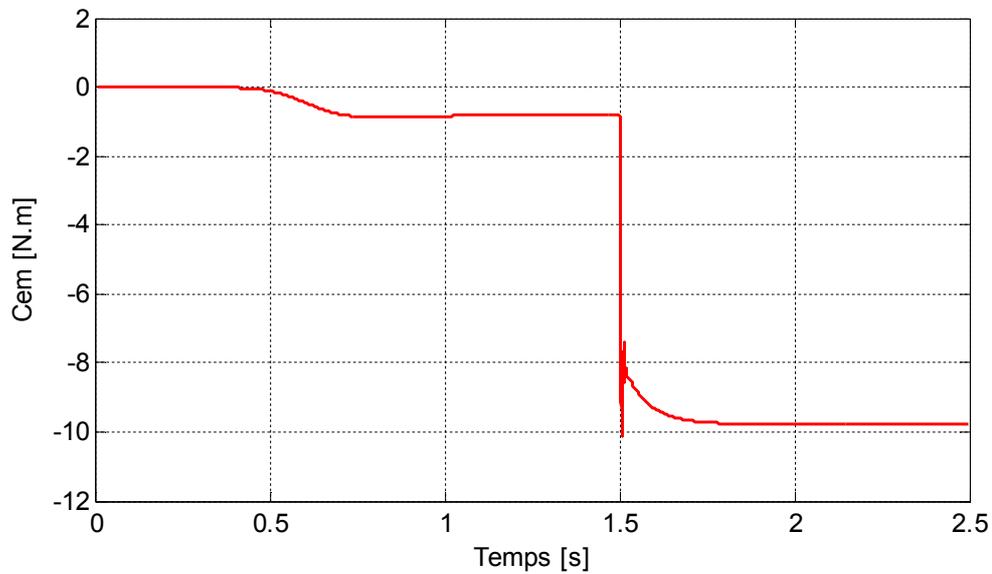


Figure (3-44): Couple électromagnétique l'or de l'insertion du condensateur.

Ces essai est réalisé en simulation avec insertion de capacités ($C_{ch}=30\mu F$) en séries avec une charge résistive ($R_{ch}=55\Omega$) pour une même capacité excitation Une augmentation de tension, du courant de plus le courant de charge est élevé ce qui implique que la puissance réactive qu'elle génère est élevée. Cela permet de maintenir un niveau de magnétisation pratiquement constant dans la machine, donc une tension constante.



III.10 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons fait des essais de simulations sur la génératrice à cage auto excitée dans le cas d'un fonctionnement autonome avec les quatre charges possibles (à vide, en charge résistive R, en charge inductive RL). Les grandeurs statoriques ne sont plus imposées et il faut fournir à la machine la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation. Les grandeurs statoriques sont directement influencées par la variation de la vitesse du rotor de l'éolienne, les capacités d'excitation et les charges connectées à la machine. L'ensemble de ces essais a montré que les grandeurs statoriques sont directement influencées de 3 variables :

- ✚ L'excitation de la génératrice : les essais donnent une idée sur la plage de variation de la capacité d'amorçage définie sur un intervalle $C = [C_{\min}, C_{\max}]$, On ne peut pas atteindre le point de fonctionnement nominal avec un condensateur d'excitation inférieur à C_{\min} et Il y a un risque de Surtensions aux bornes des enroulements lors de la phase d'arrêt (machine à forte inertie) pour une valeur supérieur à C_{\max} . Il faut donc l'amener à une valeur exploitable qui augmente le flux magnétique dans la machine, pour atteindre le point de fonctionnement nominal de la génératrice auto-excitée.
- ✚ L'influence de la charge connectée : qui absorbe une puissance fixe ; pour contrôler la tension il faut agir sur la valeur de la charge, les essais donnent une démagnétisation de la génératrice avec une valeur inférieur à R_{\min} ce qui signifie une chute de tension.
- ✚ la vitesse de rotation de la machine et/ou éventuellement l'imprécision du dispositif d'orientation des pales de l'éolienne qui doit être fixée dans une plage restreinte afin de maintenir une fréquence des grandeurs statoriques proches de 50 Hz

De ce fait, deux voies peuvent être entreprises pour éviter la chute de tension

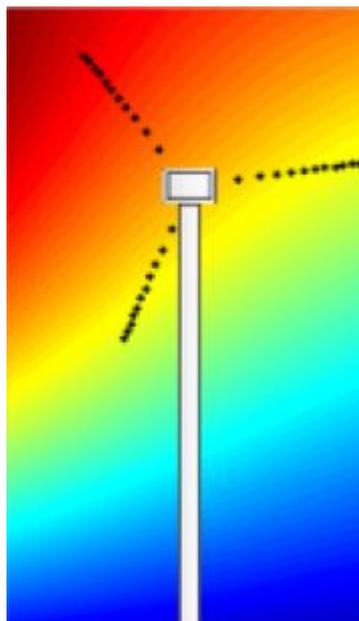
La première voie : Consiste à connecter, en plus des capacités en parallèles, d'autres capacités en série avec la charge permettent de diminuer la chute de tension. Mais les augmentations du courant de stator devraient être observées pour ne pas excéder le courant nominal du stator.

La seconde voie : Consiste à développer un système de contrôle, en utilisant l'électronique de puissance, qui réglera la tension et la fréquence produites dans une grande plage de vitesse.



CHAPITRE IV

Étude et Simulation de la GASDE en Mode isolé



IV.1. Introduction

Les investigations menées ces deux dernières décennies ont montré l'intérêt technico-économique des systèmes multi-phasés (supérieurs à 3 phases) dans la conversion et la transmission d'énergie. Cependant, les utilisations pratiques des générateurs multi-phasés dans la production et la conversion des *EnR*, telles que l'énergie éolienne et l'énergie hydraulique, ne sont pas encore opérationnelles. Nous nous sommes intéressés à ce type de convertisseurs multi-phasés à travers l'étude d'une **Génératrice ASynchrone Double Etoile (GASDE)** associée à une éolienne dont nous allons montrer ici l'intérêt. Nous commencerons par une description de la GASDE avant d'entamer la modélisation biphasée avec prise en compte de la saturation du circuit magnétique. Après détermination de la capacité d'excitation et examen des conditions d'auto-amorçage, nous simulerons la GASDE connectée à différents types de charges ; les résultats de ces simulations seront analysés et discutés.

IV.2. Description de la génératrice asynchrone double étoile

La *GASDE* se compose d'un stator portant deux enroulements triphasés identiques et décalés d'un angle électrique $\alpha = 30^\circ$ et d'un rotor à cage d'écureuil ; une représentation schématique est donnée (Fig. 4-1). Les grandeurs relatives aux deux étoiles seront notées par les indices (1) et (2).

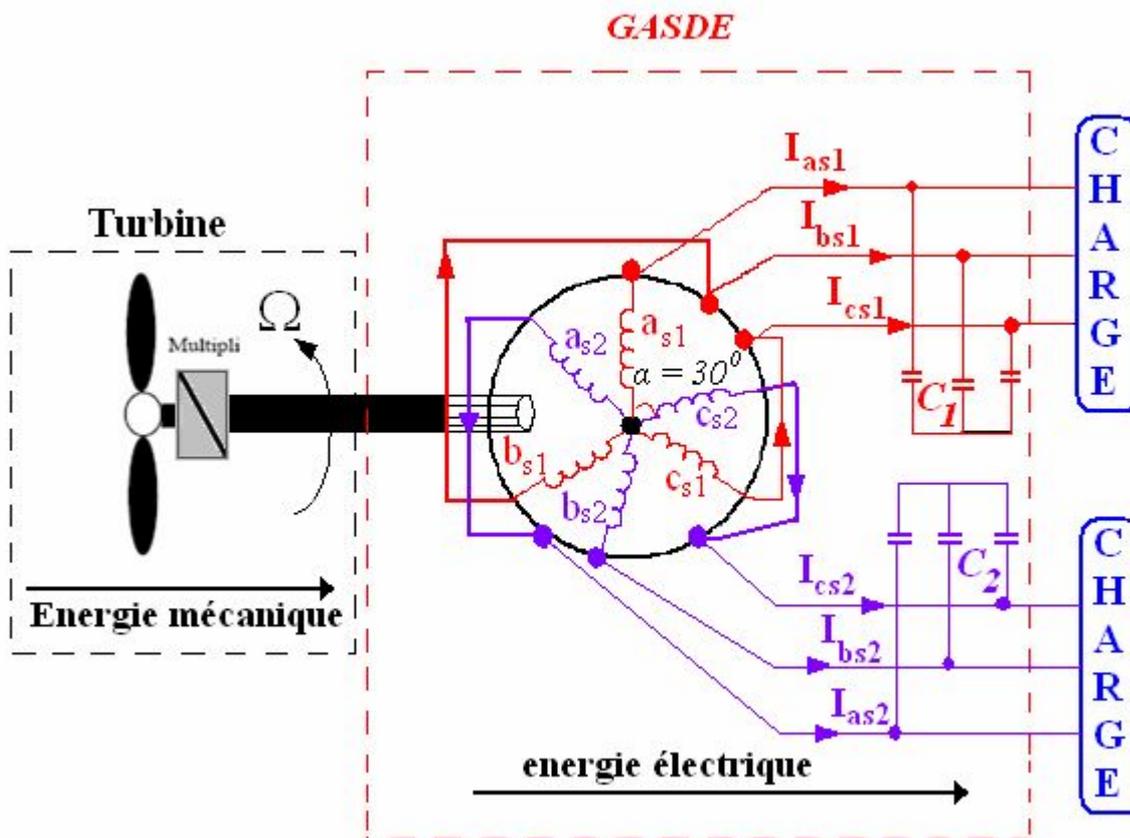


Figure (4-1) : Système de conversion éolienne basé sur la GASDE [28].

La (Fig. 4-2) donne la position des axes d'enroulement des neuf phases constituant la machine (6 phases pour le stator et 3 phases pour le rotor).

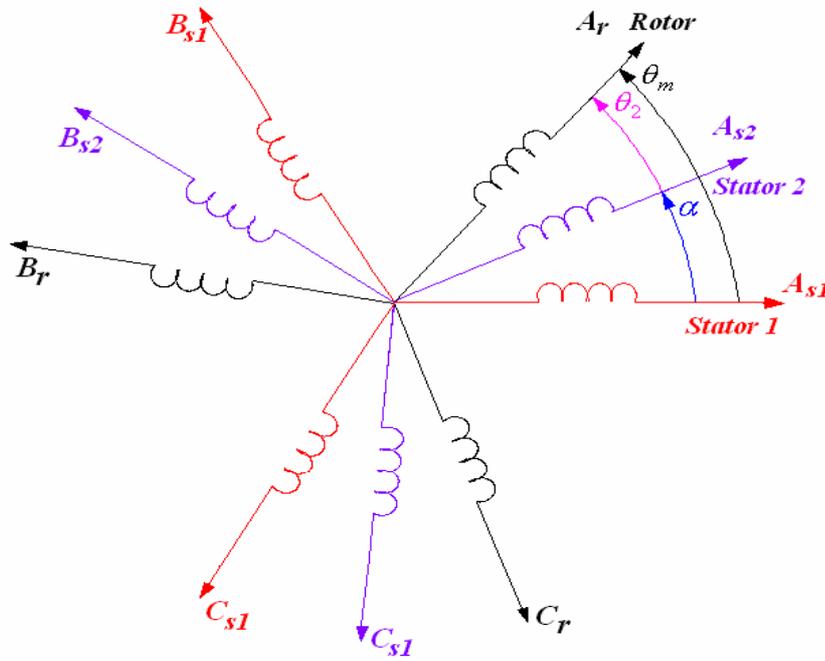


Figure (4-2) : Représentation des enroulements de la GASDE.

α : angle de décalage entre les deux étoiles.

θ_m : exprime la position de la phase A_r du rotor par rapport à la phase A_{s1} de l'étoile (1) du stator.

θ_2 : exprime la position de la phase A_r du rotor par rapport à la phase A_{s2} de l'étoile (2) du stator.

IV.3 Modélisation de la génératrice asynchrone double étoile

Le modèle de la GASDE que nous adopterons tient compte des mêmes hypothèses simplificatrices de la GAS à cage étudiée précédemment.

IV.3.1 Modèle de la GASDE dans le repère naturel (a.b.c)

IV.3.1.1 Equations électriques dans le repère naturel (a.b.c)

Les équations électriques de l'étoile 1, de l'étoile 2 et du rotor sont respectivement exprimées par :

$$\begin{cases} [V_{s1}] = [r_{s1}][I_{s1}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{s1}] \\ [V_{s2}] = [r_{s2}][I_{s2}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{s2}] \\ [V_r] = [r_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \end{cases} \quad (4-1)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_{s1}] &= [V_{as1} \quad V_{bs1} \quad V_{cs1}]^t, \quad V_{s2} = [V_{as2} \quad V_{bs2} \quad V_{cs2}]^t, \quad V_r = [V_r \quad V_r \quad V_r]^t \\ [I_{s1}] &= [I_{as1} \quad I_{bs1} \quad I_{cs1}]^t, \quad I_{s2} = [I_{as2} \quad I_{bs2} \quad I_{cs2}]^t, \quad I_r = [I_r \quad I_r \quad I_r]^t \\ [\Phi_{s1}] &= [\Phi_{as1} \quad \Phi_{bs1} \quad \Phi_{cs1}]^t, \quad \Phi_{s2} = [\Phi_{as2} \quad \Phi_{bs2} \quad \Phi_{cs2}]^t, \quad \Phi_r = [\Phi_r \quad \Phi_r \quad \Phi_r]^t \\ [r_{s1}] &= \text{diag} [r_{as1} \quad r_{bs1} \quad r_{cs1}], \quad [r_{s2}] = \text{diag} [r_{as2} \quad r_{bs2} \quad r_{cs2}], \quad [r_r] = \text{diag} [r_r \quad r_r \quad r_r]. \end{aligned}$$

Où : ($r_{as1} = r_{bs1} = r_{cs1} = r_1$), ($r_{as2} = r_{bs2} = r_{cs2} = r_2$), ($r_{ar} = r_{br} = r_{cr} = r_r$).

r_1 : résistance d'une phase de l'étoile statorique (1)

r_2 : résistance d'une phase de l'étoile statorique (2)

r_r : résistance d'une phase du rotor

IV.3.1.2 Equations des flux dans le repère naturel (a.b.c)

$$\begin{cases} [\Phi_{s1}] = [L_{s1,s1}] \cdot [I_{s1}] + [M_{s1,s2}] \cdot [I_{s2}] + [M_{s1,r}] \cdot [I_r] \\ [\Phi_{s2}] = [M_{s2,s1}] \cdot [I_{s1}] + [L_{s2,s2}] \cdot [I_{s2}] + [M_{s2,r}] \cdot [I_r] \\ [\Phi_r] = [M_{r,s1}] \cdot [I_{s1}] + [M_{r,s2}] \cdot [I_{s2}] + [L_{r,r}] \cdot [I_r] \end{cases} \quad (4-2)$$

Les sous matrices des inductances dans l'équation (4.2) sont détaillées comme suit :

$$[L_{s1,s1}] = \begin{pmatrix} L_1 + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_1 + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_1 + L_{ms} \end{pmatrix}; \quad [L_{s2,s2}] = \begin{pmatrix} L_2 + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_2 + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_2 + L_{ms} \end{pmatrix}$$

$$[L_{r,r}] = \begin{pmatrix} L_r + L_{mr} & -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & L_r + L_{mr} & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 & L_r + L_{mr} \end{pmatrix}$$

$$[M_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) \\ \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$$

$$[M_{s1,r}] = M_{sr} \begin{pmatrix} \cos(\theta - m) & \cos(\theta - m + 2\pi/3) & \cos(\theta - m + 4\pi/3) \\ \cos(\theta - m + 4\pi/3) & \cos(\theta - m) & \cos(\theta - m + 2\pi/3) \\ \cos(\theta - m + 2\pi/3) & \cos(\theta - m + 4\pi/3) & \cos(\theta - m) \end{pmatrix}$$

$$[M_{s2,r}] = M_{sr} \begin{pmatrix} \cos(\theta - 2) & \cos(\theta - 2 + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2 + 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 2 + 4\pi/3) & \cos(\theta - 2) & \cos(\theta - 2 + 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2 + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2 + 4\pi/3) & \cos(\theta - 2) \end{pmatrix}$$

$$[M_{s2,s1}] = [M_{s1,s2}]^T; \quad [M_{r,s1}] = [M_{s1,r}]^T; \quad [M_{r,s2}] = [M_{s2,r}]^T.$$



Avec :

L_{s1}, L_{s2} : les inductances propres des étoiles (1) et (2)

L_r : l'inductance propre d'une phase du rotor

L_{ms} : la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique

L_{mr} : la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique

M_{sr} : la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre une étoile et le rotor.

IV.3.2 Modèle de la GASDE dans le repère de Park (d,q)

La représentation des enroulements de la machine dans le repère de Park est donnée (Fig. 4-3).

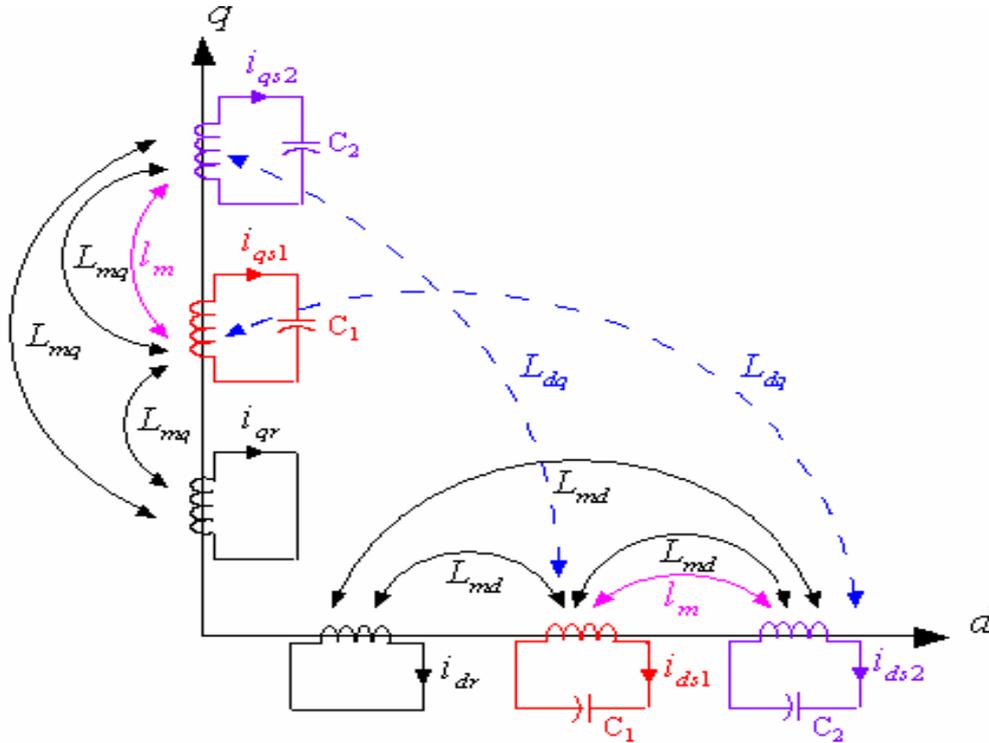


Figure (4-3) : Représentation des enroulements de la GASDE selon les axes « d, q » [28].

IV.3.2.1 Equations Electriques dans le repère « d,q »

Les équations électriques de la GASDE dans le repère de Park tournant avec le champ magnétique créé par les enroulements statoriques deviennent :

$$\begin{cases} V_{d1} = -r_1 \cdot I_{d1} + \frac{d}{dt} \Phi_{d1} - \omega_s \Phi_{q1} \\ V_{q1} = -r_1 \cdot I_{q1} + \frac{d}{dt} \Phi_{q1} + \omega_s \Phi_{d1} \\ V_{d2} = -r_2 \cdot I_{d2} + \frac{d}{dt} \Phi_{d2} - \omega_s \Phi_{q2} \\ V_{q2} = -r_2 \cdot I_{q2} + \frac{d}{dt} \Phi_{q2} + \omega_s \Phi_{d2} \end{cases} \quad (4-3)$$



$$\begin{cases} 0 = r_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{qr} \\ 0 = r_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (4-4)$$

Avec :

ω_s : la vitesse du champ tournant

ω_r : la vitesse de rotation rotorique.

r_{s1} , r_{s2} , r_r : sont respectivement les résistances du stator (étoiles 1 et 2) et du rotor.

IV.3.2.2 Equations magnétiques dans le repère « d,q »

Cependant, c'est au niveau de l'écriture des flux que ça devient intéressant. Le système matriciel de flux peut également s'écrire sous la forme suivante :

Première étoile :

$$\begin{cases} \Phi_{ds1} = -L_{l1} \cdot I_{d1} - L_{lm} (I_{d1} + I_{d2}) - L_{dq} \cdot I_{q2} + L_{md} (-I_{d1} - I_{d2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qs1} = -L_{l1} \cdot I_{q1} - L_{lm} (I_{q1} + I_{q2}) + L_{dq} \cdot I_{d2} + L_{mq} (-I_{q1} - I_{q2} + I_{qr}) \\ \Phi_{ds2} = -L_{l2} \cdot I_{d2} - L_{lm} (I_{d1} + I_{d2}) + L_{dq} \cdot I_{q1} + L_{md} (-I_{d1} - I_{d2} + I_{dr}) \end{cases} \quad (4-5)$$

Deuxième étoile :

$$\begin{cases} \Phi_{qs2} = -L_{l2} \cdot I_{q2} - L_{lm} (I_{q1} + I_{q2}) - L_{dq} \cdot I_{d1} + L_{mq} (-I_{q1} - I_{q2} + I_{qr}) \\ \Phi_{ds2} = -L_{l2} \cdot I_{d2} - L_{lm} (I_{d1} + I_{d2}) + L_{dq} \cdot I_{q1} + L_{md} (-I_{d1} - I_{d2} + I_{dr}) \end{cases}$$

Au rotor :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_{lr} \cdot I_{dr} + L_{md} (-I_{d1} - I_{d2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qr} = L_{lr} \cdot I_{qr} + L_{mq} (-I_{q1} - I_{q2} + I_{qr}) \end{cases} \quad (4-6)$$

Où :

L_{l1} , L_{l2} , L_{lr} : Inductances de fuites statoriques (étoile 1 et 2) et rotorique respectivement

L_{lm} : Inductance de fuite mutuelle commune aux deux étoiles

L_{dq} : Inductance cyclique d'intersaturation donnée par :



$$L_{dq} = \frac{I_{md} \cdot I_{mq}}{|I_m|} \left(\frac{dL_m}{d|I_m|} \right)$$

Avec :

I_{md} , I_{mq} , les courants de magnétisation direct et en quadrature.

L_m : Inductance de magnétisation qui est obtenue à partir de la caractéristique de magnétisation de la machine

$$L_m = \left(\frac{\Phi_m}{I_m} \right)$$

Φ_m , I_m : Modules du flux et du courant de magnétisation respectivement.

L'expression du courant de magnétisation en fonction des courants statoriques et rotoriques est définie d'après [29] par :

$$I_m = \left[(-I_{d1} - I_{d2} + I_{dr})^2 + (-I_{q1} - I_{q2} + I_{qr})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-7)$$

Les inductances cycliques totales statoriques et rotoriques selon les axes d et q sont exprimées par:

$$L_{l(d,q)} = L_{lm} + L_{m(d,q)}$$

L'inductance de magnétisation L_m en fonction de I_m est approximée d'après [29] par le polynôme d'interpolation suivant:

$$L_m = 0,1406 + 0,0014 I_m - 0,0012 I_m^2 + 0,00005 I_m^3 \quad (4-8)$$

IV.4. Simulation de la GASDE à vide

En remplaçant le système d'équations (4-6) et (4-5) dans les équations (4-3) et (4-2), on obtient le système d'équations (4-9) suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} (L_{l1} + L_{ld}) \frac{dI_{d1}}{dt} + L_{ld} \frac{dI_{d2}}{dt} - L_m \frac{dI_{dr}}{dt} = -r_1 I_{d1} + \omega_s (L_{l1} + L_{lq}) I_{q1} + \omega_s L_{lq} I_{q2} - \omega_s L_m I_{qr} - V_{d1} \\ L_{ld} \frac{dI_{d1}}{dt} + (L_{l2} + L_{ld}) \frac{dI_{d2}}{dt} - L_m \frac{dI_{dr}}{dt} = -r_2 I_{d2} + \omega_s L_{lq} I_{q1} + \omega_s (L_{l2} + L_{lq}) I_{q2} - \omega_s L_m I_{qr} - V_{d2} \\ (L_{l1} + L_{lq}) \frac{dI_{q1}}{dt} + L_{lq} \frac{dI_{q2}}{dt} + L_m \frac{dI_{qr}}{dt} = -\omega_s (L_{l1} + L_{ld}) I_{d1} - \omega_s L_{ld} I_{d2} - r_1 I_{q1} + \omega_s L_m I_{dr} - V_{q1} \\ L_{lq} \frac{dI_{q1}}{dt} + (L_{l2} + L_{lq}) \frac{dI_{q2}}{dt} + L_m \frac{dI_{qr}}{dt} = -\omega_s L_{ld} I_{d1} - \omega_s (L_{l2} + L_{ld}) I_{d2} - r_2 I_{q2} + \omega_s L_m I_{dr} - V_{q2} \\ L_m \frac{dI_{d1}}{dt} + L_m \frac{dI_{d2}}{dt} - (L_{lr} + L_m) \frac{dI_{dr}}{dt} = \omega_g L_m I_{q1} + \omega_g L_m I_{q2} + r_r I_{dr} - \omega_g (L_{lr} + L_m) I_{qr} \\ L_m \frac{dI_{q1}}{dt} + L_m \frac{dI_{q2}}{dt} - (L_{lr} + L_m) \frac{dI_{qr}}{dt} = -\omega_g L_m I_{d1} - \omega_g L_m I_{d2} + \omega_g (L_{lr} + L_m) I_{dr} + r_r I_{qr} \end{array} \right.$$



Les bancs de condensateurs sont connectés en étoile aux bornes des deux étoiles. Sachant que le système d'axe est lié au champ tournant, le système d'équations suivant « d,q » devient :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}V_{d1} = \frac{1}{C_1}I_{d1} + \omega_s V_{q1} \\ \frac{d}{dt}V_{d2} = \frac{1}{C_2}I_{d2} + \omega_s V_{q2} \\ \frac{d}{dt}V_{q1} = \frac{1}{C_1}I_{q1} - \omega_s V_{d1} \\ \frac{d}{dt}V_{q2} = \frac{1}{C_2}I_{q2} - \omega_s V_{d2} \end{cases} \quad (4-10)$$

Du système d'équations (4-9), on exprime ce système sous forme d'état :

$$[X \dot{\quad}] = [A] \cdot [B] \cdot [X]$$

Avec :

$$[X \dot{\quad}] = \frac{d}{dt}[X]$$

$$[A] = [L]^{-1}$$

[L] : représente la matrice d'inductance définie ainsi

$$[L] = \begin{pmatrix} -(L_{l1}+L_{ld}) & -L_{ld} & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -L_{ld} & -(L_{l2}+L_{ld}) & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(L_{l1}+L_{lq}) & -L_{lq} & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_{lq} & -(L_{l2}+L_{lq}) & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -L_m & -L_m & 0 & 0 & (L_{lr}+L_m) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_m & -L_m & 0 & (L_{lr}+L_m) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$[X] = [I_{d1} \ I_{d2} \ I_{q1} \ I_{q2} \ I_{dr} \ I_{qr} \ V_{d1} \ V_{d2} \ V_{q1} \ V_{q2}]^t$$



$$\mathbf{[B]} = \begin{pmatrix}
 r_1 & 0 & -\omega_s(L_{l1}+L_{lq}) & -\omega_s L_{lq} & 0 & \omega_s L_m & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & r_2 & -\omega_s L_{lq} & -\omega_s(L_{l2}+L_{lq}) & 0 & \omega_s L_m & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 \omega_s(L_{l1}+L_{ld}) & \omega_s L_{ld} & r_1 & 0 & -\omega_s L_m & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 \omega_s L_{ld} & \omega_s(L_{l2}+L_{ld}) & 0 & r_2 & -\omega_s L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & -\omega_g L_m & -\omega_g L_m & -r_r & \omega_g(L_m+L_{lr}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \omega_g L_m & \omega_g L_m & 0 & 0 & -\omega_g(L_m+L_{lr}) & -r_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1/C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_s & 0 \\
 0 & 1/C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_s \\
 0 & 0 & 1/C_1 & 0 & 0 & 0 & -\omega_s & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1/C_2 & 0 & 0 & 0 & -\omega_s & 0 & 0
 \end{pmatrix}$$

Résultats de la simulation

La courbe de magnétisation est approximée par un polynôme d'interpolation. La (Fig 4-4) représente les variations de l'inductance de magnétisation L_m en fonction du module du courant de magnétisation $|I_m|$.

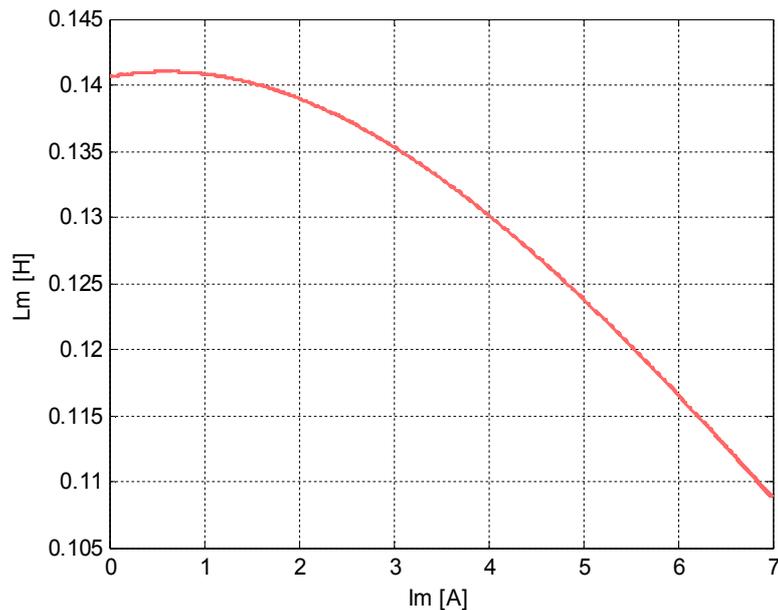


Figure (4-4) : Variations de l'inductance de magnétisation L_m

Les résultats de simulation numérique dans « l'étoile 1 » pour le fonctionnement à vide de la GASDE avec $C_1 = C_2 = 40\mu\text{F}$ sont représentés (Fig.4-5a)

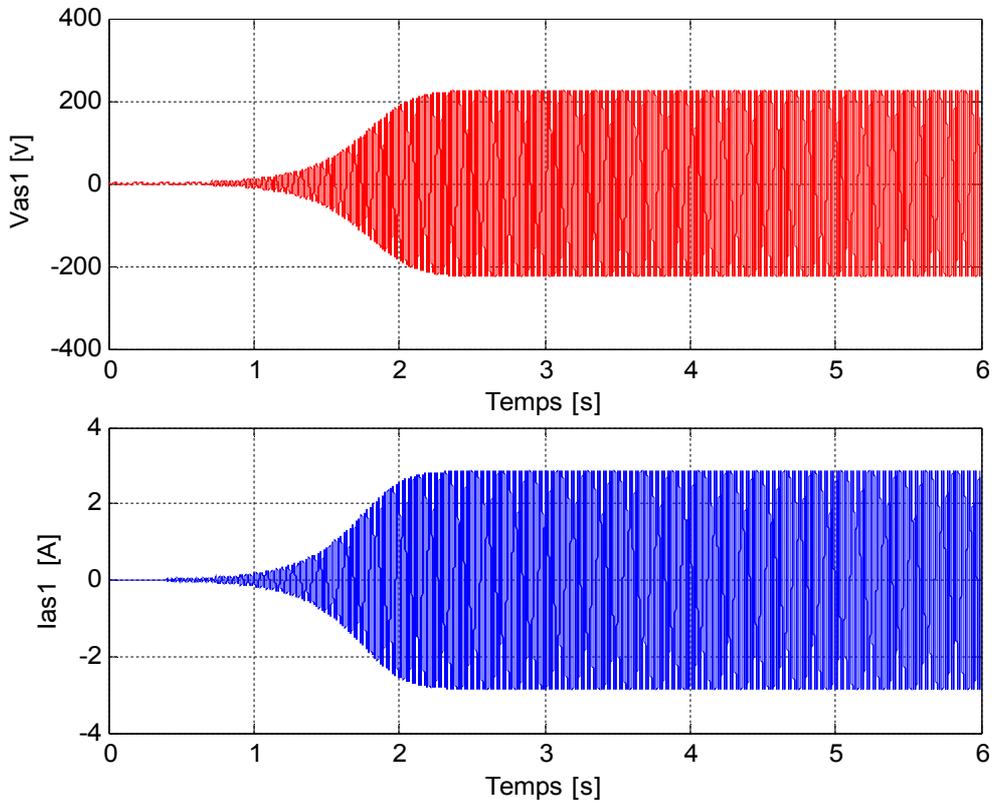


Figure (4-5a) : Evolution des caractéristiques (I_{as} et V_{as}) dans l'étoile 1 à vide.

Les résultats de simulation sous *Matlab* du fonctionnement à vide de la GASDE relatifs à « l'étoile 2 » avec $C_1 = C_2 = 40\mu\text{F}$ sont représentés (Fig.4-5b).

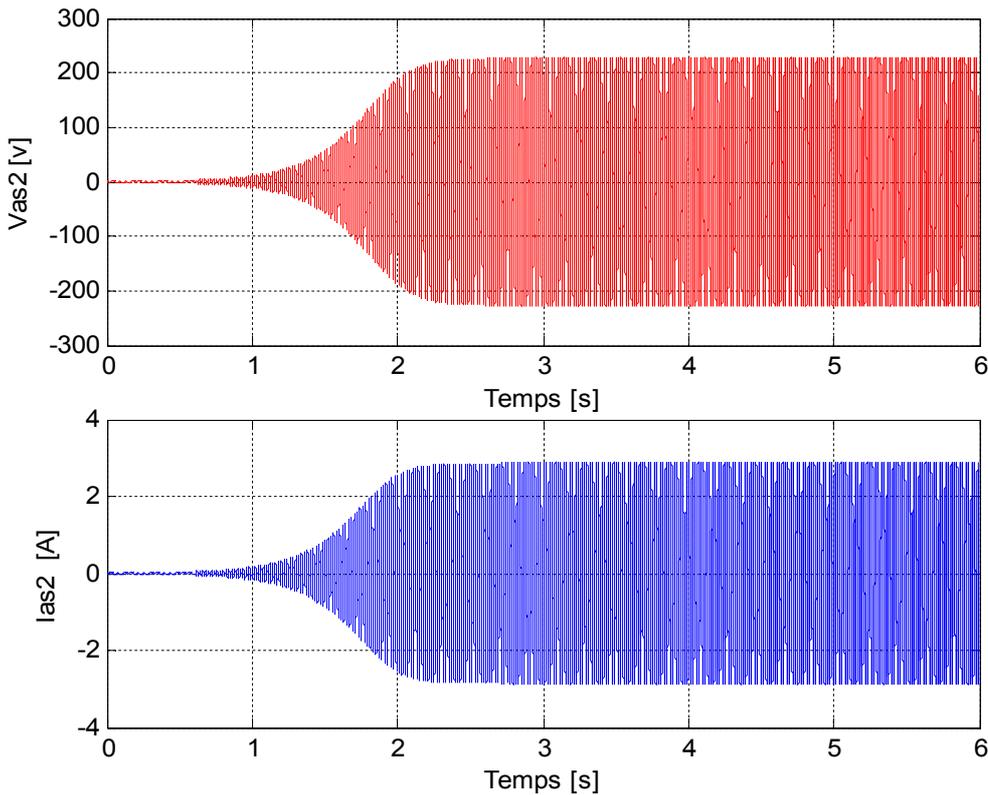


Figure (4-5b) : Evolution des caractéristiques (I_{as} , V_{as}) dans l'étoile 2 à vide.



Les tensions V_{as1} et V_{as2} aux bornes des phases *a* de l'étoile 1 (Fig 4-5a) et de l'étoile 2 (Fig 4-5b) ainsi que les courants i_{as1} et i_{as2} croient de manière exponentielle (régime transitoire) puis se stabilisent resp. à 227.4 V et 2.865 A à $t=3.8$ s (régime permanent). Il en est de même de l'évolution du flux magnétique (Fig 4-6).

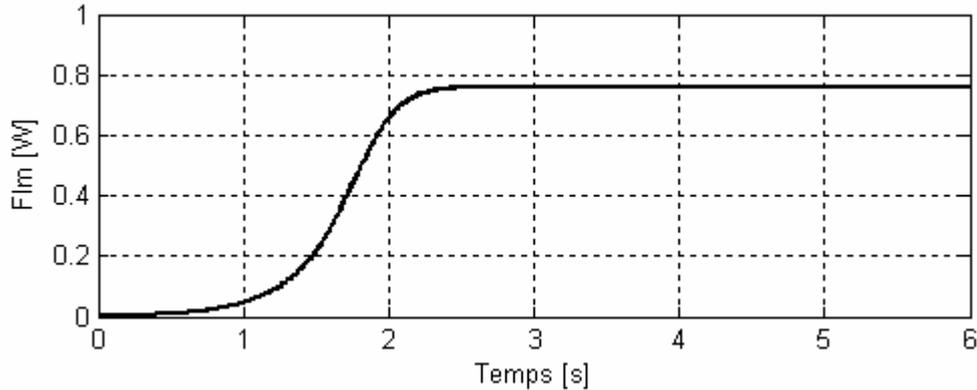


Figure (4-6) : Evolution du flux magnétique en fonctionnement à vide.

La (Fig 4-7) ci-dessous indique que la forme des courants statoriques est identique à celle des tensions statoriques (mêmes fréquences) mais avec un déphasage de 90° .

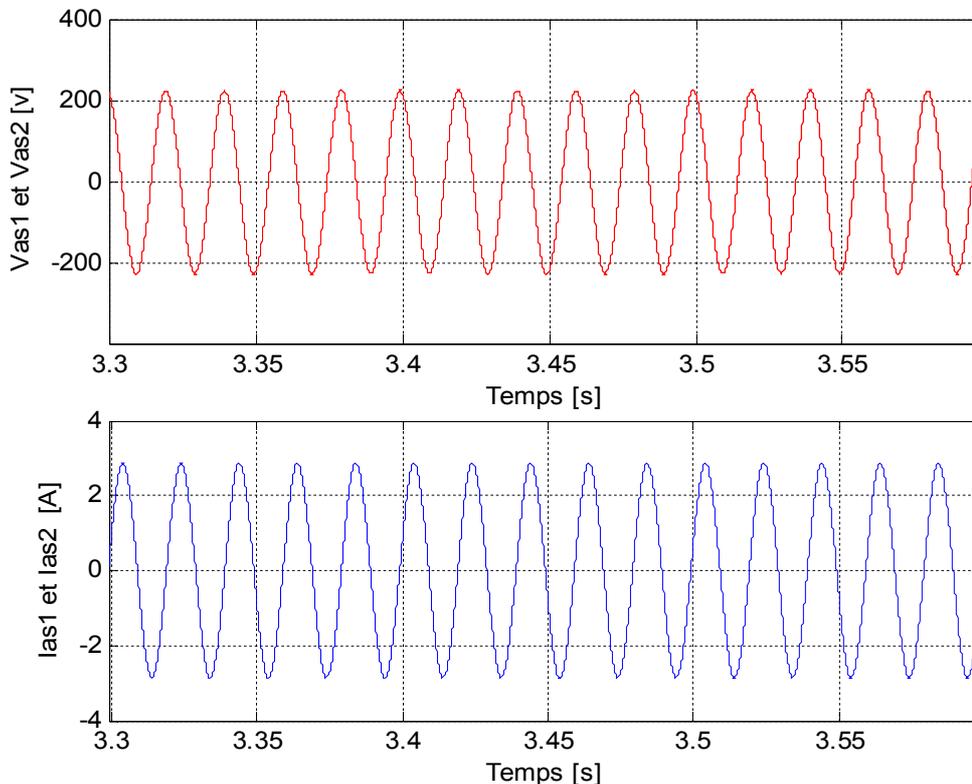


Figure (4-7) : forme des courants et tensions statoriques.

L'allure du courant rotorique (Fig 4-8) montre que celui-ci est très faible par rapport au courant statorique car l'augmentation du courant rotorique est due essentiellement à l'augmentation de la puissance active fournie par la GASDE à sa charge ; comme nous travaillons à vide ...

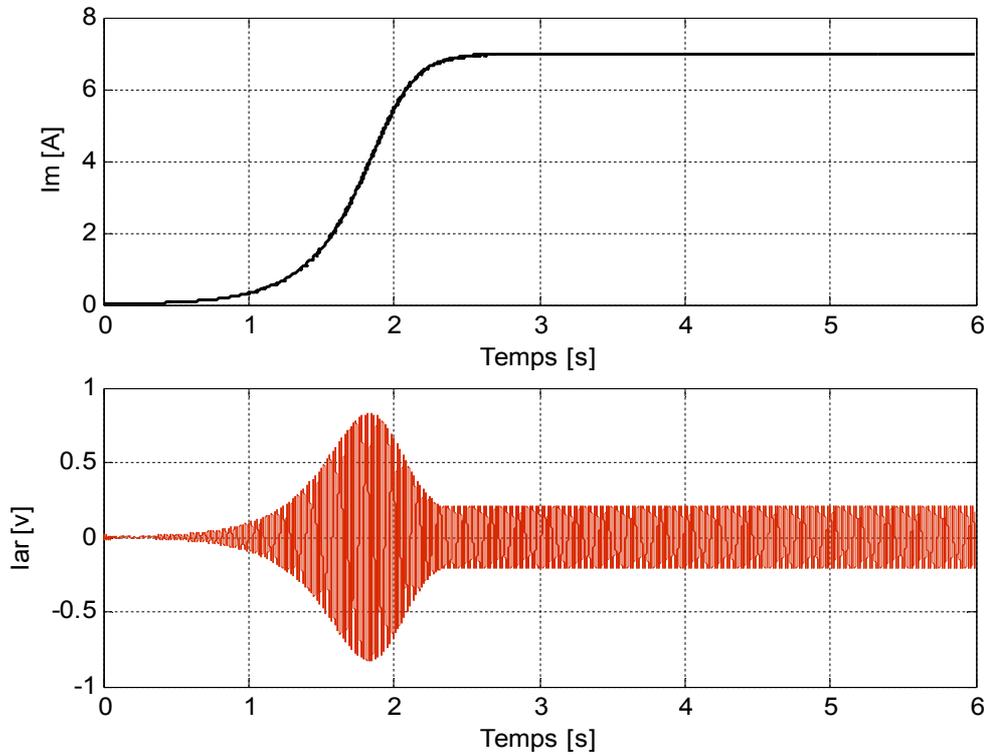


Figure (4-8) : Evolution des courants de magnétisation et rotorique en fonctionnement à vide.

➤ *Effet de la Capacité ?*

Pour mesurer l'influence des capacités sur les tensions de la GASDE, on fait tourner le rotor à la vitesse de synchronisme et on représente les enveloppes des tensions V_{as1} , V_{as2} (Fig 4-9) dans les 2 cas suivants :

Premier test: $C_1 = 60 \mu F$ et $C_2 = 40 \mu F$

Deuxième test : $C_1 = 30 \mu F$ et $C_2 = 50 \mu F$

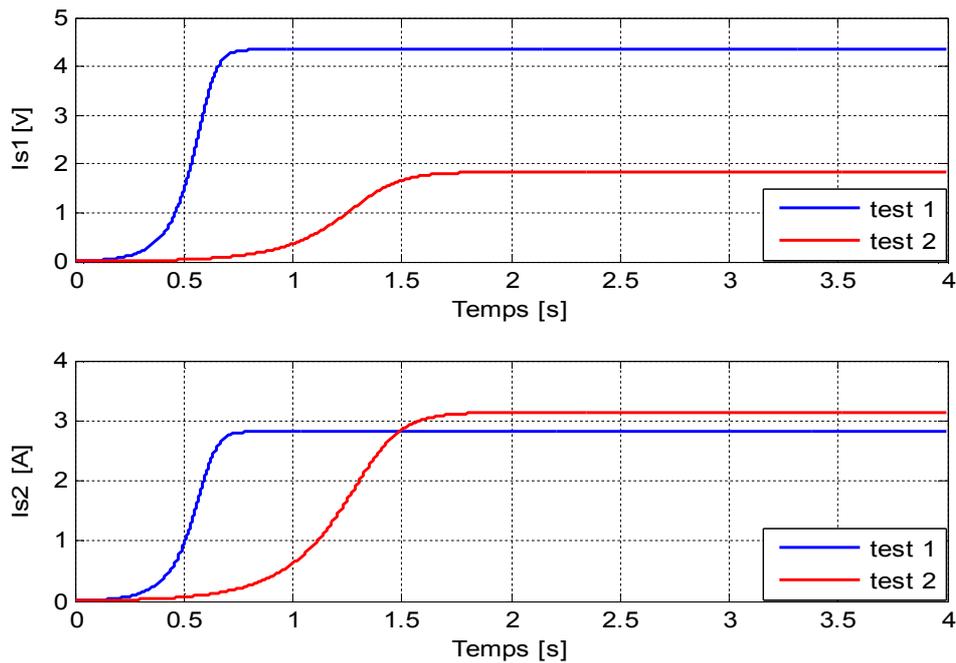


Figure (4-9): Influence des capacités sur les Courants.



L'influence des capacités sur les courants générés par la GASDE apparaît à 2 niveaux :

- La durée du régime transitoire diminue avec l'augmentation des valeurs des capacités (0.54 s et 1.6s pour les tests 1 et 2 respectivement)
- Les tensions du régime permanent augmentent avec les valeurs de C.

Pour une capacité en-dessous d'une valeur critique ($C < C_{critique}$) il n'y a pas d'amorçage (Fig 4-10)

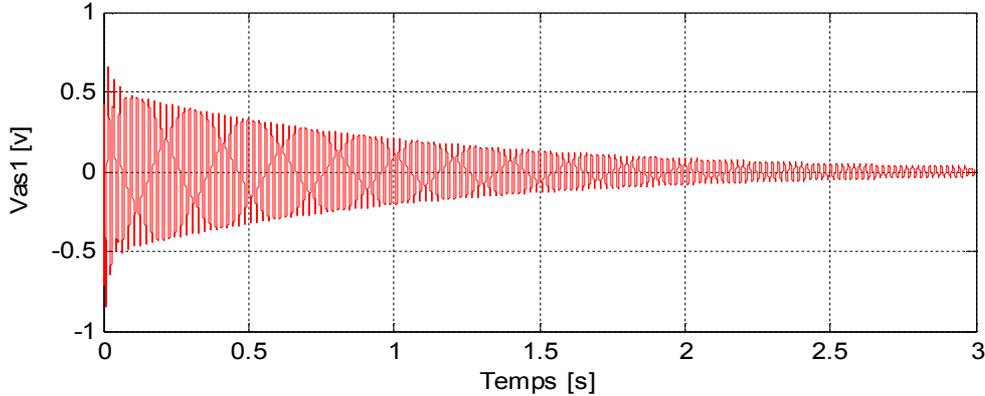


Figure (4-10) : Effet de $C < C_{critique}$ sur la tension générée par GASDE

➤ *Effet de la vitesse d'entraînement ?*

Pour une valeur fixe de la capacité ($C1 = C2 = 40\mu F$), nous avons réalisé les 3 tests illustrés (Fig. 4-11) pour voir l'influence de la vitesse d'entraînement sur la tension en amplitude et fréquence :

Premier test : $\omega_{r1} = 300 \text{ rad/s}$

Deuxième test : $\omega_{r2} = 350 \text{ rad/s}$

Troisième test : $\omega_{r3} = 370 \text{ rad/s}$

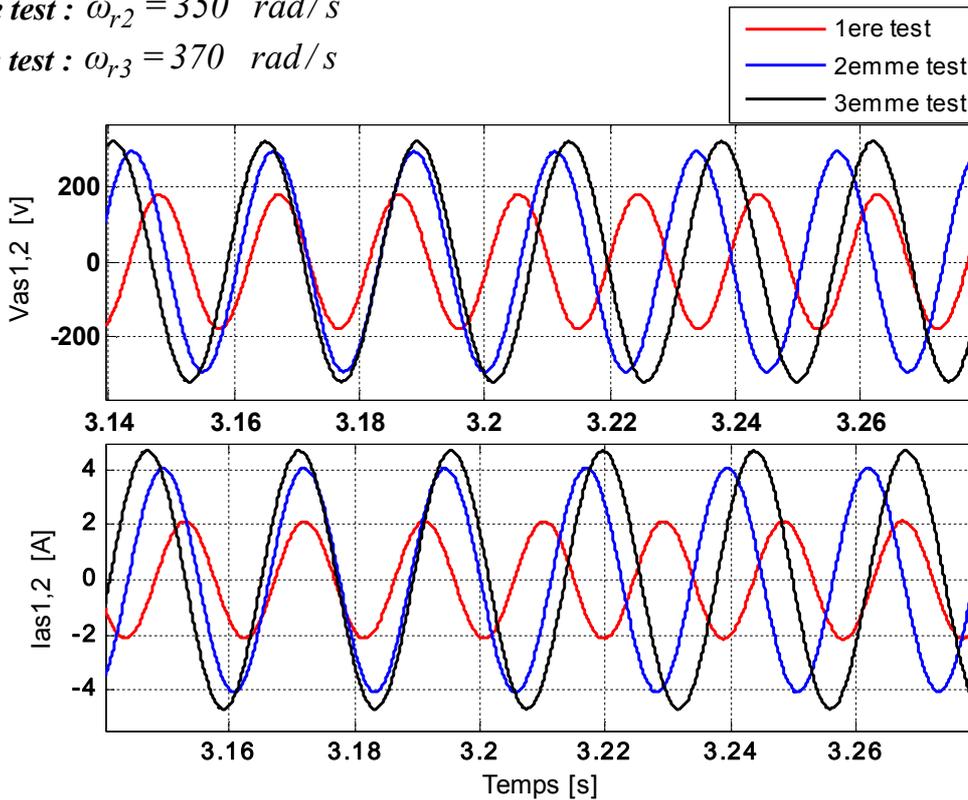


Figure (4-11) : Zoom de $V_{as1, 2}$ et $I_{as1,2}$

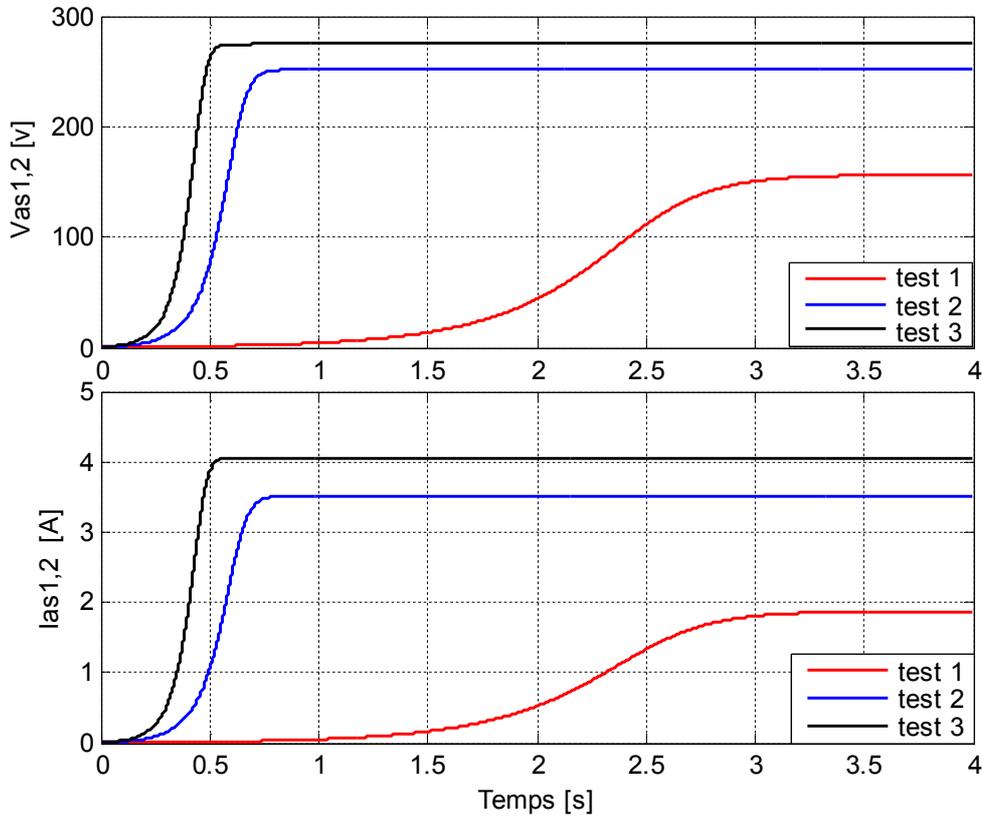


Figure (4-12) : Effet de la vitesse d'entraînement sur $V_{1,2}$ et $I_{1,2}$.

L'influence de la vitesse d'entraînement représentée (Fig 4-11) et (Fig 4-12) est résumée dans le tableau (Tab-4-2) suivant :

$\omega_r (rd/s)$	$V_{1,2} [v]$	$I_{1,2} [A]$	$f [HZ]$
300	156.2	1.87	51.2
350	251.9	3.52	45.45
375	274.7	4.05	41.67

Tab.4-1 : Influence de la vitesse d'entraînement.

Pour une augmentation de 14.3 % de la vitesse nous constatons :

- une augmentation de 38 % des tensions statoriques dans les deux étoiles.
- une augmentation de 39.2% des courants statoriques dans les deux étoiles.
- une diminution de 11.23 % de la fréquence.



IV.5. Simulation de la GASDE connectée à une charge R purement résistive

La charge résistive est représentée par trois résistances identiques connectées en étoile et branchées en parallèle avec le banc de condensateurs pour chaque étoile de la GASDE. Le schéma simplifié de connexion selon l'axe d de l'étoile 1 est donné (Fig. 4-13).

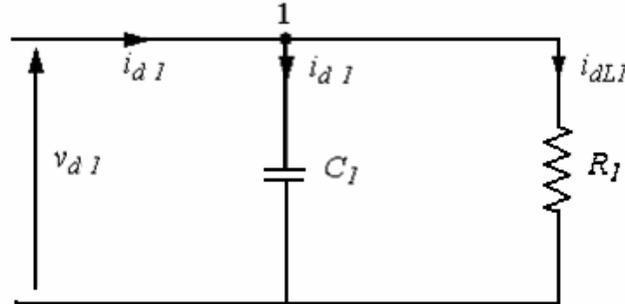


Figure (4-13) : Connexion de la charge R_{ch1} selon l'axe d (étoile 1).

Au nœud 1, on écrit l'équation des courants sortant et entrant :

$$I_{dc1} = I_{d1} - \frac{V_{d1}}{R_1} \quad (4-11)$$

Idem pour les courants I_{qc1} , I_{dc2} , I_{qc2} :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}V_{d1} &= \frac{1}{C_1} \left[I_{d1} - \left(\frac{V_{d1}}{R_1} \right) \right] + \omega_s V_{q1} \\ \frac{d}{dt}V_{d2} &= \frac{1}{C_2} \left[I_{d2} - \left(\frac{V_{d2}}{R_2} \right) \right] + \omega_s V_{q2} \\ \frac{d}{dt}V_{q1} &= \frac{1}{C_1} \left[I_{q1} - \left(\frac{V_{q1}}{R_1} \right) \right] - \omega_s V_{d1} \\ \frac{d}{dt}V_{q2} &= \frac{1}{C_2} \left[I_{q2} - \left(\frac{V_{q2}}{R_2} \right) \right] - \omega_s V_{d2} \end{aligned} \quad (4-12)$$

En substituant (4-12) dans le système d'équations (4-9), on obtient l'équation d'état matricielle :

$$[\dot{X}] = [A] \cdot [B] \cdot [X]$$

Avec :

$$[\dot{X}] = \frac{d}{dt}[X]$$

$$[A] = [L]^{-1}$$

[L] : représente la matrice d'inductance définie ainsi

$$[L] = \begin{pmatrix} -(L_{l1}+L_{ld}) & -L_{ld} & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -L_{ld} & -(L_{l2}+L_{ld}) & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(L_{l1}+L_{lq}) & -L_{lq} & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_{lq} & -(L_{l2}+L_{lq}) & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -L_m & -L_m & 0 & 0 & (L_{lr}+L_m) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_m & -L_m & 0 & (L_{lr}+L_m) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

et

$$[B] = \begin{pmatrix} r_1 & 0 & -\omega_s(L_{l1}+L_{lq}) & -\omega_s L_{lq} & 0 & \omega_s L_m & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & -\omega_s L_{lq} & -\omega_s(L_{l2}+L_{lq}) & 0 & \omega_s L_m & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \omega_s(L_{l1}+L_{ld}) & \omega_s L_{ld} & r_1 & 0 & -\omega_s L_m & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ \omega_s L_{ld} & \omega_s(L_{l2}+L_{ld}) & 0 & r_2 & -\omega_s L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -\omega_g L_m & -\omega_g L_m & -r_r & \omega_g(L_m+L_{lr}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_g L_m & \omega_g L_m & 0 & 0 & -\omega_g(L_m+L_{lr}) & -r_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & \omega_s & 0 \\ 0 & 1/C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_2 C_2} & 0 & \omega_s \\ 0 & 0 & 1/C_1 & 0 & 0 & 0 & -\omega_s & 0 & \frac{1}{R_1 C_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/C_2 & 0 & 0 & 0 & -\omega_s & 0 & \frac{1}{R_2 C_2} \end{pmatrix}$$

$$[X] = [I_{d1} \ I_{d2} \ I_{q1} \ I_{q2} \ I_{dr} \ I_{qr} \ V_{d1} \ V_{d2} \ V_{q1} \ V_{q2}]^t$$



Résultats de la simulation

La (Fig 4-14) représente l'évolution des caractéristiques de la GASDE sur charges purement résistives dans les deux étoiles.

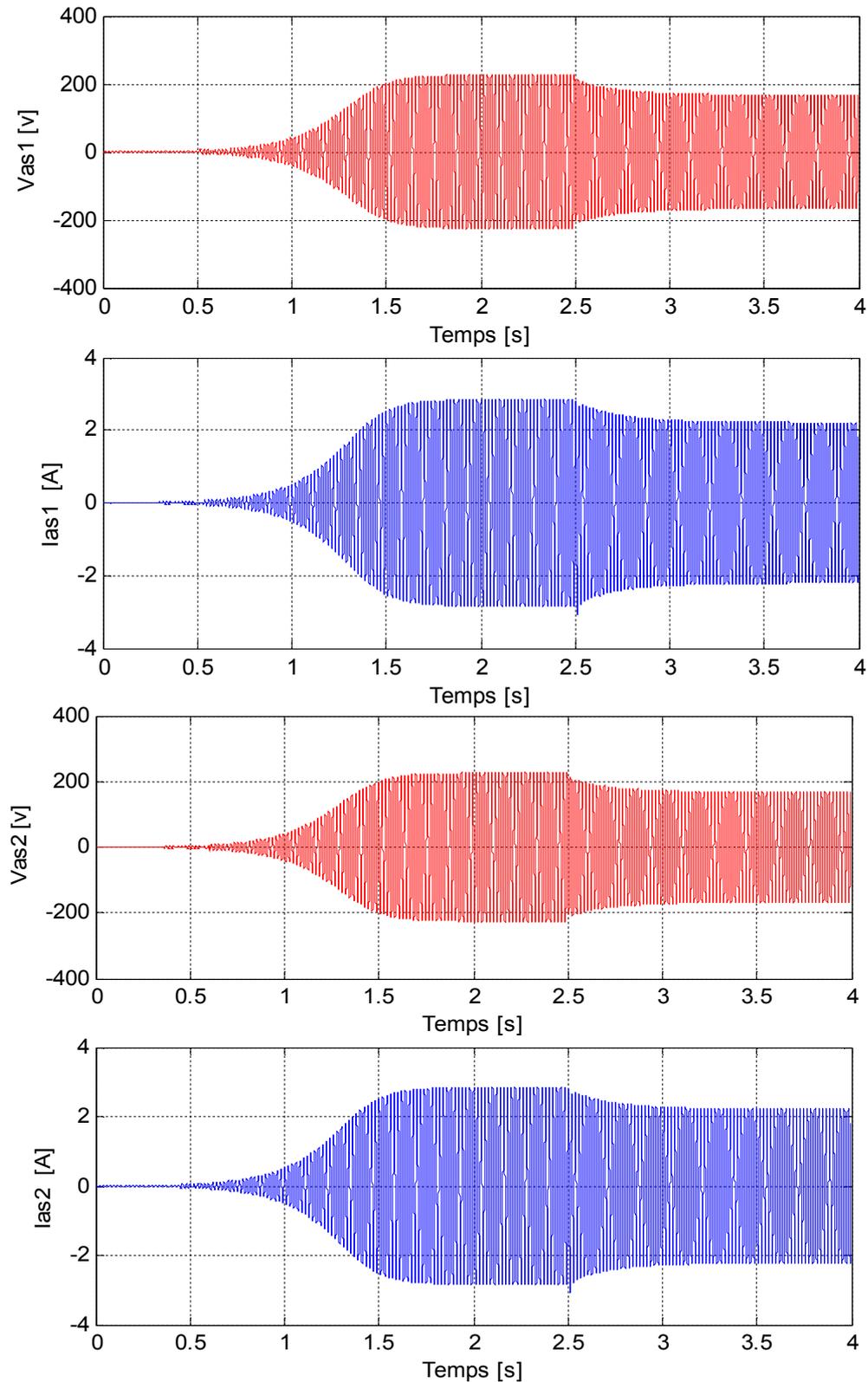


Figure (4-14) : Evolution des caractéristiques (I_{as} et V_{as}) dans les étoile 1et 2 en charge résistive.



Les charges résistives ($R_{ch1} = R_{ch2} = 200 \Omega$) sont insérées à $t=2.5$ s : on constate (Fig 4-15) une diminution de la tension et du courant statoriques à cet instant (*régime transitoire*) puis une stabilisation aux valeurs 167.7 V et 2.21 A respectivement (*régime permanent*) ; il en est de même pour le courant de magnétisation et le flux (Fig 4-16).

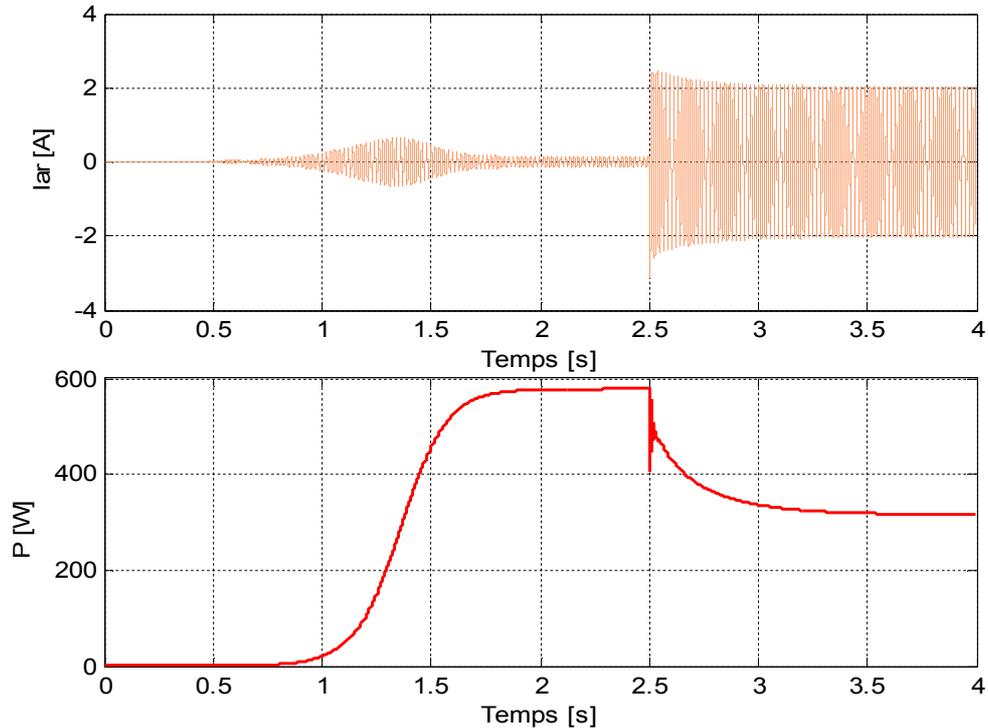


Figure (4-15) : effet de la charge sur la puissance active et le courant rotorique

La diminution du courant de magnétisation et du flux aux valeurs stabilisées à 4.92 A et 0.59 Wb respectivement (Fig 4-16) expliquent la diminution des tensions et des courants (Fig 4-15).

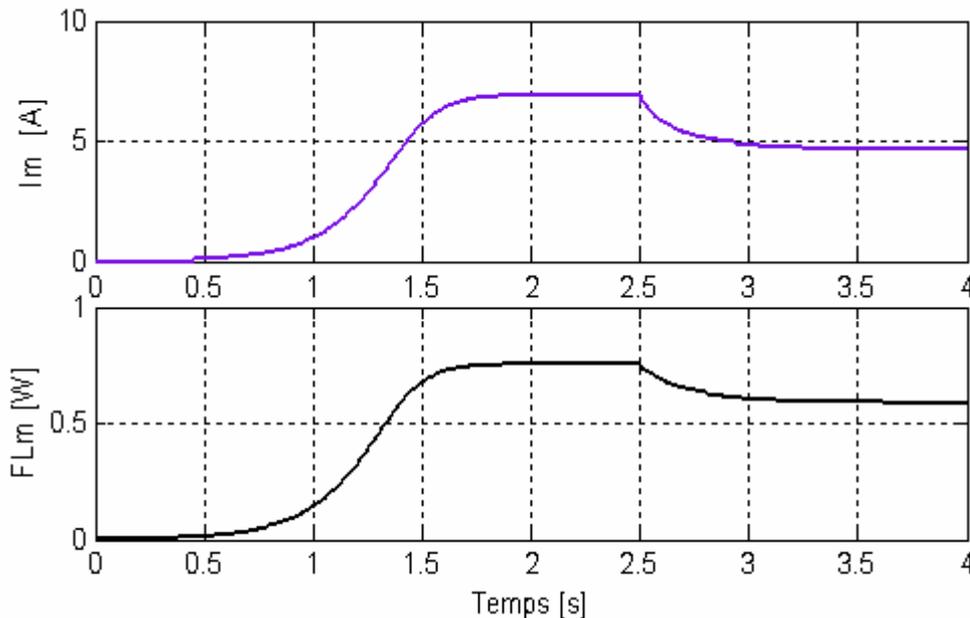


Figure (4-16) : effet de la charge sur le flux et courant de magnétisation.



Pour visualiser l'influence des charges sur les tensions de la GASDE dans les deux étoiles, on fait tourner le rotor de GASDE à une vitesse de synchronisme puis on représente les enveloppes des tensions V_{as1} , V_{as2} dans les 2 cas suivants :

Premier test : $R_{ch1} = 200 \Omega$, $R_{ch2} = 200 \Omega$;

Deuxième test : $R_{ch1} = 250 \Omega$, $R_{ch2} = 170 \Omega$;

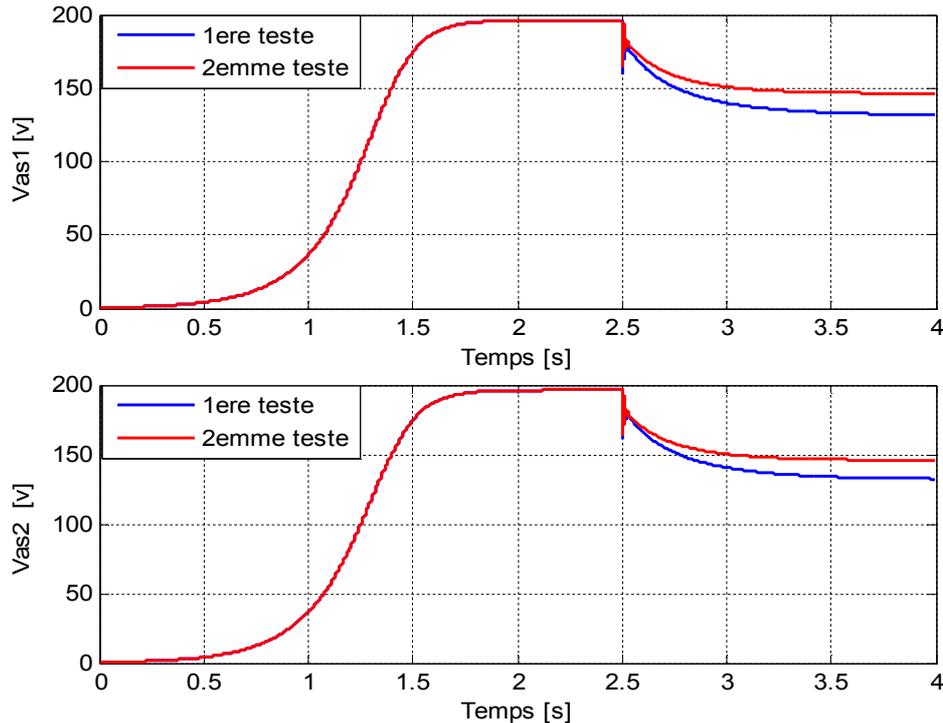


Figure (4-17) : Influence de la charge sur la tension.

Ces résultats (Fig. 4-17) montrent que l'augmentation de la résistance (diminution du courant de charge) engendre une augmentation au niveau des caractéristiques de la machine. La GASDE ne peut donc être utilisée qu'avec des charges bien déterminées et peu exigeantes en termes de tension et de fréquence.

IV.6. Simulation de la GASDE connectée à une charge RL inductive

La (Fig. 4-18) représente le schéma de connexion de la charge inductive RL selon l'axe « d » de l'étoile 1.

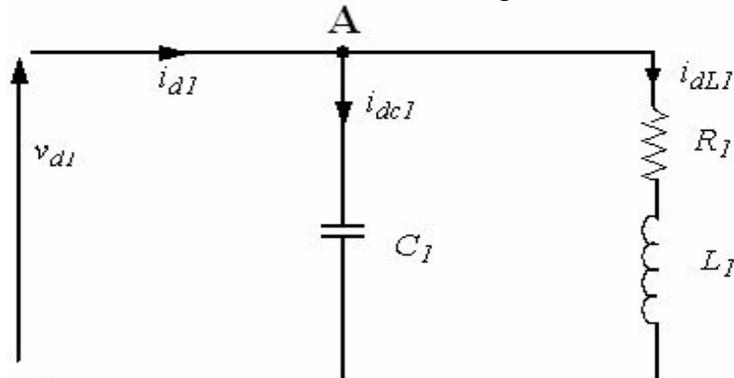


Figure (4-18) : Connexion de la charge RL selon l'axe d (étoile 1).

En écrivant l'équation des courants et en remplaçant dans (4-9) on trouve :

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}V_{d1} &= \frac{1}{C_1}[I_{d1} - I_{dL1}] + \omega_s V_{q1} \\
 \frac{d}{dt}V_{d2} &= \frac{1}{C_2}[I_{d2} - I_{dL2}] + \omega_s V_{q2} \\
 \frac{d}{dt}V_{q1} &= \frac{1}{C_1}[I_{q1} - I_{qL1}] - \omega_s V_{d1} \\
 \frac{d}{dt}V_{q2} &= \frac{1}{C_2}[I_{q2} - I_{qL2}] - \omega_s V_{d2}
 \end{aligned}
 \tag{4-13}$$

Les courants des charges sont donnés par :

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}I_{dL1} &= \frac{1}{L_1}(V_{d1} - R_1 I_{dL1}) + \omega_s I_{qL1} \\
 \frac{d}{dt}I_{dL2} &= \frac{1}{L_2}(V_{d2} - R_2 I_{dL2}) + \omega_s I_{qL2} \\
 \frac{d}{dt}I_{qL1} &= \frac{1}{L_1}(V_{q1} - R_1 I_{qL1}) - \omega_s I_{dL1} \\
 \frac{d}{dt}I_{qL2} &= \frac{1}{L_2}(V_{q2} - R_2 I_{qL2}) - \omega_s I_{dL2}
 \end{aligned}
 \tag{4-14}$$

Le système d'équation devient :

$$\dot{[X]} = [A]. [B]. [X] \quad \text{Avec :} \quad [A] = [L]^{-1}$$

Ou :

$$[L] = \begin{pmatrix}
 -(L_{l1} + L_{ld}) & -L_{ld} & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -L_{ld} & -(L_{l2} + L_{ld}) & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -(L_{l1} + L_{ld}) & -L_{lq} & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -L_{lq} & -(L_{l2} + L_{ld}) & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -L_m & -L_m & 0 & 0 & (L_{lr} + L_m) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -L_m & -L_m & 0 & (L_{lr} + L_m) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{pmatrix}$$

$$[X] = [I_{d1} \ I_{d2} \ I_{q1} \ I_{q2} \ I_{dr} \ I_{qr} \ V_{d1} \ V_{d2} \ V_{q1} \ V_{q2} \ I_{dL1} \ I_{dL2} \ I_{qL1} \ I_{qL2}]^t$$



$$\mathbf{[B]} = \begin{pmatrix}
 r_1 & 0 & -\omega_s(L_{l1}+L_{lq}) & -\omega_s L_{lq} & 0 & \omega_s L_m & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & r_2 & -\omega_s L_{lq} & -\omega_s(L_{l2}+L_{lq}) & 0 & \omega_s L_m & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \omega_s(L_{l1}+L_{ld}) & \omega_s L_{ld} & r_1 & 0 & -\omega_s L_m & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \omega_s L_{ld} & \omega_s(L_{l2}+L_{ld}) & 0 & r_2 & -\omega_s L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -\omega_g L_m & -\omega_g L_m & -r_r & \omega_g(L_m+L_{lr}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \omega_g L_m & \omega_g L_m & 0 & 0 & -\omega_g(L_m+L_{lr}) & -r_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1/C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_s & 0 & -1/C_1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1/C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_s & 0 & -1/C_2 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1/C_1 & 0 & 0 & 0 & -\omega_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/C_1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1/C_2 & 0 & 0 & 0 & -\omega_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/C_2 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & \omega_s & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & 0 & \omega_s \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & 0 & -\omega_s & 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & 0 & -\omega_s & 0 & -\frac{R_2}{L_2}
 \end{pmatrix}$$



Résultats de la simulation

A $t=2.5$ s, on connecte les charges résistives ($R_{ch1}=R_{ch2}=200 \Omega$) et inductives ($L_{ch1}=L_{ch2}=0.05$ H), la vitesse étant fixée à $w_r=157.5$ rd/s et les capacités d'excitation fixées à $C_1=C_2=40 \mu F$.

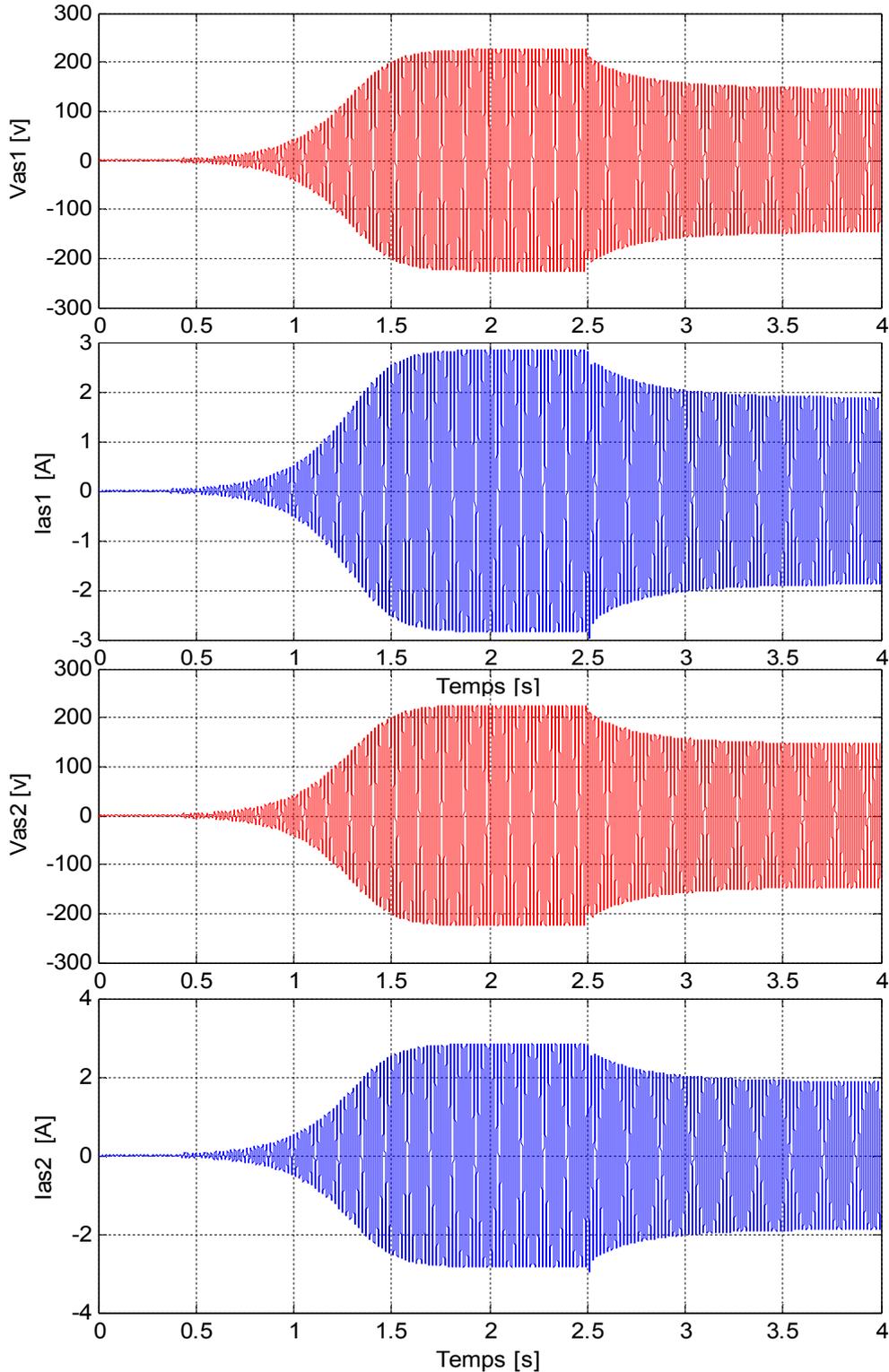


Figure (4-19): Evolution des caractéristiques de la GASDE sur charges RL

La connexion d'une charge inductive consommatrice d'énergie réactive (influence sur le courant de magnétisation) induira une chute de tension ; par ailleurs, l'auto amorçage de la génératrice en serait affecté (vérifier la condition $X_c < X_L$). Pour voir et expliquer l'influence de l'inductance de charge L_{ch} sur les performances de la génératrice, on a dressé un tableau pour différentes valeurs de $L_{ch}(H)$, tout en maintenant la résistance constante fixée à 200Ω .

	C =40 μ F L_{ch} =0.02H	C =40 μ F L_{ch} = 0.04H	C =40 μ F L_{ch} = 0.05H
Tension à vide V_{vide} (V)	196.3	196.3	196.3
Tension avec inductance $V_{ch}(V)$	138.3	130.9	127.1
Variation de tension $\frac{(V_{vide} - V_{charge})}{V_{vide}}$	29.54 %	33.31 %	35.25 %
Courant à vide $I_{vide}(A)$	2.469	2.469	2.469
Courant en charge $I_{ch}(A)$ avec inductance	1.81	1.695	1.636
Variation de courant $\frac{(I_{vide} - I_{charge})}{I_{vide}}$	26.7 %	31.34 %	33.73 %
Courant de magnétisation à vide $I_{m,vide}(A)$	6.981	6.981	6.981
Courant de magnétisation avec inductance $I_{m,L}(A)$	4.415	4.13	3.985
Variation de courant de magnétisation $\frac{(I_{m,vide} - I_{m,charge})}{I_{m,vide}}$	36.75 %	40.83	42.91 %

Tab.4-2: Evolution des caractéristiques de la GASDE sur charges RL avec R fixe.



L'insertion de la charge engendre des diminutions aux niveaux des tensions et courants statoriques ainsi que le courant de magnétisation, respectivement de 35.25 %, 33.73 % et 42.91 %.

Cela est dû aux mêmes raisons que pour GAs : démagnétisation de la machine et déficit en énergie réactive nécessaire pour magnétiser la machine d'une part et pour l'alimentation de la charge d'autre part. Pour une valeur de $X_C < X_L$ il n'y a pas d'amorçage. La (Fig 4-20) montre qu'il y a un déphasage ($\Delta t = 0.004$ s) des tensions aux bornes des deux étoiles après insertion de la charge ($L_{ch1} = L_{ch2} = 0.05H$, $R_{ch1} = R_{ch2} = 200\Omega$, $C_1 = C_2 = 40 \mu F$).

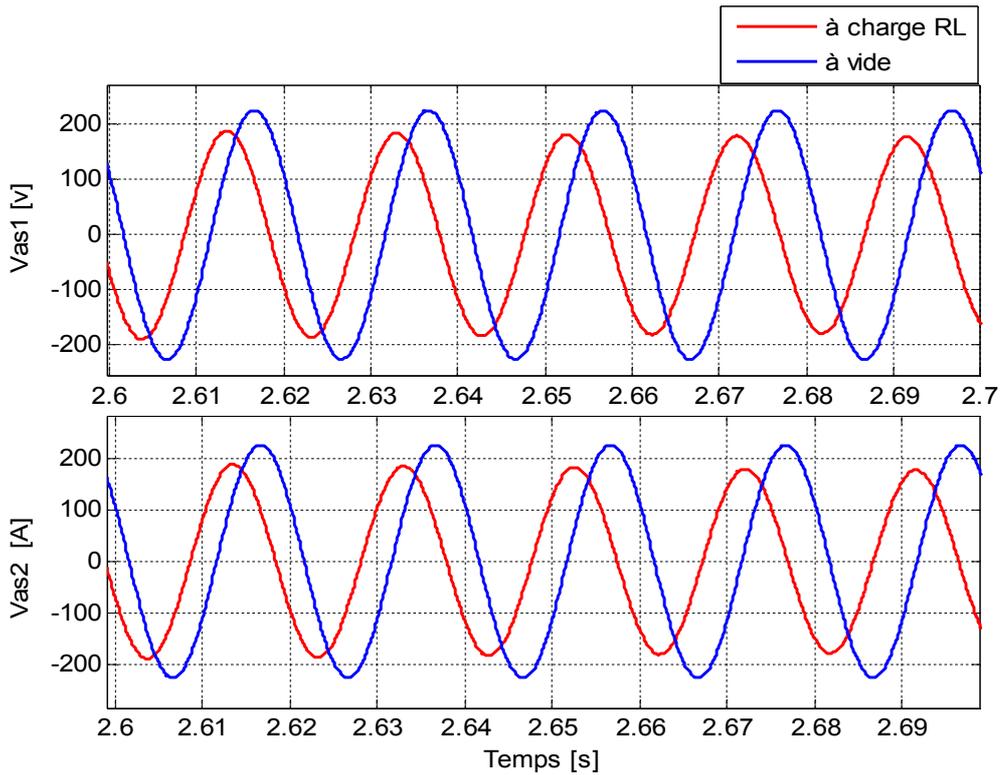


Figure (4-20): Déphasage statorique aux bornes des deux étoiles sur charges RL.

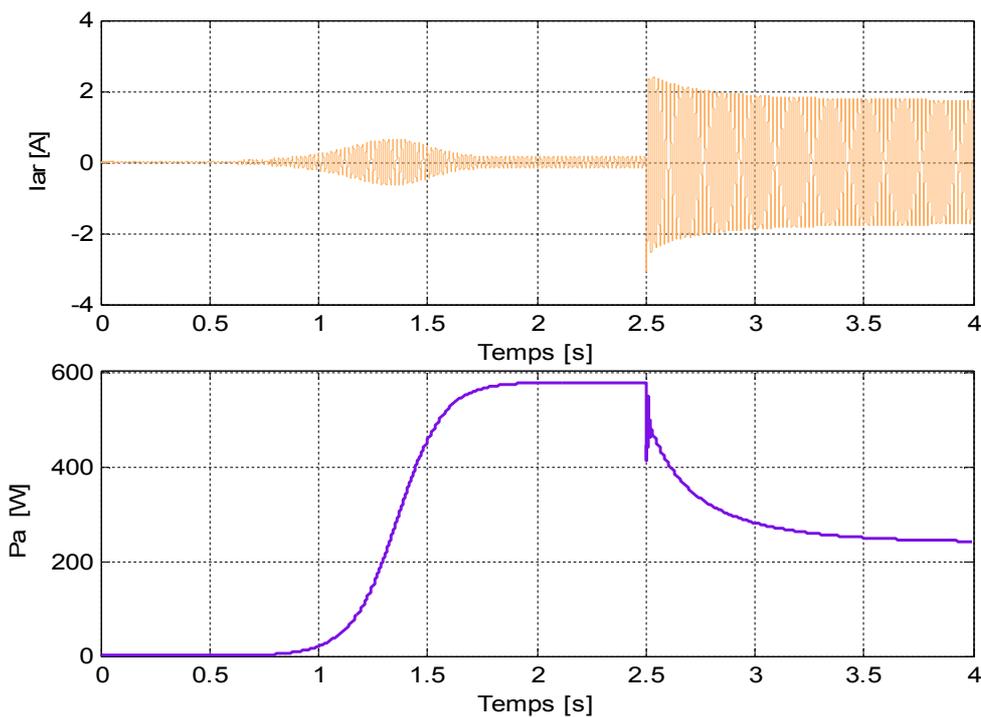


Figure (4-21): Effet de la puissance active sur le courant rotorique.



La connexion d'une charge inductive consommatrice d'énergie réactive aura pour effet de diminuer le courant de magnétisation qui est fourni par le condensateur. Cette diminution du courant signifie moins de flux, ce qui nuit aux performances de la machine.

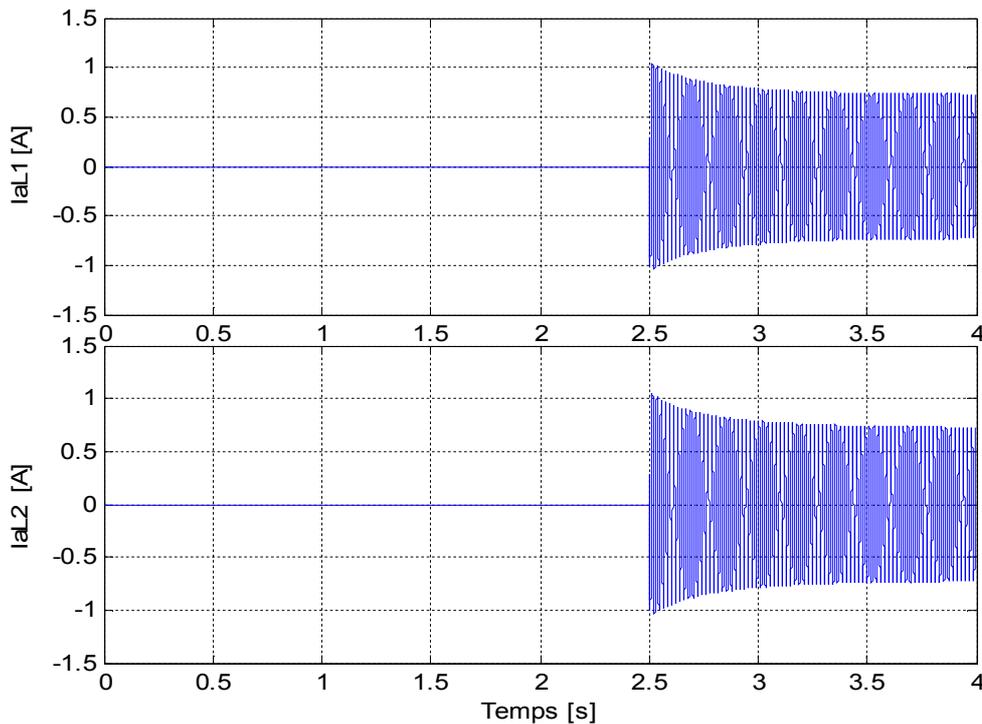


Figure (4-22): Effet de la charge inductive sur les courants des charges.

Les résultats de simulation de la GASDE débitant sur des charges purement résistives et des charges inductives montrent bien la sensibilité des tensions aux bornes du stator (étoiles 1 et 2). Il existe des charges critiques (purement résistives ou inductives) qui démagnétisent totalement la GASDE. Les charges inductives consommant beaucoup plus d'énergie réactive ceci induira des chutes de tension plus importantes que dans le cas de charges purement résistives.

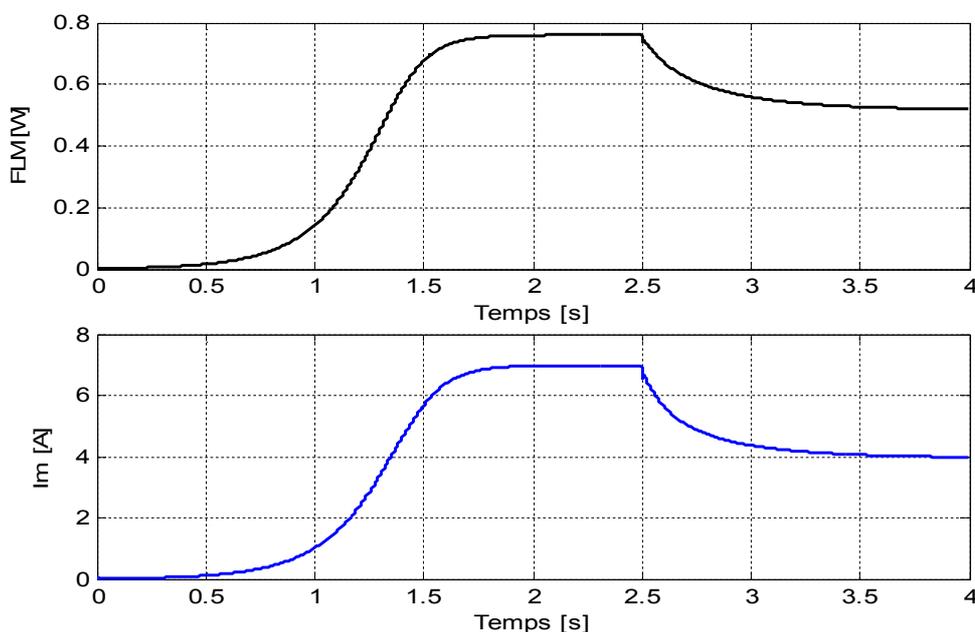


Figure (4-23): Effet de la charge inductive sur les paramètres de la magnétisation.



IV.7. Charges RL avec compensation parallèle

Pour remédier aux inconvénients des charges RL examinés précédemment, on réalise une compensation d'énergie réactive par l'insertion de condensateurs dans toutes les phases en parallèle. Ces condensateurs de compensation aident les condensateurs d'auto-amorçage à fournir l'énergie réactive absorbée par les inductances L. Les dérivées des tensions aux bornes des condensateurs de compensation d'axes « d-q » (étoiles 1 et 2) sont données par :

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_{d1}}{dt} &= \frac{1}{C_{ch}+C_1} (I_{d1} - I_{dL1}) + \omega_s V_{q1} & \frac{dI_{dL1}}{dt} &= \frac{1}{L_1} (V_{d1} - R_1 I_{dL1}) + \omega_s I_{qL1} \\
 \frac{dV_{d2}}{dt} &= \frac{1}{C_{ch}+C_2} (I_{d2} - I_{dL2}) + \omega_s V_{q2} & \frac{dI_{dL2}}{dt} &= \frac{1}{L_2} (V_{d2} - R_2 I_{dL2}) + \omega_s I_{qL2} \\
 \frac{dV_{q1}}{dt} &= \frac{1}{C_{ch}+C_1} (I_{q1} - I_{qL1}) - \omega_s V_{d1} & \frac{dI_{qL1}}{dt} &= \frac{1}{L_1} (V_{q1} - R_1 I_{qL1}) - \omega_s I_{dL1} \\
 \frac{dV_{q2}}{dt} &= \frac{1}{C_{ch}+C_2} (I_{q2} - I_{qL2}) - \omega_s V_{d2} & \frac{dI_{qL2}}{dt} &= \frac{1}{L_2} (V_{q2} - R_2 I_{qL2}) - \omega_s I_{dL2}
 \end{aligned}$$

En ajoutant ce système d'équations au système (4-9) obtient le système d'état suivant :

$$\dot{[X]} = [A] \cdot [B] \cdot [X]$$

Avec :

$$[A] = [L]^{-1}$$

Ou :

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix}
 -(L_{l1}+L_{ld}) & -L_{ld} & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -L_{ld} & -(L_{l2}+L_{ld}) & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -(L_{l1}+L_{ld}) & -L_{lq} & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -L_{lq} & -(L_{l2}+L_{ld}) & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -L_m & -L_m & 0 & 0 & (L_{lr}+L_m) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -L_m & -L_m & 0 & (L_{lr}+L_m) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{pmatrix}$$

$$[X] = [I_{d1} \ I_{d2} \ I_{q1} \ I_{q2} \ I_{dr} \ I_{qr} \ V_{d1} \ V_{d2} \ V_{q1} \ V_{q2} \ I_{dL1} \ I_{dL2} \ I_{qL1} \ I_{qL2}]^t$$



$$\mathbf{[B]} = \begin{pmatrix}
 r_1 & 0 & -\omega_s(L_{l1}+L_{lq}) & -\omega_s L_{lq} & 0 & \omega_s L_m & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & r_2 & -\omega_s L_{lq} & -\omega_s(L_{l2}+L_{lq}) & 0 & \omega_s L_m & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \omega_s(L_{l1}+L_{ld}) & \omega_s L_{ld} & r_1 & 0 & -\omega_s L_m & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \omega_s L_{ld} & \omega_s(L_{l2}+L_{ld}) & 0 & r_2 & -\omega_s L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -\omega_g L_m & -\omega_g L_m & -r_r & \omega_g(L_m+L_{lr}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \omega_g L_m & \omega_g L_m & 0 & 0 & -\omega_g(L_m+L_{lr}) & -r_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1/(C_1+C_{s1}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_s & 0 & -1/(C_1+C_{s1}) & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1/(C_2+C_{s2}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_s & 0 & -1/(C_2+C_{s2}) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1/(C_1+C_{s1}) & 0 & 0 & 0 & -\omega_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/(C_1+C_{s1}) & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1/(C_2+C_{s2}) & 0 & 0 & 0 & -\omega_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/(C_2+C_{s2}) \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & \omega_s & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & 0 & \omega_s \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & 0 & -\omega_s & 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & 0 & -\omega_s & 0 & -\frac{R_2}{L_2}
 \end{pmatrix}$$



Résultats de la simulation

Dans le cas de la compensation parallèle, on obtient les résultats illustrés (Fig 4-24) ci-dessous :

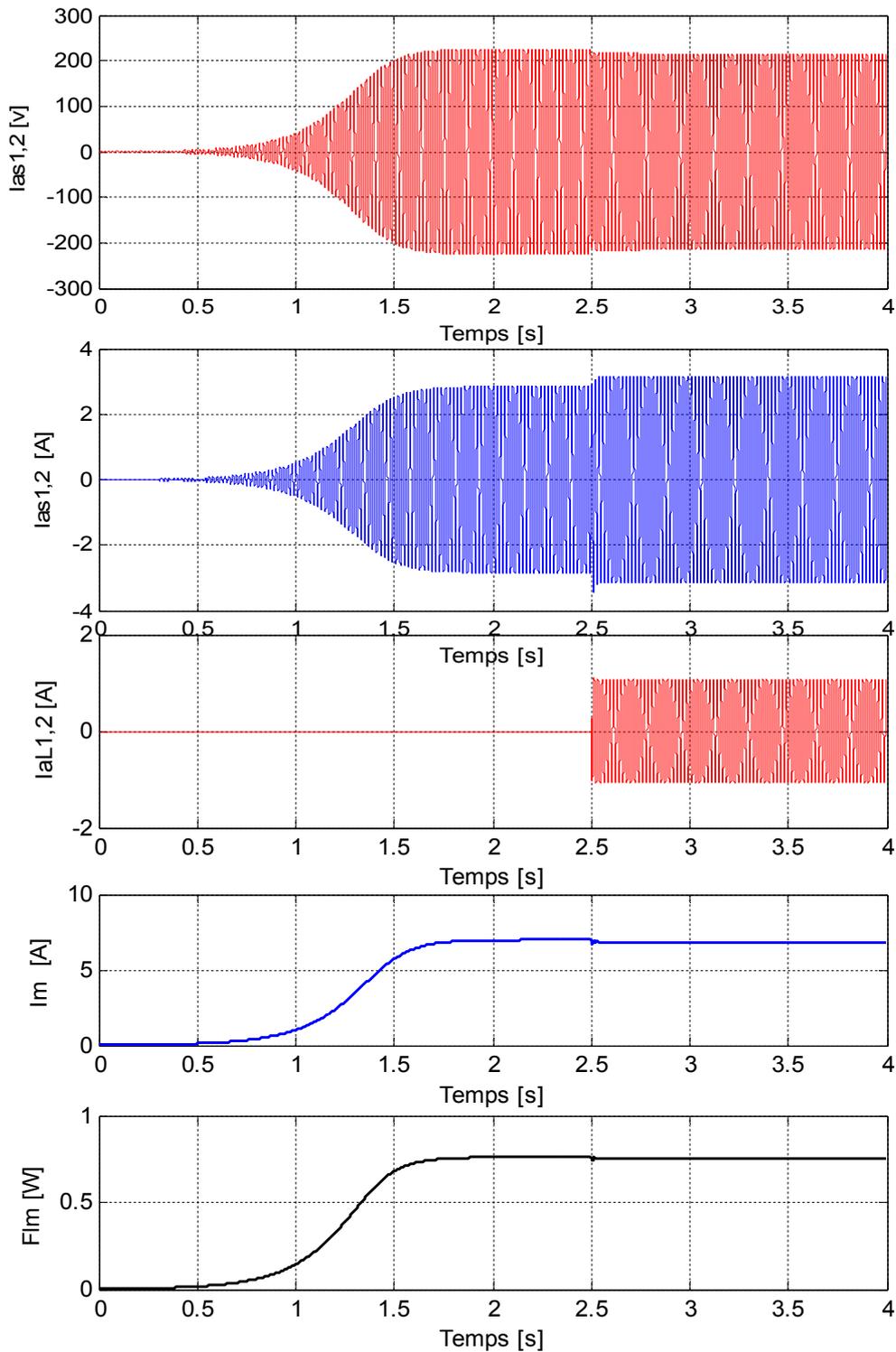


Figure (4-24) : Effet de la compensation sur les performances de la GASDE.

Les performances en charge résistive-inductive ($R_{chl} = 200 \Omega$ et $L_{ch} = 0.05 H$) avec une capacité de compensation parallèle $C_s = 6 \mu F$ ont permis de diminuer la chute de tension.



Les augmentations du courant de stator devraient être surveillées pour ne pas dépasser le courant nominal du stator (Fig 4-25).

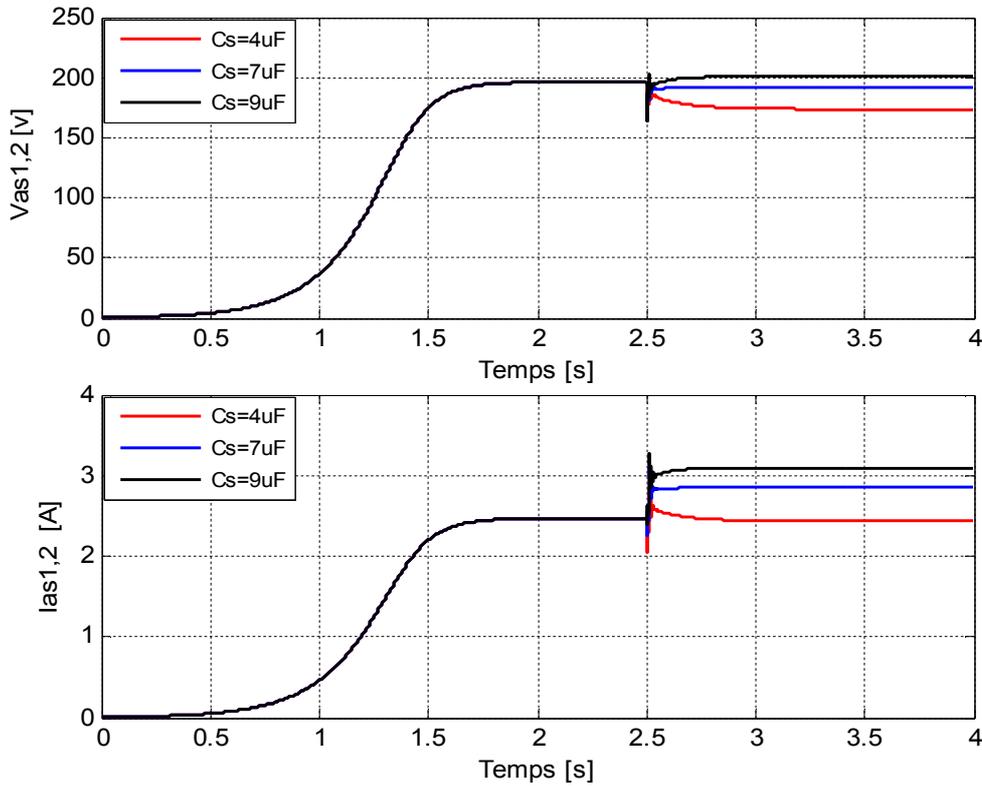


Figure (4-25) : Effet de la capacité de compensation sur les performances de la GASDE.

La (Fig4-26) montre la différence entre le fonctionnement avec compensation ($C_s=6 \mu F$) et sans compensation sur charge ($R=200\Omega, L_{ch}=0.05 H$).

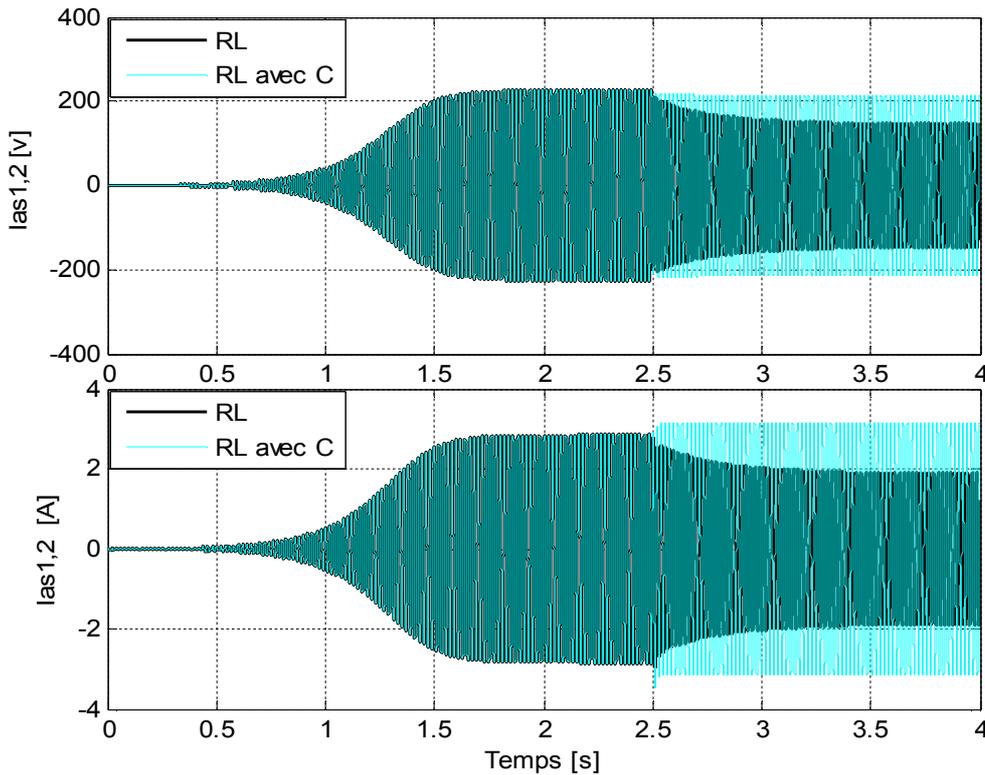


Figure (4-26) : Différence entre un fonctionnement avec compensation et sans compensation



L'influence de la compensation parallèle sur la fréquence de la GASDE sur charges RL représentée (Fig 4-27) indique un déphasage correspondant à $\Delta t = 0.003$ s entre le fonctionnement avec compensation et sans compensation.

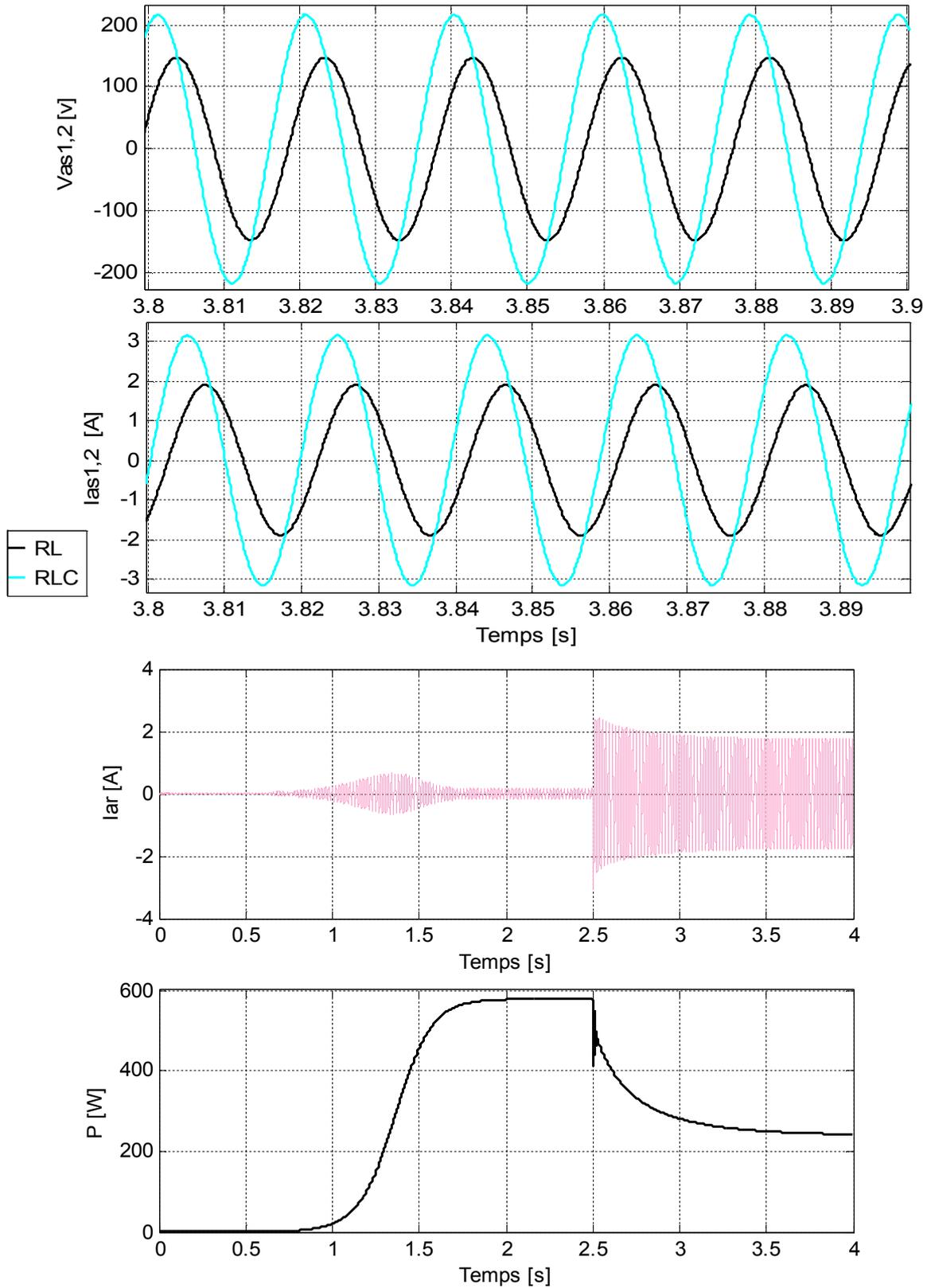


Figure (4-27) : Effet de la compensation sur la fréquence statorique.



IV.8. Conclusion

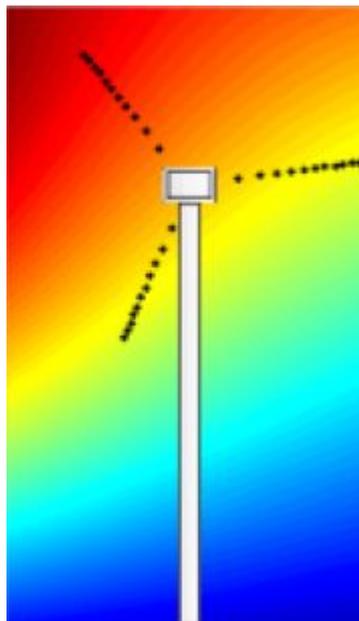
Dans ce chapitre nous avons effectué différentes simulations sur la GASDE auto excitée dans le cas d'un fonctionnement autonome (non connectée au réseau). Pour cela, un modèle mathématique de la GASDE a été développé en incluant l'inductance de fuite mutuelle commune aux deux enroulements. Les résultats de ces simulations peuvent se résumer à :

- l'inductance de magnétisation est le facteur principal de la stabilisation des caractéristiques générées sous les diverses conditions de fonctionnement ;
- les capacités d'auto-amorçage et la vitesse d'entraînement ont des influences directes sur les tensions, les courants et leurs fréquences ;
- les performances sont affectées par les paramètres de la machine, la vitesse d'entraînement et par les charges, en particulier les charges inductives qui sont consommatrices d'énergie réactive, ce qui nuit à la magnétisation de la machine, car se sont les capacités d'excitation qui doivent partager la puissance réactive qu'elles produisent entre la machine et les inductances ;
- les performances de la GASDE sont liées à la nature de la charge ; elles sont affectées par la puissance et le facteur de puissance de la charge ;
- l'insertion de condensateurs de compensation préalablement bien dimensionnés en série avec les charges permet de maintenir les tensions en valeurs à vide et de fournir l'énergie réactive nécessaire pour compenser celle absorbée par la charge.



CHAPITRE V

Simulation de la chaine de conversion





V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation d'une éolienne à axe horizontal tri-pales. Nous allons élaborer le modèle de la turbine et de la génératrice asynchrone auto-excitée sous environnement *SIMULINK*, sans aborder la stratégie de la commande, afin d'étudier la variation de la puissance écoulee entre la turbine et la génératrice.

V.2. Présentation de *Simulink*

SIMULINK est un logiciel qui permet de modéliser, simuler et analyser des systèmes dynamiques. Ce logiciel a été produit par la société « *The Math Works Inc* ». C'est un outil totalement intégré au noyau de calcul de *Matlab* qui procure un environnement de modélisation basé sur des schémas-blocs. *Simulink* possède une interface graphique qui facilite l'analyse de systèmes dans le domaine temporel et fréquentiel. Les systèmes *Simulink* ne sont plus décrits par des lignes de codes *Matlab* mais simplement définis par des schémas-blocs dont tous les éléments sont prédéfinis dans des bibliothèques de blocs élémentaires qu'il suffit d'assembler. Le schéma bloc de la (Fig.5-1) illustre la représentation d'un tel système [31].

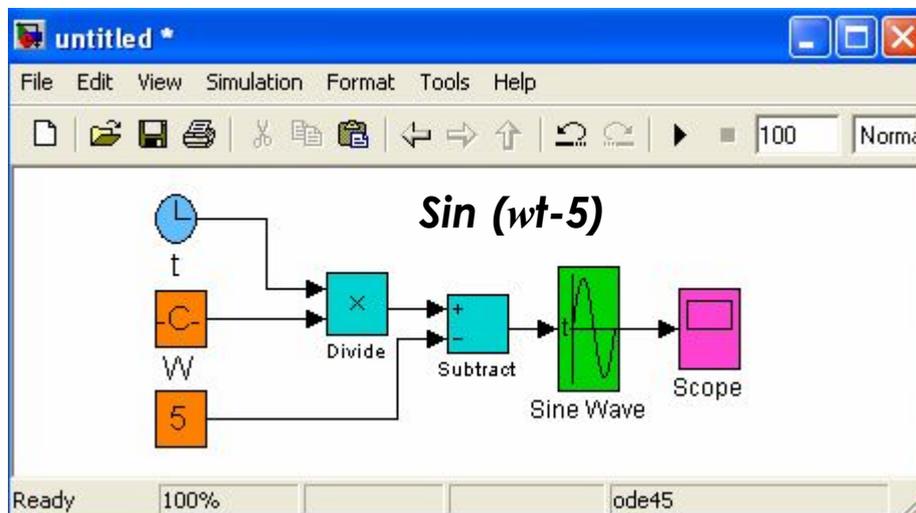


Figure (5-1) : Représentation d'un système sous *Simulink*.

Le système modélisé sous *Simulink* peut recevoir des données de l'espace de travail de *Matlab* ou y envoyer des données de sortie. L'échange de données entre *Simulink* et l'espace de travail *Matlab* peut se faire à l'aide de variables communes ou par l'intermédiaire de fichiers MAT.

- ✓ **Au niveau de la modélisation** *Simulink* met à disposition :
 - un éditeur graphique dans lequel les blocs sont reliés entre eux avec des fils de connexion.
 - des bibliothèques de blocs paramétrables.
- ✓ **Au niveau de simulation** *Simulink* permet :
 - la simulation de systèmes en temps continu ; discret ou hybride ;
 - la simulation de systèmes linéaires (définis sous forme matricielle) et non-linéaires.



V.3. Modèle d'éolienne avec Machine Asynchrone

La figure suivante montre les trois parties à modéliser :

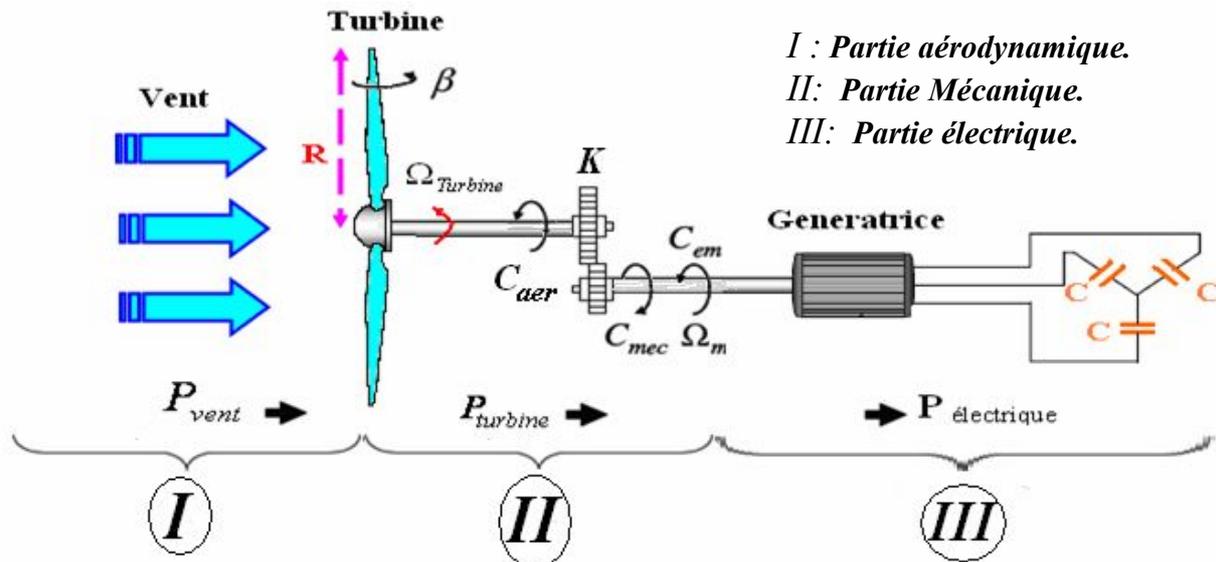


Figure (5-2) : Configuration d'une éolienne [32].

V.3.1 Partie Aérodynamique (le Vent)

Le vent est l'énergie primaire des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle.

L'un des principes retenus consiste à générer une série temporelle de la vitesse du vent à partir d'un bruit en entrée. Pour ce faire, la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes :

- une composante turbulente du vent $v_T(t)$ est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- une composante lente v_{moy} ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

$$v(t) = v_0 + v_T(t) \quad (5-1)$$

L'aéroturbine filtre les fluctuations hautes fréquences. On reconstitue à cet effet un filtre passe-bas à la composante de turbulence afin que celle-ci reproduise une caractéristique plus proche de la réalité dont la fonction de transfert est donnée [32] par:

$$H_f = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (5-2)$$

La valeur de la constante de temps dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de turbulence du vent et de la vitesse du vent moyenne ($\tau = 4s$) [32].

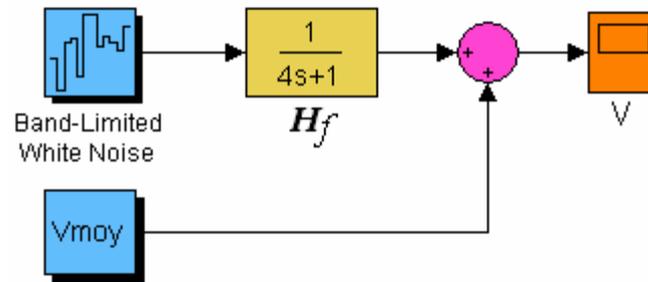


Fig. (5-3) : Synoptique de reconstruction du vent

V.3.2 Partie Mécanique

Dans cette partie, il y a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor de la génératrice : la turbine éolienne se compose de 3 pales orientables; le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (tr / mn).

V.3.2.1 Modèle de la Turbine

L'équation mathématique suivante représente la relation entre la vitesse du vent et la puissance mécanique extraite

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 V^3 \quad (5-3)$$

Où :

- $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$: masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression.
- V est la vitesse du vent.

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent (coef de puissance C_p) la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{Turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (5-4)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La (Fig 5-4) représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β . Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{Turbine}}{V} \quad (5-5)$$



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

$$C_{aer} = \frac{P_{Turbine}}{\Omega_T} \quad \text{en } (N.m) \quad (5-6)$$

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient C_p et différentes expressions ont été proposées. Nous présentons ci-dessous quatre formes déjà utilisées dans les 4 articles scientifiques [20], [32], [33], [34] respectivement :

$$1) C_P(\lambda, \beta) = [0.5 - 0.167(\beta - 2)] \cdot \sin\left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2)$$

$$2) C_P(\lambda, \beta) = c_1(c_2\left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.0035}{\beta^3 + 1}\right) - c_3 \cdot \beta - c_4)e^{-c_5\left(\frac{0.0035}{(\lambda + 0.08\beta) \cdot (\beta^3 + 1)}\right)} + c_6 \cdot \lambda$$

Où :

$$C_1 = 0.5109 \quad C_2 = 116 \quad C_3 = 0.4$$

$$C_4 = 5 \quad C_5 = 21 \quad C_6 = 0.0068$$

$$3) C_p = 0.22 \times \left(\frac{116}{\lambda'} - 0.4 \times \beta - 5\right) \cdot e^{\frac{-12.5}{\lambda'}} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$$4) C_p(\lambda) = 7.95633 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^5 - 17.375 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^4 + 9.86 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^3 - 9.4 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^2 + 6.38 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda + 0.001$$

Avec :

β : Angle de calage.

R : longueur de la pale.

$\Omega_{Turbine}$: vitesse mécanique de la turbine en rad/s.



Pour notre exemple d'éolienne, le coefficient de puissance C_p est donné dans la référence [33] par la relation suivante :

$$C_p = 0.22 \times \left(\frac{116}{\lambda'} - 0.4 \times \beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{12.5}{\lambda'}} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (5-7)$$

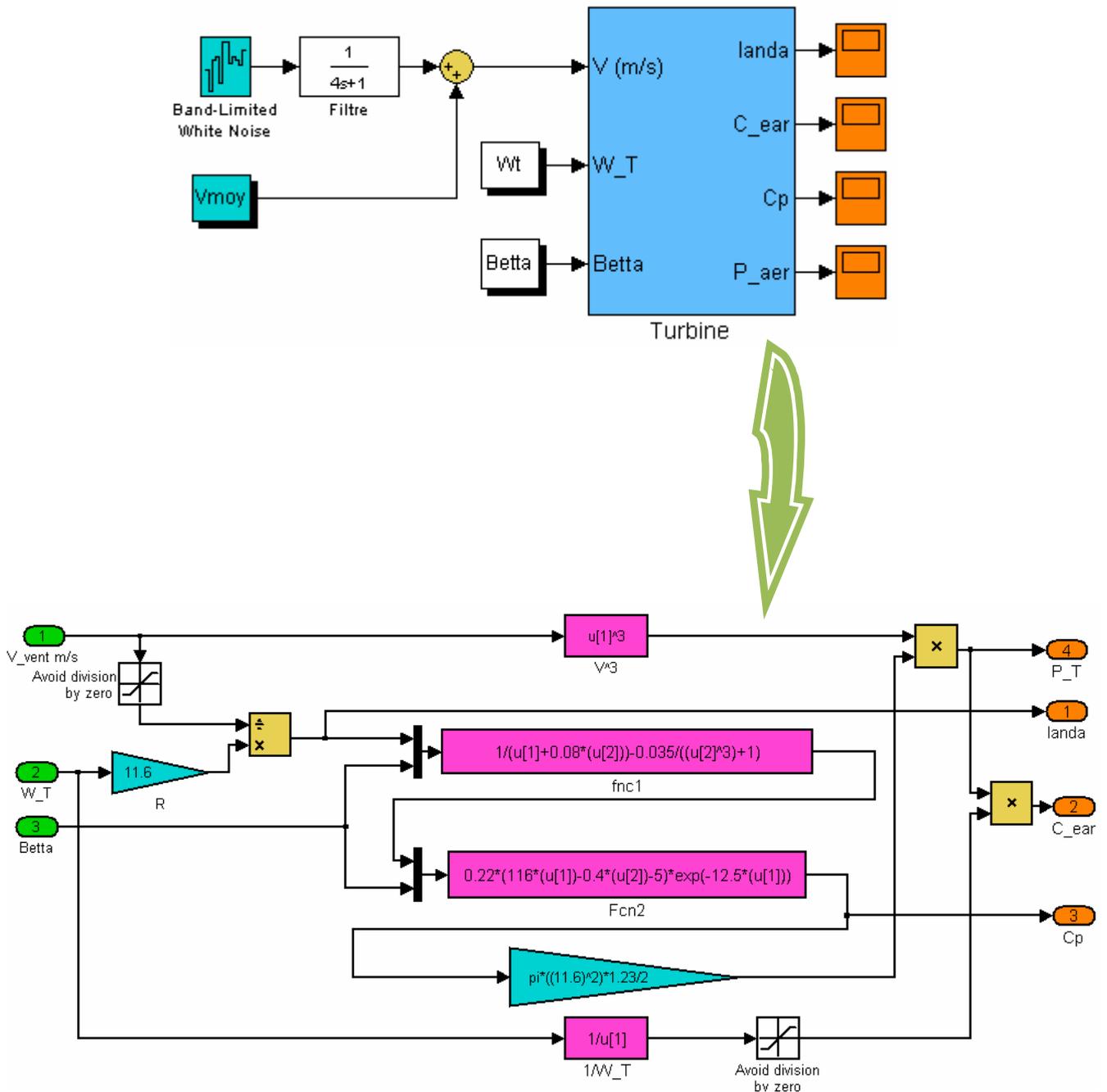


Figure (5-4) : Modèle de la turbine à vent développé sous Matlab / Simulink.



La (Fig.5-5) illustre les courbes de $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β (deg) obtenues par la relation (5-7).

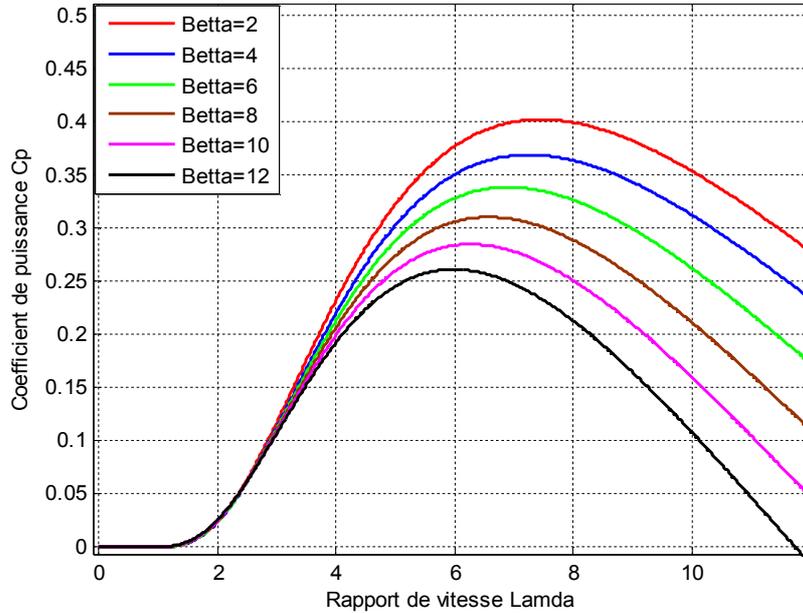


Figure (5-5): Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ

Sur la (fig.5-5), plusieurs courbes sont représentées mais nous nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda = 7.38$, $C_p = 0,402$, $\beta = 2^\circ$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. On peut déterminer la caractéristique puissance en fonction de la vitesse de rotation, Ω_T pour un vent, V donné.

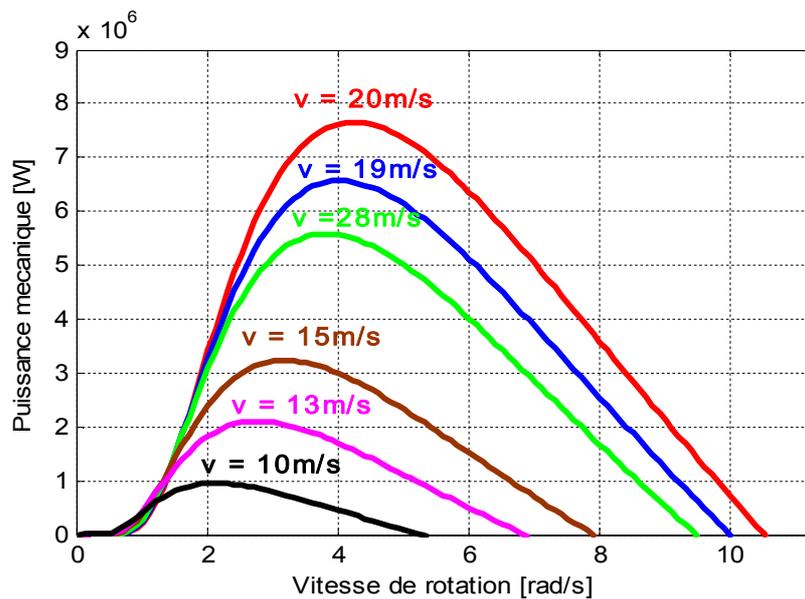


Figure (5-6) : Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ .



V.3.2.2 Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [4] :

$$C_{mec} = \frac{1}{K} C_{aer} \quad (5-8)$$

Où :

K = Rapport de multiplication.

C_{mec} = Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur ainsi

$$\Omega_{mec} = K . \Omega_t \quad (5-9)$$

Où :

Ω_{mec} = vitesse du générateur (rad/s mécanique).

V.3.2.3 Modèle de l'arbre

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - f . \Omega_{mec} \quad (5-10)$$

Où :

J = inertie totale des parties tournantes (turbine + génératrice) (Kg.m^2).

f = coefficient de frottement visqueux.

C_T = ($C_{em} + C_{mec}$) = couple totale de l'éolienne (N.m).

C_{em} = couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

En fonctionnement générateur le couple C_{em} a un signe négatif.

Le schéma bloc suivant représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine :

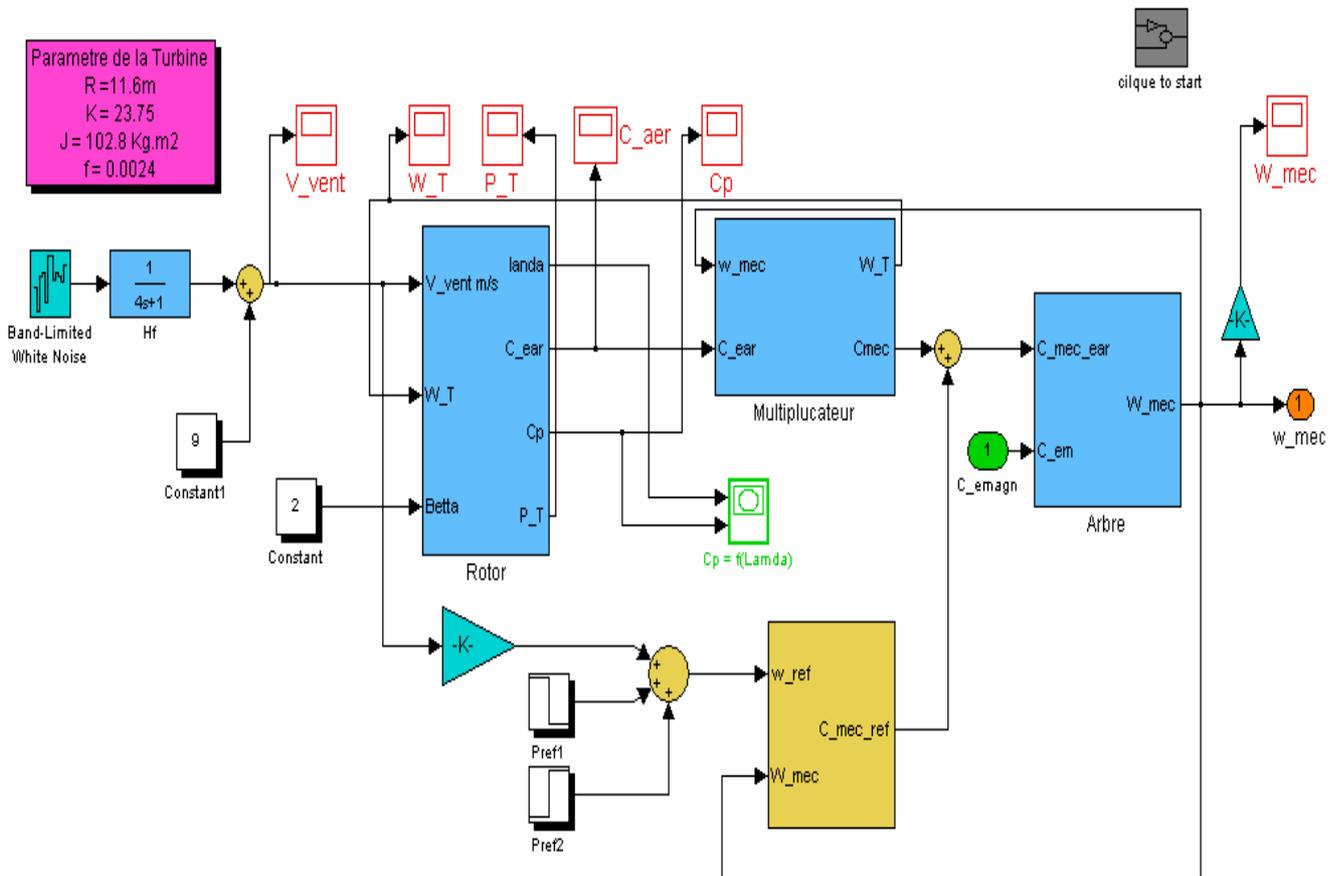
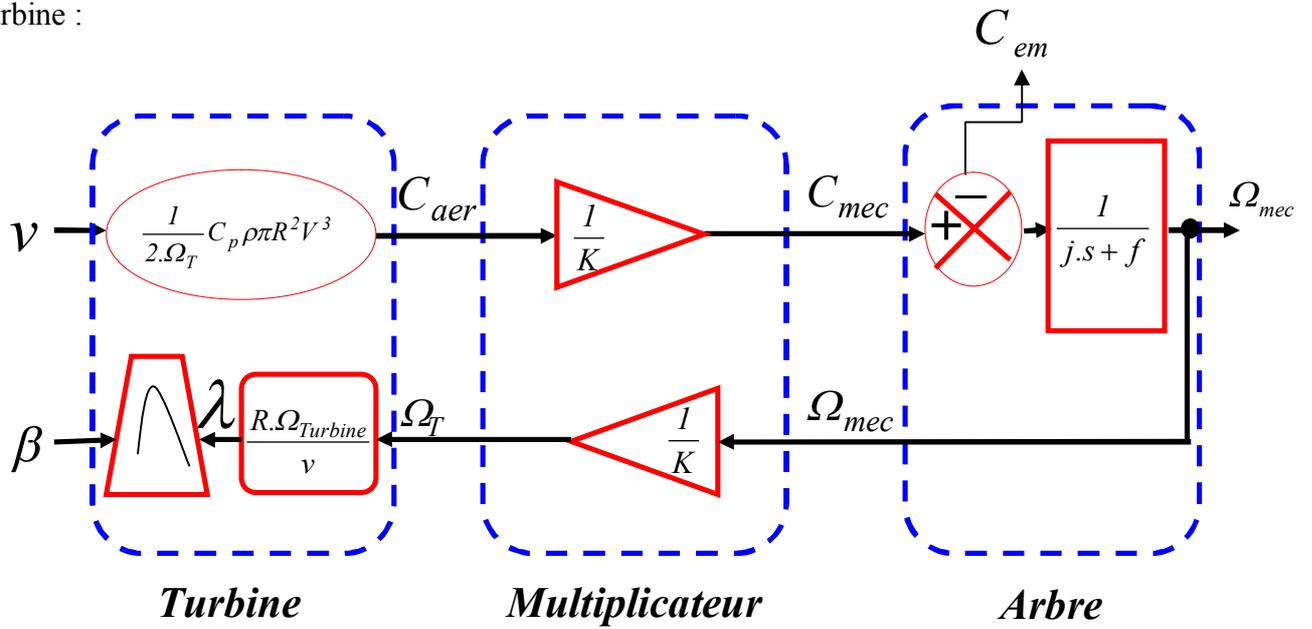


Figure (5-7) : Modèle de la partie mécanique développé sous Matlab / Simulink.



V.3.3 Partie Électrique

Le modèle de la génératrice asynchrone est déduit de la machine biphasée [1]; en supposant que les variables sont exprimées dans un référentiel tournant à la vitesse de synchronisme; les équations de la machine asynchrone s'écrivent ainsi :

$$L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + L_m \frac{dI_{dr}}{dt} = -R_s \cdot I_{ds} - V_{ds}$$

$$L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + L_m \frac{dI_{qr}}{dt} = -R_s \cdot I_{qs} - V_{qs}$$

$$L_m \frac{dI_{ds}}{dt} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} = -\omega \cdot L_m \cdot I_{qs} - R_r \cdot I_{dr} - \omega \cdot L_r \cdot I_{qr}$$

$$L_m \frac{dI_{qs}}{dt} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} = \omega \cdot L_m \cdot I_{ds} + \omega \cdot L_r \cdot I_{dr} - R_r \cdot I_{qr}$$

$$C \cdot \frac{dv_{ds}}{dt} = i_{ds}$$

$$C \cdot \frac{dv_{qs}}{dt} = i_{qs}$$

Ce système peut être représenté sous la forme suivante :

$$(\mathbf{Lm} \times [\mathbf{L1}] \cdot [\dot{\mathbf{X}}]) + ([\mathbf{L2}] \cdot [\dot{\mathbf{X}}]) = ([\mathbf{A1}] \cdot [\mathbf{X}]) + \omega \times ([\mathbf{A2}] \cdot [\mathbf{X}]) + \omega \times \mathbf{Lm} \times ([\mathbf{A3}] \cdot [\mathbf{X}]).$$

Où :

$$[\mathbf{L1}] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$[\mathbf{L2}] = \begin{pmatrix} l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$[\mathbf{A1}] = \begin{pmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -R_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_r & 0 & 0 \\ 1/c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/c & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$[\mathbf{A2}] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



$$[A3] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} ; [X] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} ; [X_0] = \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.01 \\ 0.01 \\ 0.01 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} ;$$

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone peut être exprimé par plusieurs formes d'équations, notamment :

$$C_{em} = P.Lm.(I_{rd}.I_{sq} - I_{rd}.I_{sd})$$

Le schéma bloc de la génératrice asynchrone auto-excitée qui n'est que l'image des équations déjà exposées est illustré (Fig. 5-8) :

- Les **entrées** sont les courants statoriques et rotoriques (à t=0), les tensions statoriques (à t=0) qui représentent le champ rémanent et la vitesse mécanique.
- Les **sorties** sont les courants statoriques et rotoriques, les tensions statoriques et le couple électromagnétique.
-

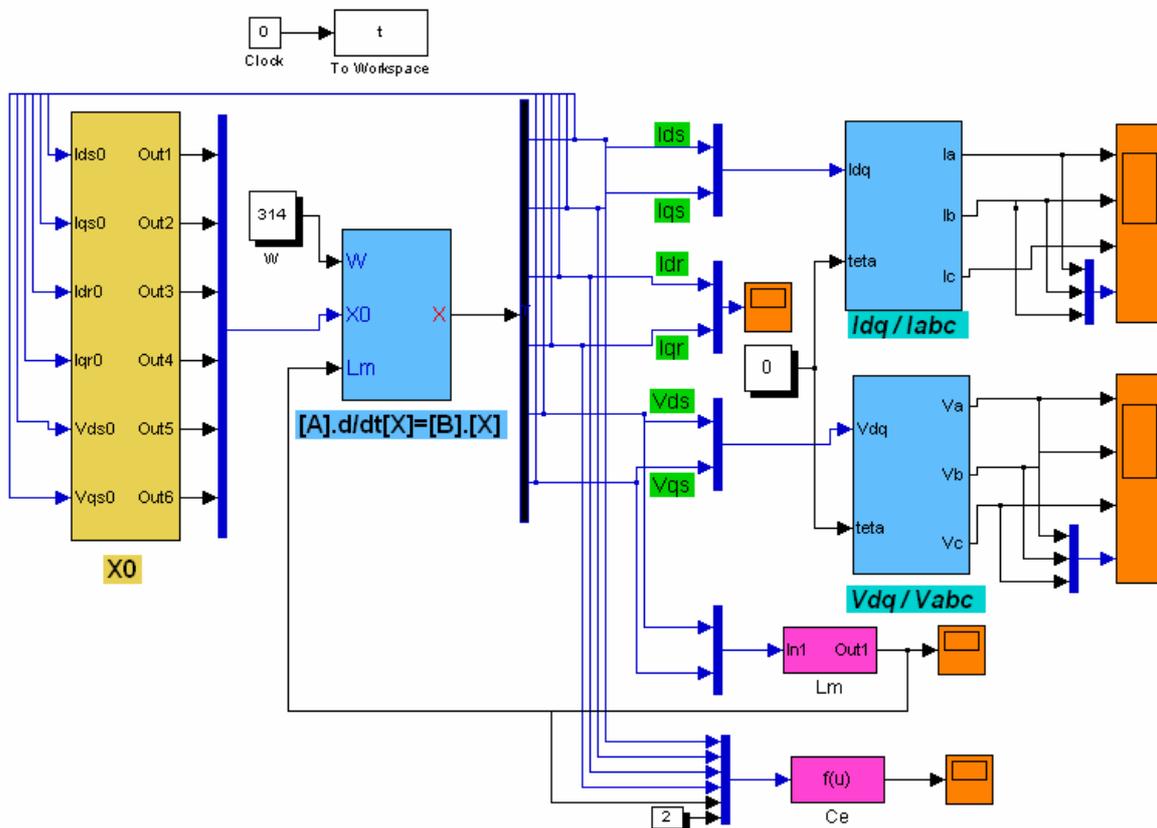


Figure (5-8) : Modèle de la Génératrice développé sous Matlab / Simulink.

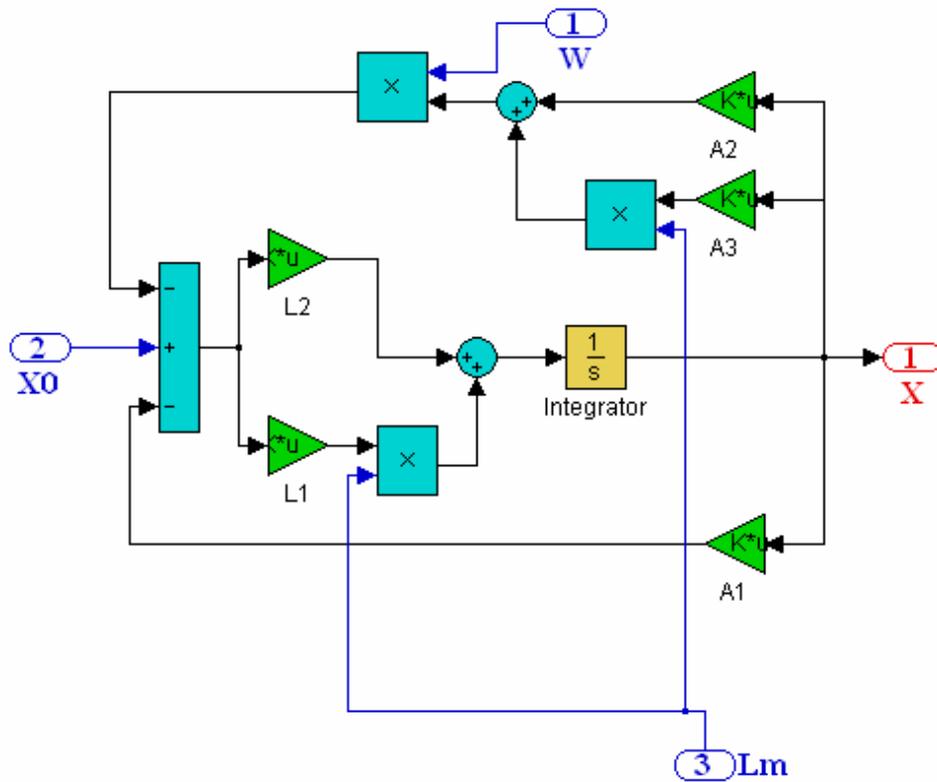


Figure (5-9) : Diagramme déduit des équations d'état

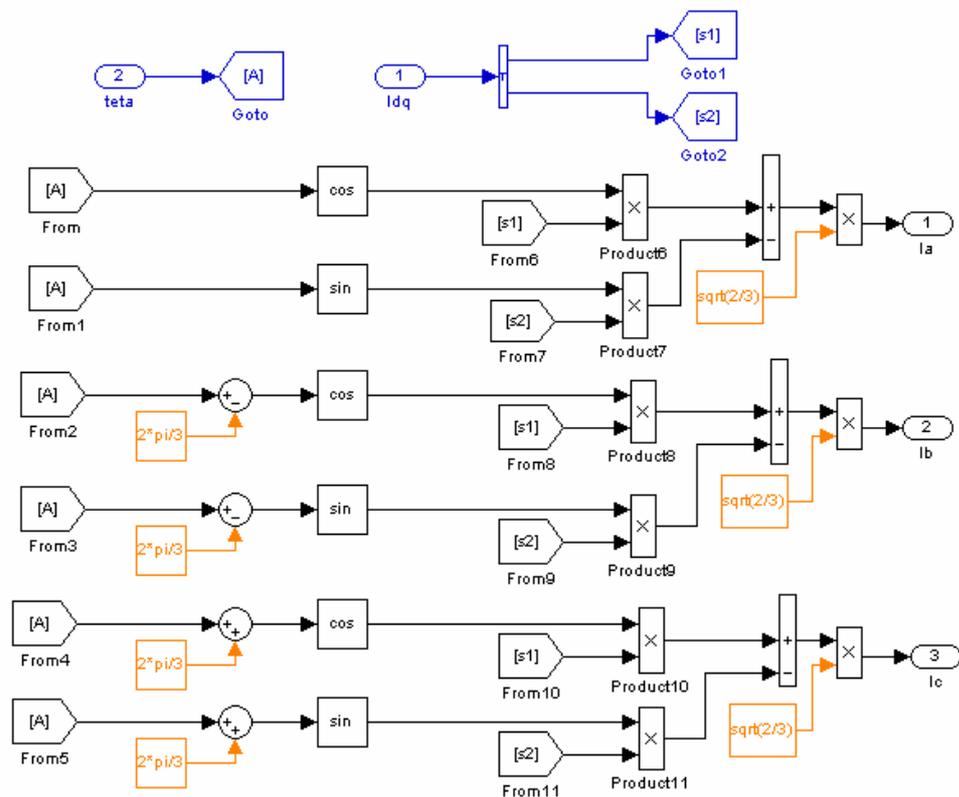


Figure (5-10) : Diagramme de la transformation de Park.



Le modèle de tout le système composé de la génératrice asynchrone, de la turbine à vent ainsi que du multiplicateur de vitesse, tel que développé sous *Matlab-Simulink*, est le suivant (fig.5-9)

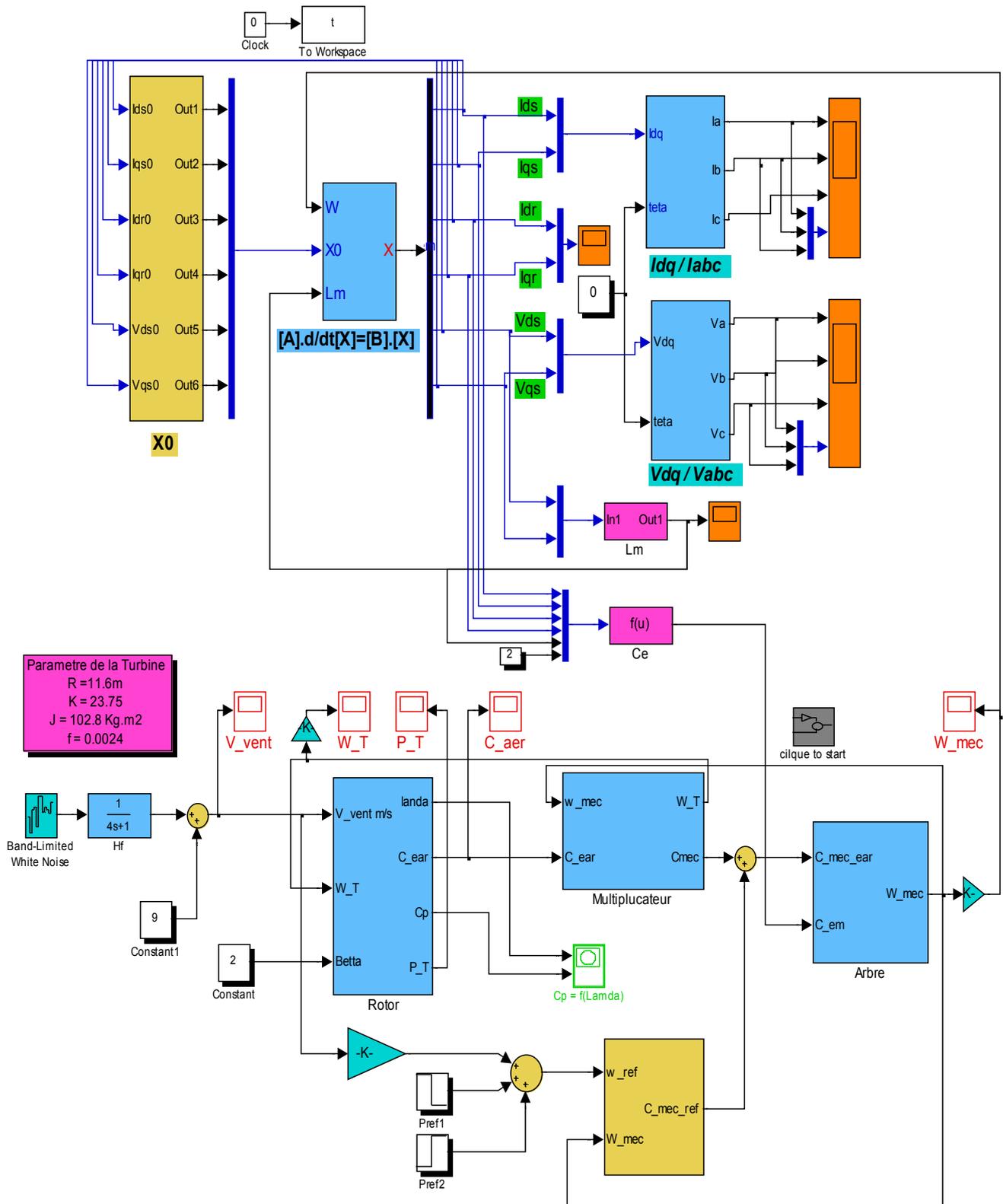


Figure (5-11) : Schéma de simulation développé sous *Matlab-Simulink* du système éolien composé de la machine asynchrone et de la turbine à vent.



Les paramètres de tout le système sont rassemblés dans les tableaux 5-1.

Données de la turbine à vent	
Diamètre du rotor	23.2 m
Nombre de pales	3
Densité de l'air	1.23 Kg/m ³
Vitesse moyenne du vent	9 m/s
Angle de calage	2°
Valeur de la constante de temps	4 s

Données du multiplicateur	
Rapport de vitesse	23.75
Moment d'inertie	102.8 Kg.m ²
Coefficient de frottement visqueux	0.0024

Données du générateur asynchrone	
Nombre de paires de pôles	2
Moment d'inertie	4.5 Kg.m ²
Résistance du stator	R _s =1.66Ω
Résistance du rotor	R _r =2.74Ω
Inductance de fuites (stator- rotor)	$l = 11.4\mu H; (L_s = l + L_m)$ $(L_r = l + L_m)$
Inductance de magnétisation	
$L_m = -((1.56) \times (e^{-11}) \times (v^4)) + ((2.44) \times (e^{-8}) \times (v^3)) - ((1.19) \times (e^5) \times (v^2)) + ((1.42) \times (e^{-3}) \times v) + 0.245$	

Tab 5-1 : Les paramètres du système éolien [33].



V.4 Résultats de Simulation

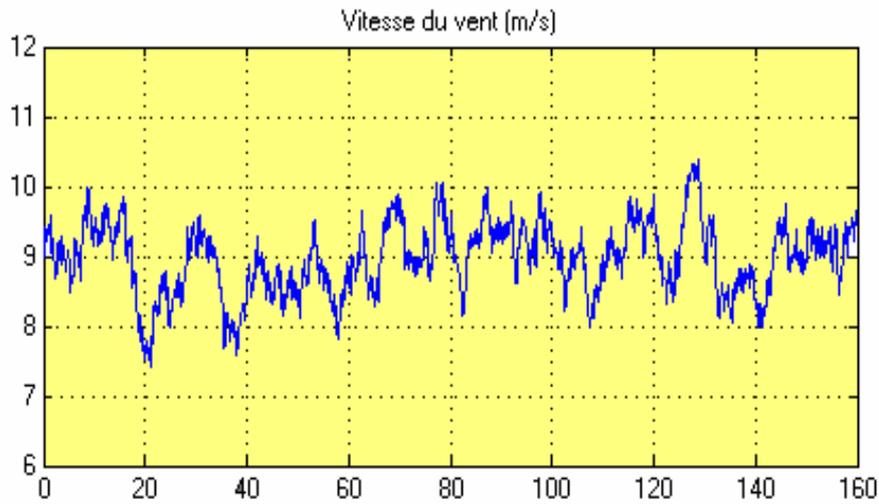


Figure (5-12) : Variation de la vitesse du vent.

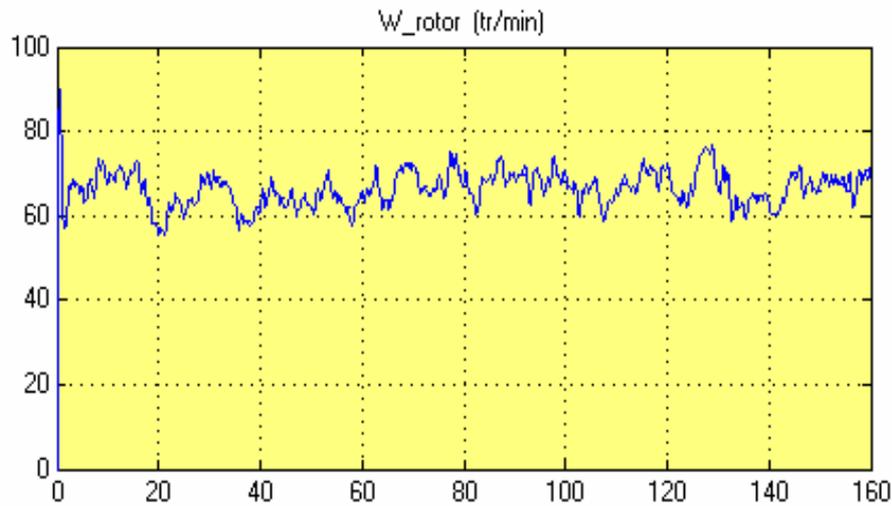


Figure (5-13) : Variation de la vitesse angulaire du rotor.

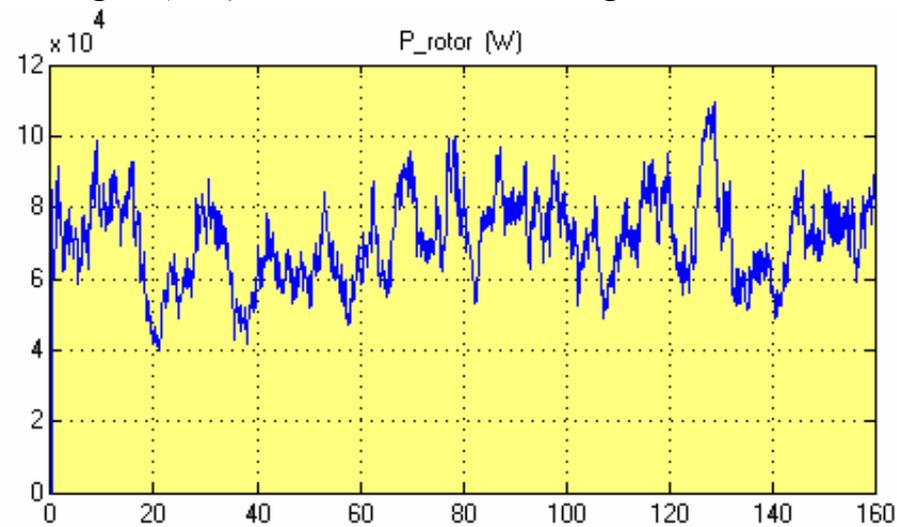


Figure (5-14) : Variation de la puissance aérodynamique maximum récupérée

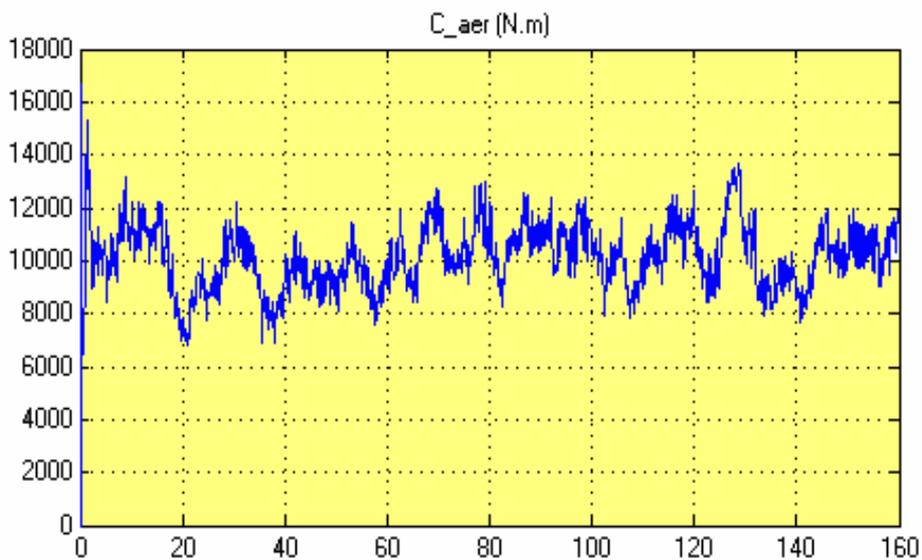


Figure (5-15) : Variation du couple aérodynamique

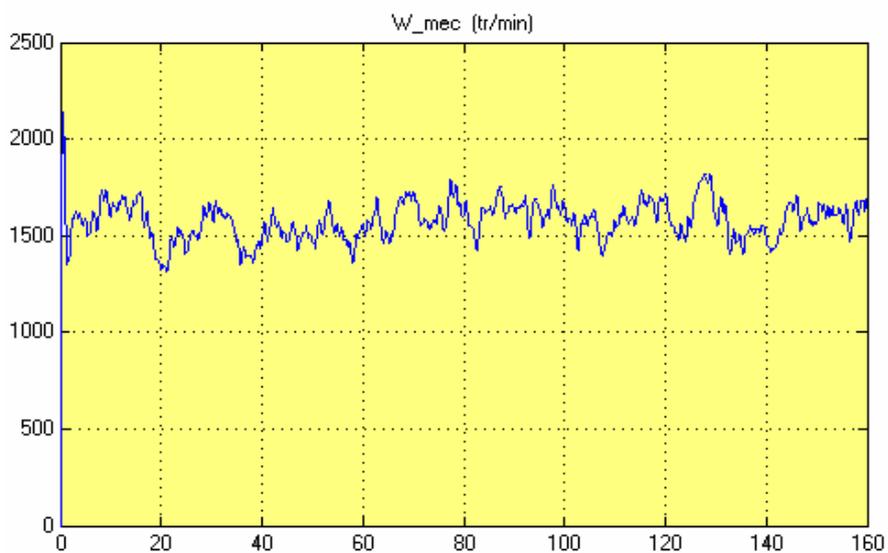


Figure (5-16) : Courbes de la vitesse angulaire de la génératrice

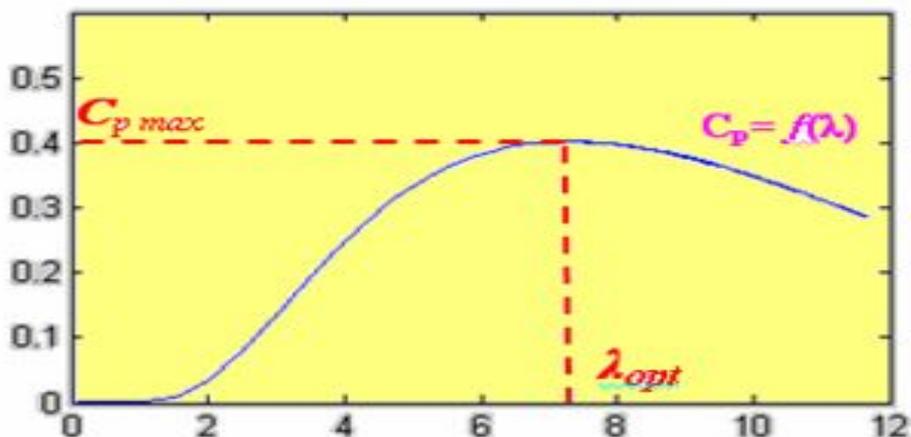


Figure (5-17) : Caractéristiques du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse λ

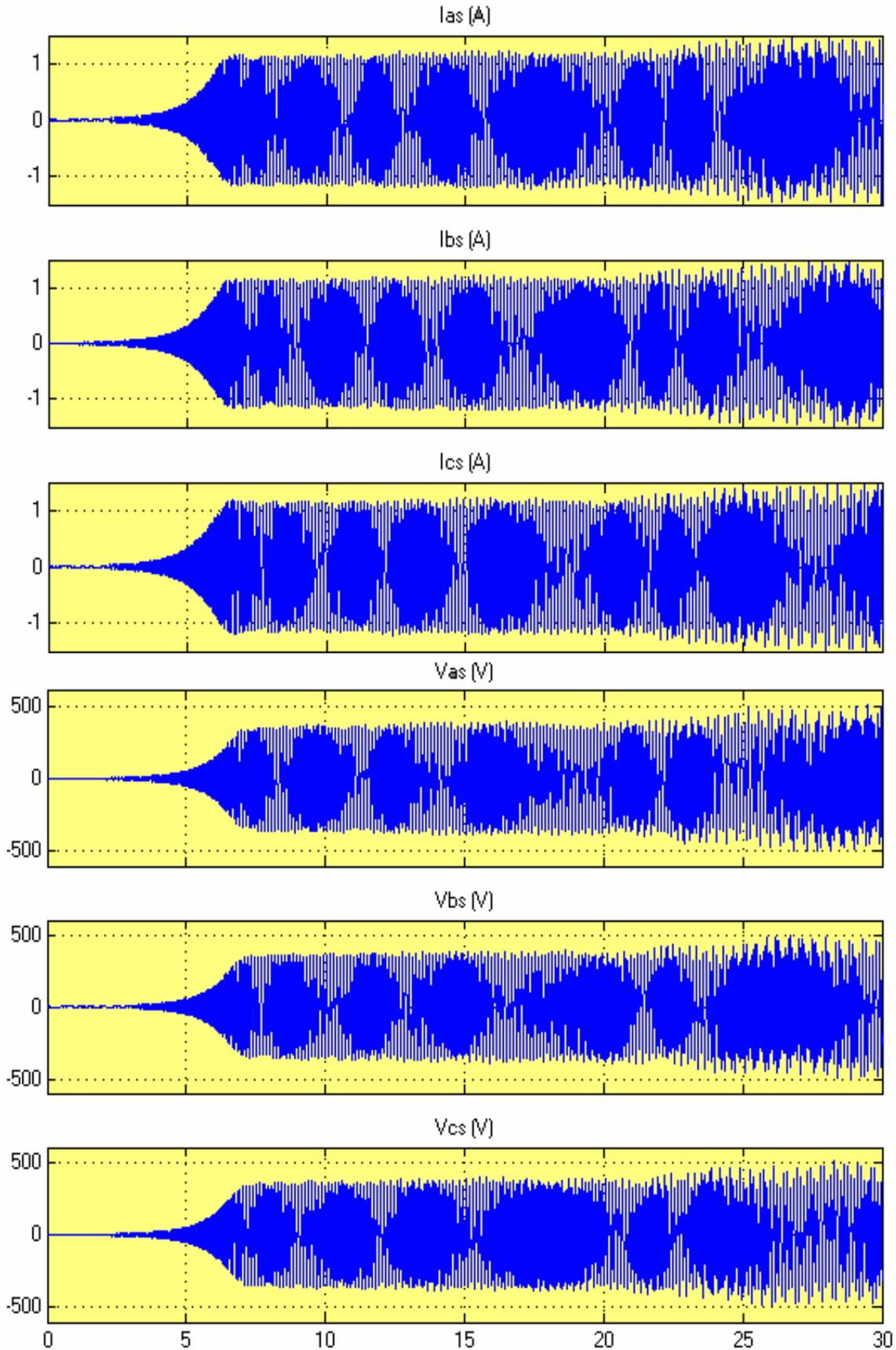


Figure (5-18) : Courbes des courants et tensions statoriques

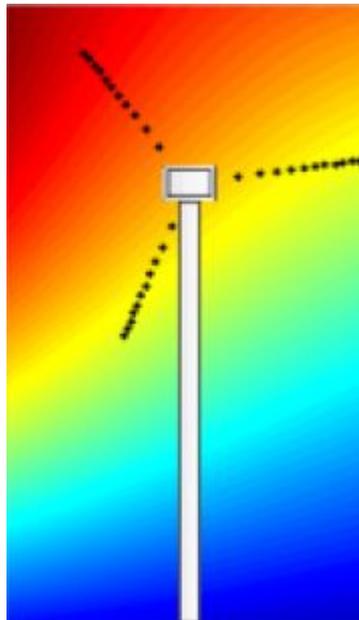


V.5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de décrire les étapes de modélisation d'une turbine éolienne. Dans un premier temps, nous avons établi un modèle permettant de reproduire des variations de la vitesse du vent en se basant sur un échantillonnage de la densité spectrale de puissance de vitesses mesurées sur un site. Ces variations de vent sont ensuite appliquées à un modèle de turbine utilisant les équations de base donnant le couple éolien en fonction de la densité de l'air, du coefficient de puissance de l'éolienne de la vitesse du vent et de la longueur d'une pale. La vitesse de rotation de l'éolienne, calculée en fonction de l'inertie et du coefficient de frottements visqueux, est alors imposée comme référence. Les résultats ont montré une bonne corrélation entre l'environnement *Matlab* et *Sumulink*. On note des amplitudes plus élevées en *Sumilink* en ce qui concerne les pointes de courant relatant les rafales de vent.



CONCLUSION GÉNÉRALE





Conclusion générale

Pour positionner notre thème, nous avons abordé le premier chapitre par une brève présentation des énergies renouvelables axée surtout sur l'énergie éolienne ainsi que les chaînes électrotechniques de conversion associées. Puis différentes associations de générateurs–convertisseur de puissance ont été examinées au deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous avons réalisé une modélisation originale de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil (*SEIG : Self Excited Induction Generator*) qui a permis de simuler son comportement en régime équilibré et saturé (la simulation du phénomène d'auto-excitation nécessite la prise en compte de saturation par une inductance magnétisante variable en fonction de la tension); les résultats obtenus ont été validés expérimentalement. Après, nous avons développé une étude analytique particulière de l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone en régime permanent à vide et en charge. Nous avons notamment montré que les grandeurs statoriques étaient directement influencées par la variation de la vitesse du rotor de l'éolienne, les capacités d'excitation et l'état de magnétisation initial ainsi que le type de charge connectée.

Quant au quatrième chapitre, dans ce dernier, nous avons développé un modèle unifié de la génératrice, il a porté sur la modélisation et l'analyse du deuxième type de générateur asynchrone double étoile GASDE : les résultats des différentes simulations sous Matlab ont permis de constater que les performances de la GASDE sont fortement influencées par la valeur des capacités d'excitation, la vitesse d'entraînement ainsi que le type de charge. Nous avons pu améliorer ces performances grâce à l'insertion des condensateurs de compensation en série ou en parallèle (résolution du problème de démagnétisation de la machine).

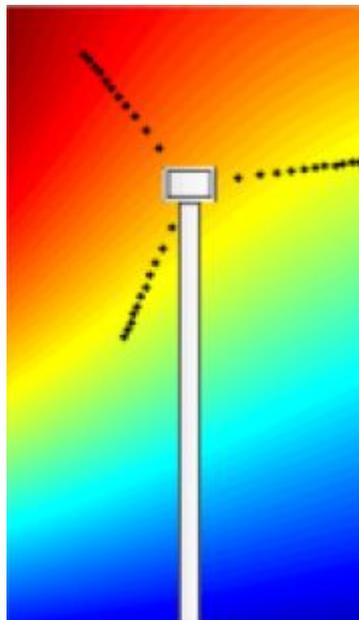
Enfin, au cinquième et dernier chapitre, nous avons réalisé la modélisation de tout l'aérogénérateur utilisant une génératrice auto-excitée destinée à alimenter un consommateur isolé. Ce modèle de simulation a été développé sous environnement *SUMULINK* à partir de données bibliographiques [33]. Les résultats de simulation obtenus à l'aide des deux logiciels (Matlab/Simulink) nous ont permis, en plus de la validation des deux modèles en mode générateur, de mettre en évidence le phénomène vibratoire du système éolien; nous avons tenu compte aussi dans l'analyse du comportement de l'éolienne de la variation continue et aléatoire du vent.

Suite à ces observations et résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de l'éolienne sont envisageables :

- Un premier point qui nous paraît intéressant concerne la réalisation d'une plateforme expérimentale permettant de tester en temps réel le comportement d'un générateur éolien à vitesse variable débitant sur différents types de charges et de valider les résultats des simulations présentées dans cette thèse.
- Il serait aussi intéressant de développer un système de commande de l'aérogénérateur qui adapte les variations de l'angle d'attaque de la pale (*pitch control*) aux variations du vent pour pouvoir contrôler la puissance générée.



REFERENCES





- [1] *A. MIRECKI* « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat à laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle de L'ENSEEIH, Université de Toulouse 5 Avril 2005.
- [2] *MOHAMMAD JAHANGIR KHAN* «Dynamic Modeling, Simulation and Control of a Small Wind-Fuel Cell Hybrid Energy System for Stand-Alone» Applications Seminar Faculty of Engineering & Applied Science Electrical Engineering.
- [3] Historique des éoliennes
<http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/index.htm>
- [4] *Bernard MULTON, Xavier ROBOAM, Brayima DAKYO, Cristian NICHITA, Olivier GERGAUD et Hamid BEN AHMED*. Aérogénérateurs électriques
- [5] L'énergie éolienne [http://www. Domsweb.org](http://www.Domsweb.org)
- [6] EDD (espace – éolien - développement) <http://www.espace – eolien.fr>
- [7] *Frédéric POITIERS* « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau) » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes 2003.
- [8] *Bernard MULTON* « Aérogénérateurs électriques » Master Recherche Equipe SETE Module C16. STS IST Paris – ENS Cachan 2007.
- [9] *PIERRE BOUCHER*, Le Vent et ses caprices (<http://www.Le Vent - Wind.com>).
- [10] *F. BATOUN*, Dimensionnement Et Etude Economique D'une Chaîne Eolienne, Unité de recherché appliquée en énergies renouvelables BP88 gharat ettaa, Ghardaïa Algérie.
- [11] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Vent>.
- [12] *Bernard MULTON, Olivier GERGAUD, Hamid BEN AHMED, Xavier ROBOAM, Stéphan ASTIER, Brayima DAKYO, Cristian NICHITA*. Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques, Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002
- [13] Machine asynchrone Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.
http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone.
- [14] *Olivier GERGAUD* « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » thèse de doctorat de l'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE de CACHAN 2002.
- [15] *M. DAHLGREN, H. FRANK, M. LEIJON, F. OWMAN, L. WALFRIDSSON*. Production à grande échelle d'électricité éolienne, Revue ABB n°3-2000.
- [16] [AWEA] American Wind Energy Association: <http://www.awea.org>.



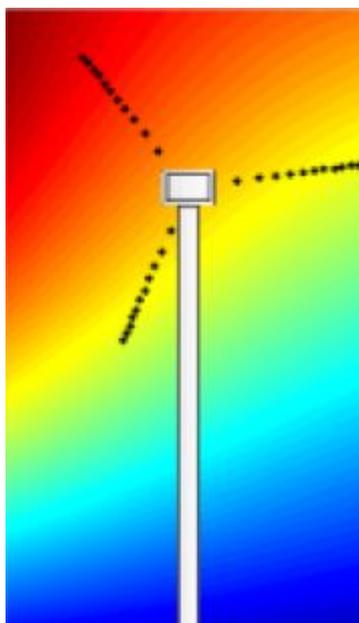
- [17] « Les techniques de commande du moteur asynchrone » le magazine schneider de l'enseignement technologique et professionnel Intersections - Juin 1998.
- [18] *L. BAGHLI* notes de cours « Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone » *IUFM de Lorraine – UHP université de HANRI POINCARÉ NANJI. (2003-2004)*
- [20] *Salma EL AIMANI* « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans le réseau de moyenne tension » Thèse de Doctorat préparée dans le laboratoire L2EP de l'Ecole Centrale de Lille 2004.
- [21] *Malek BOUHARKAT* « étude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone a cage en régime dynamique » thèse de Doctorat de l'Université de Batna 2006.
- [22] *Davide Aguglia* « Identification des paramètres du moteur a induction en vue de sa commande vectorielle » mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA en 2004.
- [23] *D. Seyoum, C. Grantham and F. Rahman* Analysis of an isolated self-excited induction generator driven by a variable speed prim mover School of Electrical Engineering and Telecommunications The University of New South Wales March, 2003.
- [24] *J. DOS GHALI et J.-P. LUDWIG*, ingénieurs EPFL, 1015 Lausanne « Générateurs et installations électriques (chap 5) » présentée par Programme d'action PACER – Energies renouvelables Office fédéral des questions conjoncturelles ISBN 3-905232-55-3 N° de commande 724.247.2 f 1995.
- [25] *T. GRIGNOUX, R. GIBERT, P. NEAU, C. BUTHION* « éoliennes en milieu urbain », Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies « Il-de-France » Actualisation janvier 2006 (P.SALVI).
- [26] *N. KASBADJI MERZOUK et M. MERZOUK* « Perspectives du pompage éolien en ALGERIE », Projet National de recherche, domicilié au CDER Alger 2008.
- [27] *PHILIPPE TERRIER* avec la collaboration de *CLAUD THÉORÉT*, ING « TCH-090-095 projet technologique étude d'un éolien » MONTRÉAL, 14 août 2006 révision juillet 2007.
- [28] *Elkheir Merabet* « Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile » Thèse de Magister en Electrotechnique Université de Batna (2008).
- [29] *Hocine AMIMEUR* « Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement » Thèse de Magister en Electrotechnique Université de Batna (2008).
- [30] *K.Zellagui et F.Saadi*, "Auto-amorçage d'une génératrice asynchrone triphasée". PFE DEUA, département d'électrotechnique, université Mentouri CONSTANTINE, juin2008.



-
- [31] *Abderrazak BENNADJI* « Implémentation de modèles comportementaux d'amplificateurs de puissance dans des environnements de simulation système et co-simulation circuit système » Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges 14 avril 2006.
- [32] *Nesmat ABU-TABAK* « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation » Thèse de Doctorat de l'école centrale de LYON 19 Novembre 2008.
- [33] *Sanae Rechka, Gilles Roy, Sébastien Dennetiere et Jean Mahseredjian* « modélisation de systèmes électromécaniques multi-masses à base de machines asynchrones, à l'aide des outils Matlab et EMTP, avec application aux éoliennes » Département de Génie Électrique, Section Énergie électrique École Polytechnique de Montréal EPM-RT-2004.
- [34] *MEKKAOUI Naïma* « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Éolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Mémoire de Magister Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Électromagnétiques LSP-IE Batna 2004.



ANNEXES





ANNEXE 01

A1-a Caractéristiques de la génératrice asynchrone à cage

Les résultats des simulations de la GAS sous **MATLAB** sont obtenus et validés avec ceux de la **Réf [23]** selon le tableau suivant :

Résistance d'enroulement statorique	$R_s = 1.66 \Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 2.74 \Omega$
Inductance de fuite (statorique/ rotorique)	$l_\sigma = 11,4 \text{ mH}$
Inductance de fuite mutuelle	$l_m = 0.245 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0.038 \text{ Kg.m}^2$
Fréquence nominale	$f = 50 \text{ Hz}$
Nombre de paires de pôles	$p = 2$
Vitesse nominale (synchronisme)	$n = 1500 \text{ tr/min}$
Capacité d'excitation	$C = 60 \mu F$
Capacité de compensation	$C_{ch} = 30 \mu F$
$L_m = -1,5 \cdot 6 \cdot 10^{-11} \cdot v^4 + 2,44 \cdot 10^{-8} \cdot v^3 - 1,19 \cdot 10^{-5} \cdot v^2 + 1,42 \cdot 10^{-3} \cdot v + 0,245$ $L_s = L_r = l_\sigma + L_m$ $R_{ch} = 55 \Omega$	



A1-b Caractéristiques de la génératrice asynchrone à double étoile

Les résultats de la GASDE obtenus sous *MATLAB* sont validés avec ceux de la **Réf [29]** selon le tableau suivant :

Résistance du premier enroulement statorique	$R_1 = 1.9 \Omega$
Résistance du deuxième enroulement statorique	$R_2 = 1.9 \Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 2.1 \Omega$
Inductance de fuite du premier enroulement statorique	$L_{l1} = 0.0132 H$
Inductance de fuite du deuxième enroulement statorique	$L_{l2} = 0.0132 H$
Inductance de fuite rotorique	$L_{lr} = 0.0132 H$
Inductance de fuite mutuelle	$L_{lm} = 0.011 H$
Inductance mutuelle	$l_m = 0.1406 H$
Moment d'inertie	$J = 0.038 Kg.m^2$
Capacité d'excitation	$C_1 = C_2 = 40 \mu F$
Capacité de compensation	$C_{s1} = C_{s2} = 6 \mu F$
Fréquence nominale	$f = 50 Hz$
Nombre de paires de pôles (stator)	$p_1 = 4$
Nombre de paires de pôles (rotor)	$p_2 = 2$
Vitesse nominale (synchronisme)	$n_s = 1500 tr/min$
Pulsation rotorique	$\omega_r = 157.5 rd/s$
$L_m = 0,1406 + 0,0014 I_m - 0,0012 I_m^2 + 0,00005 I_m^3$ $R_{ch1} = R_{ch2} = 200 \Omega$	

ANNEXE 02

A2-a Identification des paramètres de la GAS

Afin de comparer les résultats du modèle de la machine asynchrone à cage avec ceux obtenus expérimentalement, nous avons été amenés à effectuer plusieurs essais sur une machine Leroy-Somer de 3kW disponible au laboratoire afin d'identifier ses paramètres. Ceux-ci correspondent aux éléments du schéma équivalent de la machine asynchrone (*Fig A2-1*) et sont indispensables à la modélisation du système.

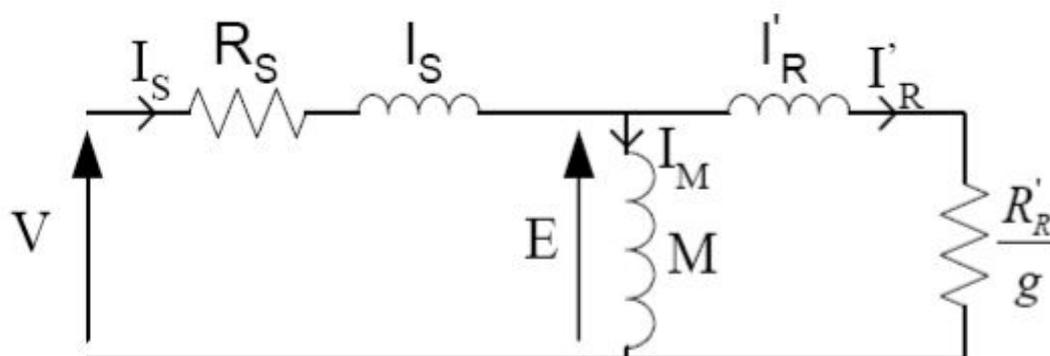


Figure (A2-1) : Schéma équivalent par phase de la machine asynchrone à cage [7].

Les essais réalisés afin d'identifier chacun des éléments sont décrits ci-dessous.

- **Résistance statorique R_s :**

La résistance d'une phase statorique est mesurée à chaud en courant continu par une méthode volt-ampèremétrique. La procédure est réalisée sur les trois phases et une moyenne est effectuée.

- **Inductances de fuites l_s et l_r :**

La somme N des inductances de fuites statorique et rotorique ainsi que la résistance d'une phase rotorique R'_r est mesurée grâce à un essai à rotor bloqué. Celui-ci permet d'obtenir un glissement unitaire et une valeur de courant magnétisant négligeable due à la faible tension aux bornes de l_m . Le schéma équivalent associé à cet essai est représenté sur la (*Fig A2-2*). La machine est alimentée sous tension triphasée réduite et variable. Soient P_{1b} la puissance absorbée par la machine durant cet essai, I_{1b} le courant dans une des phases, V_{1b} la tension aux bornes d'une phase et ω_s la pulsation statorique, nous pouvons écrire :

$$R_s + R'_r = \frac{P_{1b}}{3I_{1b}^2} \Rightarrow R'_r = \frac{P_{1b}}{3I_{1b}^2} - R_s$$

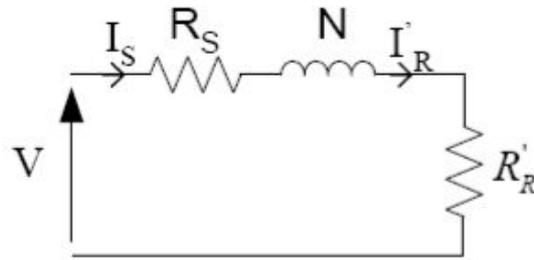


Figure (A2-2): Schéma équivalent associé à l'essai à rotor bloqué [7].

D'après la (Fig A2-2) : $V_{1b} = Z \cdot I_{1b} \Rightarrow Z = \frac{V_{1b}}{I_{1b}}$

Nous pouvons également écrire :

$$\sqrt{(R_s + R'_r)^2 + N^2 \omega^2} = \frac{V_{1b}}{I_{1b}}$$

Soit :

$$N = \frac{\sqrt{\frac{V_{1b}}{I_{1b}} - (R_s + R'_r)^2}}{\omega}$$

La méthode utilisée ne permet pas de séparer le résultat obtenu en fuites statoriques et fuites rotoriques. Ces fuites seront par conséquent considérées comme égales :

$$L_s = L'_r = \frac{N}{2}$$

- **Inductance magnétisante L_m :**

Dans cet essai, les trois phases sont alimentées sous tensions triphasées variables et la machine est maintenue à la vitesse de synchronisme (1500 tr/min) par une machine annexe. Le glissement est alors nul et la chute de tension dans R_s et l_s est faible. Le schéma équivalent associé à cet essai est alors représenté sur la (Fig A2-3).

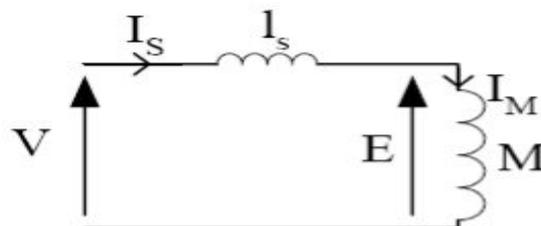


Figure (A2-3) : Schéma équivalent associé à l'essai au synchronisme [7].



Soient V_{1v} , la tension imposée à une phase de la machine, I_{1v} , le courant et ω_s la pulsation de ces grandeurs. La valeur de M est donnée par :

$$L_m = \frac{V_{1v}}{\omega_s I_{1v}}$$

- **Coefficient de frottements visqueux :**

Le coefficient de frottements visqueux K mesuré est dans notre essai est celui de la machine asynchrone accouplée à une machine à courant continu. Cette dernière entraînant l'ensemble, elle est alimentée sous tension variable. La puissance P_{mcc} et le courant I_{mcc} qu'elle absorbe sont mesurés ainsi que sa vitesse de rotation Ω_{mcc} . On peut alors écrire :

$$\frac{P_0}{\Omega_{mcc}} = \frac{P_{mcc} - R_a I_{mcc}^2}{\Omega_{mcc}} = \Gamma_s + K \Omega_{mcc}$$

Avec :

P_0 : puissance due aux pertes par frottements visqueux et Γ_s : couple de frottements secs et R_a : résistance de l'induit de la machine à courant continu. On obtient alors la caractéristique.

$$\frac{P_0}{\Omega_{mcc}} = K \cdot \Omega_{mcc}$$

qui est une droite de pente K .

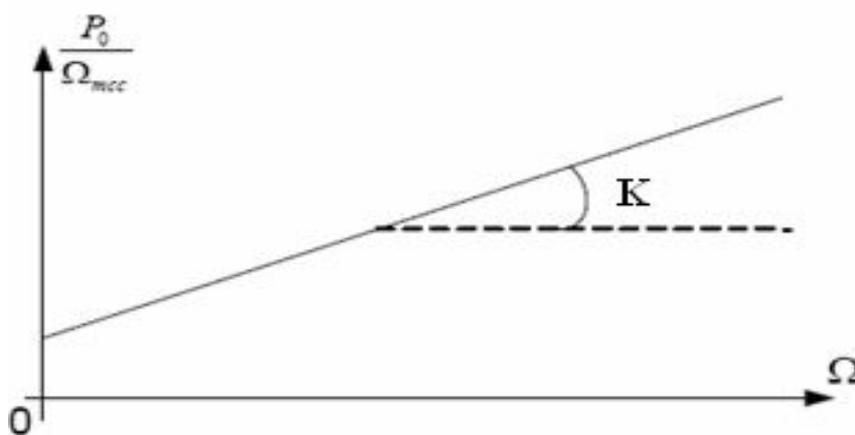


Figure (A2-4): Détermination du coefficient de frottements visqueux [7]

- **Moment d'inertie :**

Le moment d'inertie mesuré est en fait celui de la machine asynchrone à l'étude accouplée à une machine à courant continu qui servira de moteur d'entraînement pour les essais. L'ensemble est

entraîné à vide à sa vitesse nominale Ω_0 , L'alimentation est alors brusquement coupée et la variation de vitesse $\Omega(t)$ est relevée. Dans ces conditions, l'équation mécanique s'écrit :

$$K\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

La caractéristique obtenue est alors une exponentielle décroissante dont la constante de temps est égale au quotient J/K (Fig A2-5).

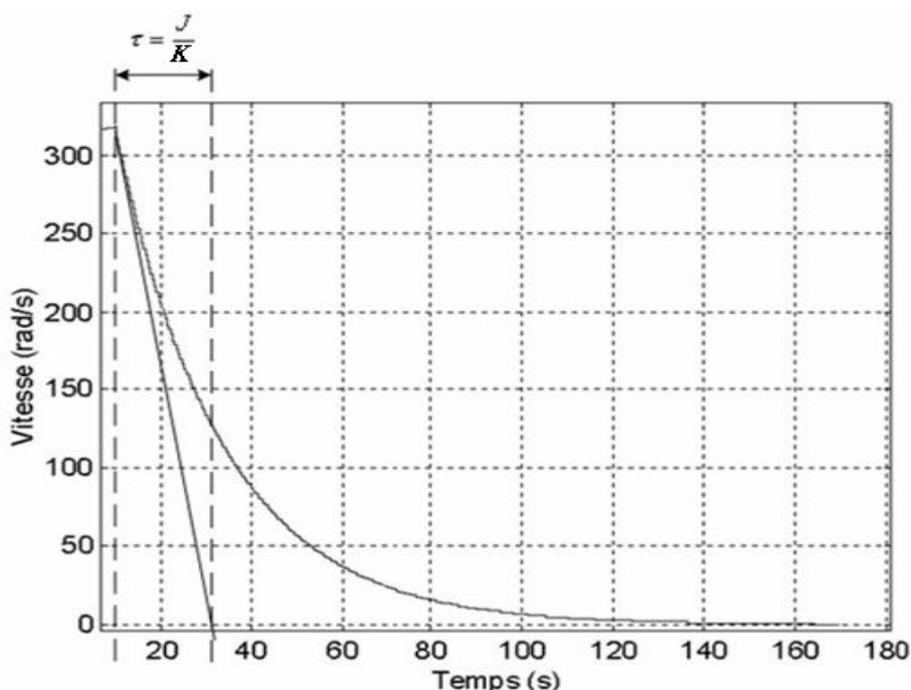


Figure (A2-5): Courbe de ralentissement d'une machine asynchrone [7].

A2-b Identification des paramètres de la machine à courant continu

La machine est à excitation série et nous avons procédé à l'identification de ses paramètres selon le schéma de la (Fig A2-6).

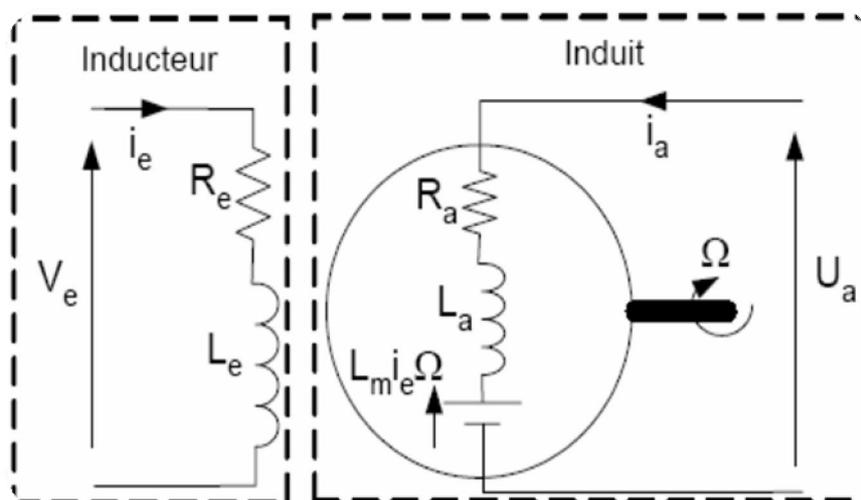


Figure (A2-6): Modèle de la machine à courant continu [7].

Les équations régissant le fonctionnement de la machine à courant continu sont les suivantes :

$$U_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + L_m i_e \Omega$$

$$\Gamma_{em} = \Gamma_r + K_{mcc} \Omega + J_{mcc} \frac{d\Omega}{dt}$$

$$\Gamma_{em} = S_c i_a \quad ; S_e = L_m i_e \quad ; S_c = S_e$$

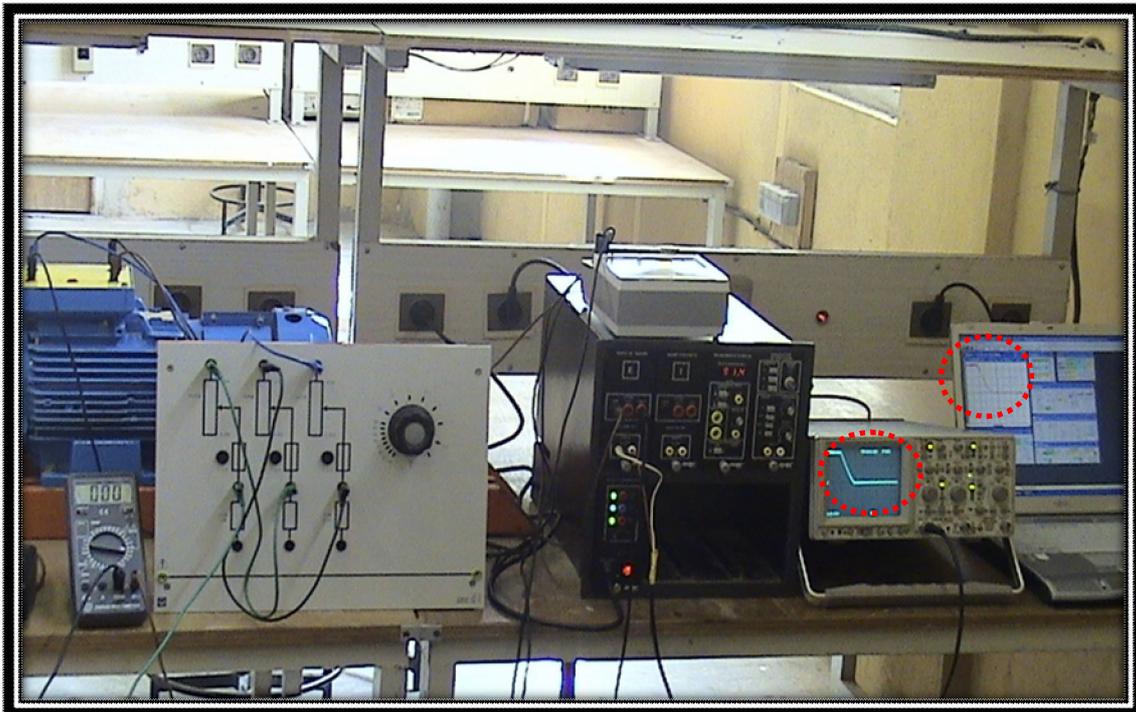
Avec :

Γ_{em} , couple électromagnétique, L_m , inductance mutuelle inducteur-induit, S_c et S_e , constantes de couple et de fem, Γ_r couple résistant imposé à la machine K_{mcc} et J_{mcc} coefficient de frottements visqueux et moment d'inertie de la machine, (ces deux grandeurs sont identifiées selon la même méthode que celle utilisée pour la machine asynchrone à cage, à savoir : caractéristique

$$\frac{P_0}{\Omega_{mcc}} = K \cdot \Omega_{mcc} \quad \text{Et courbe de ralentissement.}$$

L'identification de la résistance de l'induit R_a est réalisée à chaud par une méthode volt-ampèremétrique également comme la résistance d'une phase statorique de la machine à cage. D'après le travail établi dans le **Ref [30]**, Les résultats suivants ont été obtenus :

Courbe de freinage de la MAS+MCC :





Temps de freinage : $\Delta T f_1 = 6.25s \Rightarrow \left(\frac{d\Omega}{dt} \right) = 25.53 \text{ s}$

Moment d'inertie J_{MCC} : $J_{MCC} \Omega_0 \left(\frac{d\Omega}{dt} \right) = P_{frot_{MCC}} \Rightarrow J_{MCC} = 0.00748 \text{ kg m}^2$

Coefficient de frottement de la Mcc : $K_{MCC} = \frac{J_{MCC}}{\Delta T \cdot f_1} \Rightarrow f_{MCC} = 0.0012$

Pertes de frottement du groupe MAS+MCC : $\Delta P_{frot} = (P_G - P_M) = (130 - 100) \Rightarrow \Delta P_{frot} = 30W$

Résistance statorique mesurée : $R_s = 1.273 \Omega$.

Résistance rotorique mesurée : $R_r = 1.260 \Omega$.

Inductance propre statorique : $L_s = 0.234 \text{ H}$.

Inductance propre rotorique : $L_r = 0.094 \text{ H}$.

Inductance propre rotorique ramenée côté stator : $L'_r = 0.240 \text{ H}$.

Rapport de transformation : $m = 1.6$.

Inductance mutuelle stator-rotor : $M_{sr} = 0.114 \text{ H}$.

Inductance magnétisante : $L_m = M_{sr} \cdot m = 0.182 \text{ H}$.

ANNEXE 03

Banc d'essai

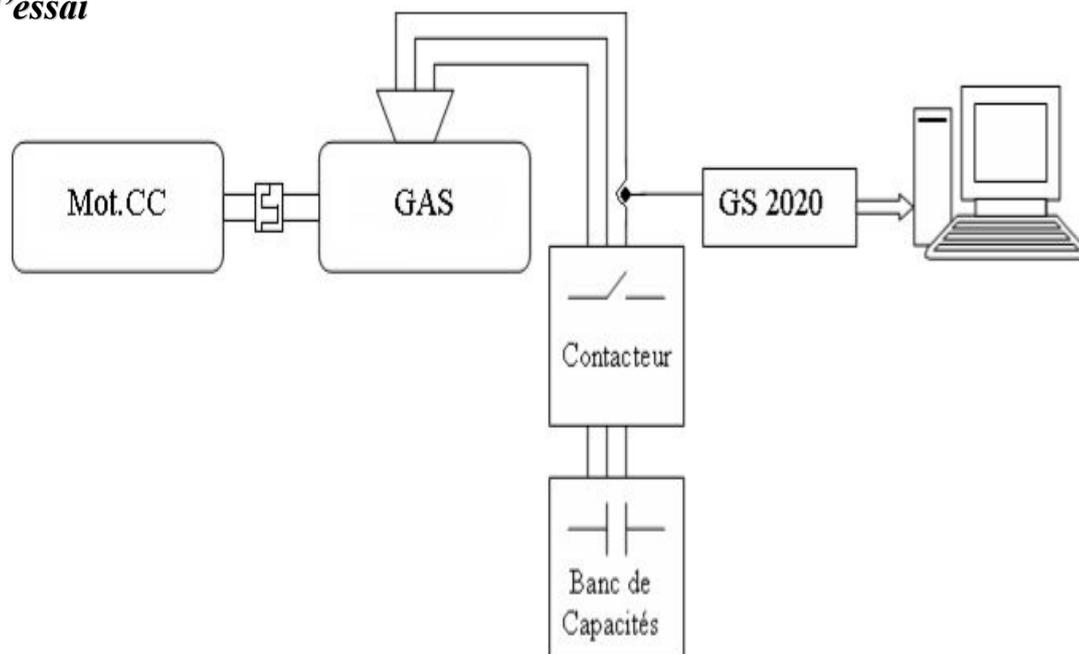


Figure (A3-1) : Schéma général du banc d'essai expérimental

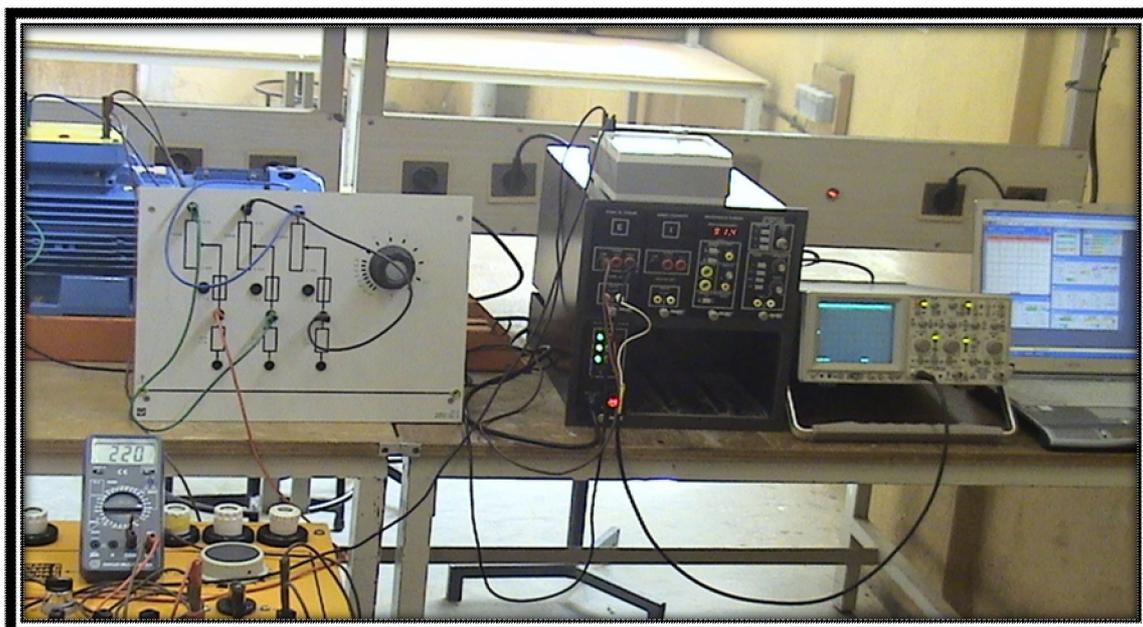


Figure (A3-2): Photographie du banc d'essai.



Nous avons vérifié la validité de ces résultats en les plaçant dans le programme *MATLAB* utilisé précédemment pour simuler les différents paramètres de sortie tel que la tension, le courant, Les figures suivantes (*Fig A3-3*) et (*Fig A3-4*) représentent les résultats obtenus par cette simulation.

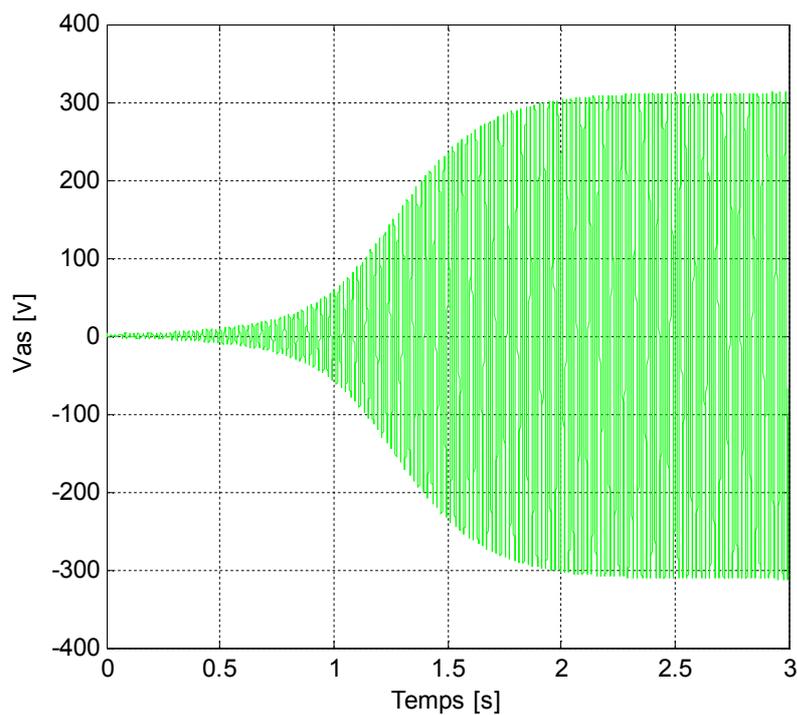


Figure (A3-3): Simulation MATLAB de la tension avec les caractéristiques expérimentales

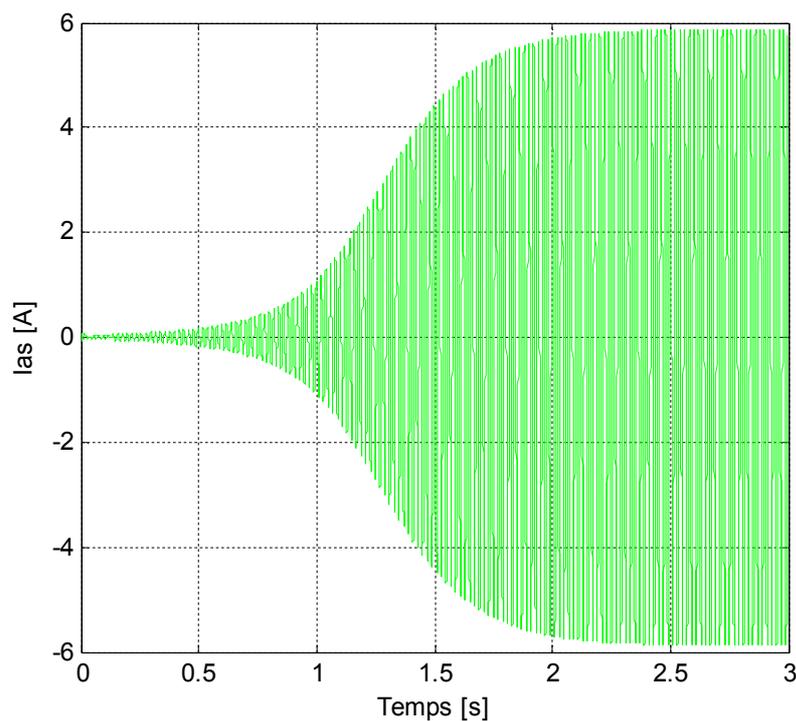


Figure (A3-4): Simulation MATLAB du courant avec les caractéristiques expérimentales.

Pour la génératrice qui tourne à vide, nous avons pu obtenir un auto-amorçage à partir d'essais effectués dans *Ref [30]*.

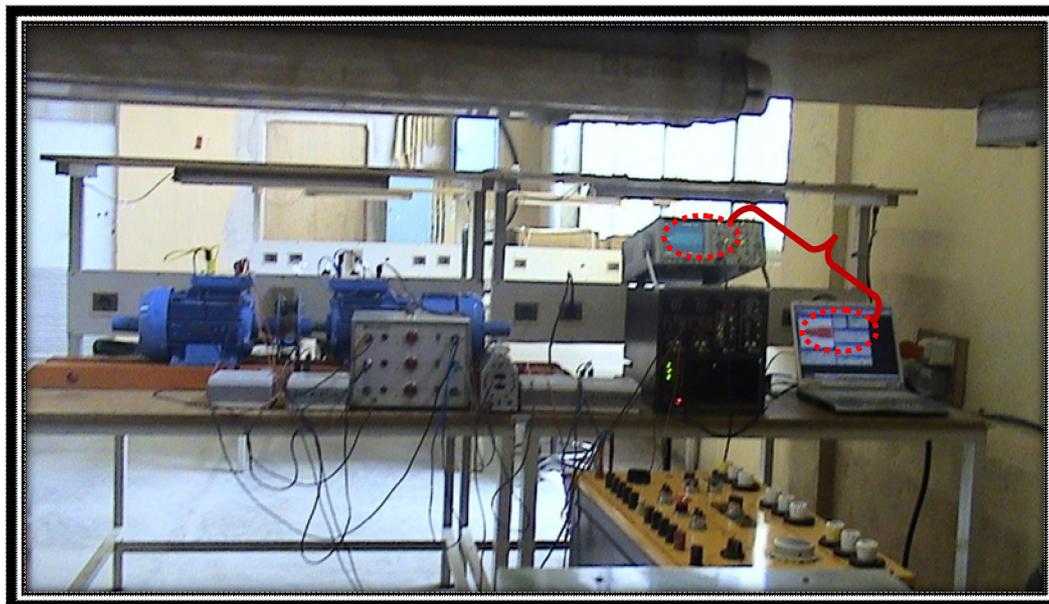


Figure (A3-5): Photographie de l'ensemble MAS-MCC.

La tension statorique lors de l'auto-amorçage a été enregistrée dans la (Fig A3-5) :

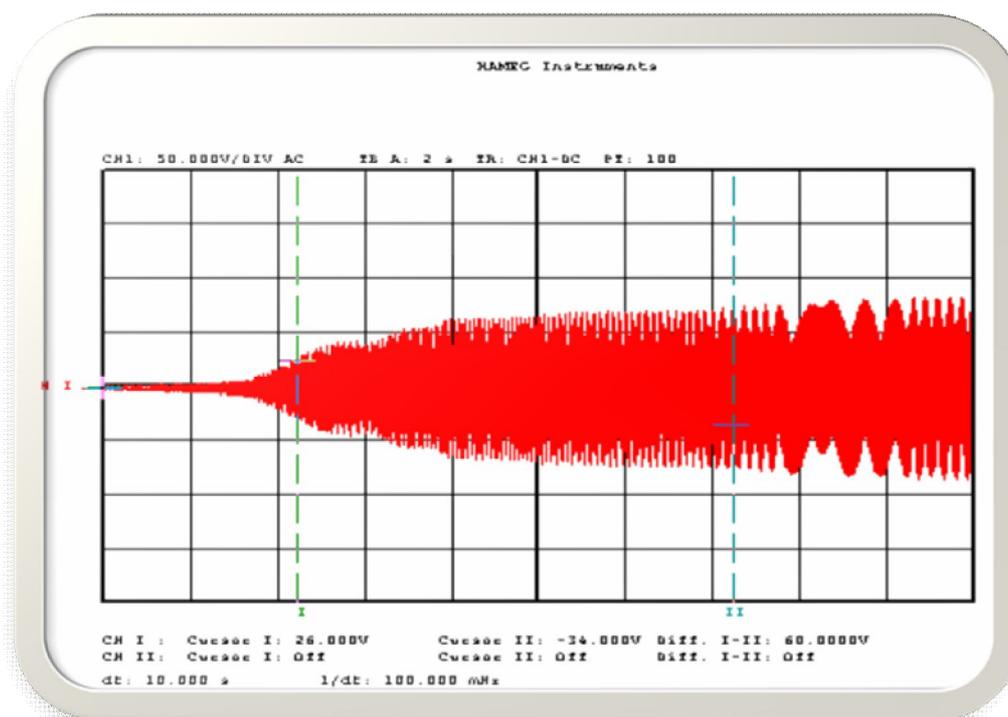


Figure (A3-6): Résultat expérimentale de l'auto amorçage d'une génératrice asynchrone à vide [30].

ملخص:

الأعمال المنجزة في هذه المذكرة تتعلق أساسا على النمذجة والمحاكاة لسلسلة توليد الكهرباء بالطاقة الهوائية باستعمال المحركات ذات الحث البسيطة و استخدامها كمولد من اجل استعماله في المناطق النائية، و دراسة تأثير كل حمولة من الحمولات الأربعة الممكنة، كما أن مغنطة هذا المولد تتم تلقائيا عن طريق مكثفات. و قد قمنا بمحاكاة ثانية لمولد لا تزامني ذاتي الحث من نوع ثنائي النجمة، وقد تم وضع نموذج رياضي للمولد ، نتائج المحاكات أوضحت أن وصل الحمل بمكثفات إما على التوازي أو التسلسل تمكنا من الحفاظ على قيمة الجهد ثابتة. ولتأكيد النتائج المحصل عليها باستعمال برنامج الماتلاب قمنا بإنشاء نموذج للنظام (توربين هوائي + مولد لاتزامني) باستعمال برنامج السيميلينك.

الكلمات المفتاحية:

الطاقة الهوائية - مولد لاتزامني - ذاتي الحث - الحالة المعزولة - النجمة المزدوجة - إنشاء نموذج - التوربين الهوائي.

Abstract

In our memory, we are essentially interested by the modeling and the simulation of a small wind power station using a self excited induction generator (IG) in isolated mode or a double star IG.

The simulations of the two generators under MATLAB software are analyzed (effect of the parameters of self-excitation and the type of load).

We conclude this work by the modeling and the simulation of the wind turbine and asynchronous generator under *SIMULINK*.

Key words:

Wind Power – Asynchronous – Self Excited – Mode Isolated – Double Star – Modeling – Wind Turbine.

Résumé

Dans cette thèse, nous nous sommes particulièrement intéressés à la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne utilisant soit une génératrice asynchrone GAS auto excitée travaillant en mode isolé (non connectée au réseau), soit une génératrice asynchrone double étoile GASDE travaillant dans les mêmes conditions.

Les résultats des différentes simulations sous MATLAB ont été analysés (influence des paramètres d'auto-amorçage et du type de charge) pour les 2 machines et ont permis d'aboutir à d'intéressantes conclusions pour le bon fonctionnement de la chaîne énergétique.

Nous avons finalisé ce travail par une modélisation de la turbine éolienne associée à la génératrice asynchrone à cage et une simulation de l'ensemble sous *SIMULINK* ;

Mots clés :

Éolienne - Génératrice Asynchrone - Auto Excité - Autonome - Double Etoile - Modélisation – Simulation - Matlab/Simulink.