



Université Hadj Lakhdar de Batna



Faculté de Technologie
Département d'électrotechnique

THESE

DOCTORAT EN SCIENCES

En Electrotechnique

Option : Maîtrise des Energies

Présentée par

ABDELHAMID LILIA

Magister en Electrotechnique de l'Université de Batna
Ingénieur d'Etat en Electrotechnique Université de Batna

Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement

Thèse soutenue le : 26/04/2012 devant le jury :

GUETTAFI Amor	Président	Professeur	Univ. Batna
BAHMED Lylia	Rapporteur	Professeur	Univ. Batna
BENOUDJIT Azzeddine	Co-Rapporteur	Professeur	Univ. Batna
SRAIRI Kamel	Examineur	Professeur	Univ. Biskra
BENALLA Hocine	Examineur	Professeur	Univ. Constantine
KHATIR Youcef	Examineur	Professeur	Univ. Oran
ABDESSEMED Rachid	Invité	Professeur	Univ. Batna

Remerciements & Dédicaces

Je tiens à remercier Mme Bahmed Lylia d'avoir accepté la direction scientifique de ces travaux de recherche, je lui exprime par la présente toute ma gratitude, pour son expérience, sa compétence, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines.

Je remercie également Mr Benoudjit Azeddine pour avoir bien voulu co-encadrer ce travail ainsi que pour son soutien.

Je n'oublie pas de présenter mes remerciements les plus sincères aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont apporté à mes travaux.

J'adresse mes sincères remerciements pour Mr Abdessemed Rachid, qui a été toujours présent pour m'orienter, m'apprendre et me diriger.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de mes professeurs tout le long de ces années d'études.

Je remercie, tout particulièrement, mon époux, pour son soutien moral et son encouragement tout au long de mon cursus.

Je tiens à dédier ce modeste travail à :

Mes enfants : IMENE, IKRAM ET AHMED WALID

La mémoire de mes parents

Sommaire

Sommaire	i
Liste des figures	I
Liste des symboles	i
Introduction générale	1
1 Impact des énergies renouvelables sur l'environnement.	6
1.1 Introduction	6
1.2 Energies renouvelables, définitions, ressources et exploitation	7
1.2.1 Le solaire thermique et photovoltaïque	8
1.2.2 La géothermie	9
1.2.3 La biomasse	9
1.2.4 L'hydraulique	10
1.2.5 L'éolien	11
1.3 Etat de l'art de l'éolien	11
1.3.1 L'historique de l'éolien	11
1.4 Aspect environnemental du développement durable.	16
1.4.1 Qu'est un gaz à effet de serre ?	16
1.4.2 Bilan environnemental	19
1.4.3 Taux d'équivalence entre les consommations énergétiques à partir des combustibles et les émissions de CO ₂ .	20
1.4.4 Evaluation des émissions de CO ₂ liées au secteur électrique.	21
1.4.5 Les émissions de CO ₂ dans le monde.	22
1.4.6 Les émissions de CO ₂ en Algérie.	23
1.5 Introduction des ER en Algérie et Changement Politique.	24
1.5.1 Description du Projet de la centrale hybride de Hassi-r'mel.	26
1.5.2 Description Du Procédé.	26
1.6 Comparaison de la centrale hybride de hassi-R'mel avec la centrale conventionnelle de Tilghemt.	29

1.6.1	Présentation de la station de Tilghemt	29
1.6.2	Calcul des quantités de CO ₂ émises par les deux centrales électriques	30
1.6.3	L'évaluation des quantités de CO ₂ émises par la centrale électrique hybride.	31
1.6.3. a	Marche " jour ".....	31
1.6.3. b	Marche "nuit ".....	36
1.6.3. c	Bilan global (24h).	38
1.6.4	L'évaluation des quantités de CO ₂ émises par la centrale conventionnelle de Tilghemt	38
1.6.4. a	Calcul des écarts	40
1.6.4. b	Evaluation technico économique	40
1.7	Conclusion.	43
2.	Etude et évaluation des aspects environnementaux des deux stations	44
2.1	Introduction.	44
2.2	Identification des aspects environnementaux de la station hybride	44
2.2.1	Interprétation	46
2.3	Evaluation des aspects environnementaux	53
2.3.1	Interprétation	62
2.4	Etude des aspects environnementaux de la centrale de (Tilghemt).	62
2.4.1	Identification des aspects environnementaux de la station conventionnelle	62
2.4.2	Interprétation	67
2.4.3	Evaluation des aspects environnementaux de la centrale conventionnelle.	67
2.5	Interprétation	72
2.6	Conclusion.	72
3.	Les Génératrices les plus utilisées dans les systèmes éoliens.	
3.1	Introduction.	73
3.2	Éléments constitutifs d'une éolienne	73

3.3	Principe et théorie d'une éolienne	75
3.4	Etude des génératrices asynchrones à cage	78
3.4.1	Modèle biphasé de la GAS dans le référentiel généralisé	78
3.4.2	Modèle biphasé de la GAS lié au stator	79
3.4.3	Mise du modèle biphasé sous forme d'état	81
3.5	Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel généralisé. . .	83
3.5.1	Modèle biphasé de la GADA dans le référentiel de Park généralisé	83
3.5.2	Modèle biphasé de la GADA lié au champ tournant	87
3.5.3	Mise du modèle biphasé sous forme d'état	88
3.5.4	Expressions du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique	89
3.6	Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents. . . .	89
3.6.1	Modèle mathématique de la GSAP dans le référentiel Généralisé	90
3.6.2	Modèle biphasé de la GSAP dans le référentiel généralisé	90
3.6.3	Modèle biphasé de la GSAP lié au rotor	93
3.6.4	Mise du modèle biphasé sous forme d'état	94
3.6.5	Expressions du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique	94
3.7	Différents types de turbines	95
3.8	Commande de la puissance d'une éolienne	96
3.9	Intérêt de la vitesse variable	98
3.10	Conclusion.	99
4.	Commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur la GAS	
	Pilotée par le stator	100
4.1	Introduction	100
4.2	Description du système étudié.	101
4.3	Modélisation du système éolien.	101
4.3.1	Modélisation et principes de contrôle de la turbine.	101
4.3.2	Modélisation de l'onduleur de tension	105
4.3.3	Modélisation de la machine asynchrone à cage	107

4.3.3.1	Modèle triphasé de la MAS	107
4.3.3.2	Transformation de park	110
4.3.3.3	Modele biphasé de la MAS lié au champ tournant	111
4.4	Commande par mode de glissement	112
4.4.1	Principe de la commande par mode de glissement	112
4.4.2	Conception de l'algorithme de commande par mode de glissement	113
4.4.2.1	Choix des surfaces de glissement	113
4.4.2.2	Conditions d'existence et de convergence du régime glissant . .	114
4.4.2.3	Détermination de la loi de commande	115
4.4.3	Orientation du flux rotorique	119
4.4.4	Surface de régulation de la vitesse	122
4.4.5	Surface de régulation du flux rotorique	123
4.4.6	Surface de régulation des courants statoriques	124
4.5	Contrôle de la liaison au réseau	126
4.6	Dimensionnement du bus continu	129
4.7	Résultats et interprétations	129
4.8	Conclusion	136
Conclusion générale		137
Annexes		141
Bibliographie		146

Liste des figures

1.1.	Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions	12
1.2.	Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde	12
1.3.	Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie.	14
1.4.	Emission de CO ₂ dans le monde : Indice base 100 en 1990 [AIE].	22
1.5.	Emissions de CO ₂ par habitant [AIE].	23
1.6.	Émissions de CO ₂ en milliers de tonnes métriques.	24
1.7.	Schéma simplifié du procédé de la centrale thermo-solaire à cycle combiné intégré.	27
2.1.	Identification des impacts de la station hybride sur l'environnement.	45
2.2.	Identification des aspects environnementaux de la station hybride durant l'exploitation.	52
2.3.	Grille d'évaluation.	54
2.4.	Tableau représentatif des marques de significativité attribuées à chaque aspect environnemental de la station hybride.	61
2.5.	Identification des aspects environnementaux de la station conventionnelle	66
2.6.	représentatif des marques de significativité attribuées à chaque aspect environnemental de la station conventionnelle.	71
3.1.	Différents éléments constitutifs d'une éolienne [Mul02].	74
3.2.	Tube de courant d'air autour d'un aérogénérateur.	76
3.3.	Coefficient de puissance.	77
3.4.	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [Poi03].	77
3.5.	Schéma équivalent de la GAS dans le référentiel de Park généralisé.	78
3.6.	Disposition des enroulements de la GADA selon les axes réels et fictifs.	84
3.7.	Schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park généralisé.	86
3.8.	Schéma représentatif de la GSAP.	90
3.9.	Représentation schématique des enroulements de la GSAP selon (u, v)	92
3.10.	Caractéristique de la puissance en fonction de la vitesse du vent [Abd07].	97
3.11.	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et de la vitesse du vent [Khe07].	98
4.1.	Schéma global du système étudié	101
4.2.	Coefficient de puissance(C_p) en fonction du rapport de vitesse (λ).	102
4.3.	Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine	104
4.4.	Schéma bloc fonctionnel avec régulation de la vitesse	105
4.5.	Onduleur triphasé à deux niveaux	106
4.6.	Représentation schématique des enroulements de la MAS	108
4.7.	Mode de fonctionnement dans le plan de phase	113
4.8.	Fonction sign (non linéarité tout ou rien)	117
4.9.	Phénomène de broutement	118
4.10.	Fonction de saturation	118

4.11.	Fonction de classe C^1 ($\epsilon < 0$ et petit).	119
4.12.	Schéma bloc de la commande par mode de glissement associée à la commande vectorielle rotorique orienté de la GAS.	126
4.13.	Schéma bloc représentatif du contrôle de la liaison au réseau	128
4.14.	Vitesse mécanique de la GAS.	131
4.15.	Puissance mécanique de la turbine.	131
4.16.	Couple électromagnétique.	131
4.17.	Flux direct et quadratique rotoriques.	132
4.18.	Tension et courant statoriques.	132
4.19.	Zoom de la tension et du courant statoriques.	132
4.20.	Courant rotorique.	133
4.21.	Puissances active et réactive statoriques.	133
4.22.	Tension du bus continu.	133
4.23.	Zoom de la tension du bus continu.	134
4.24.	Tension et courant avant le filtre.	134
4.25.	Zoom de la tension et du courant avant le filtre.	134
4.26.	Tension et courant côté réseau.	135
4.27.	Zoom de la tension et du courant côté réseau.	135
4.28.	Puissances active et réactive côté réseau.	135

Liste des symboles

C	capacité du bus continu
C_{aer}	couple aérodynamique de la turbine
C_{arb}	couple sur l'arbre issue du multiplicateur
C_{em}	couple électromagnétique
C_{mec}	couple mécanique total
C_p	coefficient de puissance
C_{visq}	couple des frottements visqueux
$e(x)$	écart de la variable x à réguler
f	coefficient de frottement visqueux de la MAS
f_s	fréquence du réseau
GAS	génératrice asynchrone à cage
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	courants instantanées des phases statoriques
i_{ar}, i_{br}, i_{cr}	courants instantanées des phases rotoriques
i_{dr}, i_{qr}	courants rotoriques instantanés dans les axes d et q
i_{ds}, i_{qs}	courants statoriques instantanés dans les axes d et q
i_{fd}, i_{fq}	composantes directe et quadratique du courant dans le filtre
i_{mac}	courant fourni par la génératrice et modulé par le convertisseur MLI1
i_{res}	courant modulé par le convertisseur MLI2
$[i_S], [i_R]$	vecteurs des courants des phases statoriques et rotoriques
J	moment d'inertie de l'aérogénérateur ramène sur l'arbre de la GAS
J_g	moment d'inertie de la GAS
$J_{turbine}$	moment d'inertie de la turbine

K	gain du multiplicateur
L_f	inductance du filtre
L_m	inductance mutuelle de la MAS
L_r	inductance propre d'une phase rotorique
L_s	inductance propre d'une phase statorique
MAS	machine asynchrone à cage
MLI	modulation de largeur d'impulsions
M_r	inductance mutuelle entre deux phases rotoriques
M_s	inductance mutuelle entre deux phases statoriques
p	opérateur de Laplace
P	nombre de paires de pôles de la MAS
P_{aer}	puissance aérodynamique de l'éolienne
P_{max}	puissance maximale
P_{mec}	puissance mécanique de l'aérogénérateur
P_s	puissance active statorique de la MAS
P_{vt}	puissance du vent captée par les pales
P^*	puissance active de référence injectée au réseau
$P[\theta]$	matrice de passage de Park directe
$P[\theta]^{-1}$	matrice de passage de Park inverse
Q_s	puissance réactive statorique de la MAS
Q^*	Puissance réactive de référence injectée au réseau
R	rayon des pales
R_f	résistance du filtre
R_r	résistance d'une phase rotorique
R_s	résistance d'une phase statorique
S	surface balayée par la turbine
$S(x)$	surface de glissement de la variable x

t	temps
u_{dc}	tension du bus continu
U_{eq}	commande équivalente (linéarisation exacte)
U_n	commande non linéaire (stabilisante)
$[U]$	vecteur de commande
v_a, v_b, v_c	tensions simples cotés réseau avant le transformateur
v_{as}, v_{bs}, v_{cs}	tensions instantanées des phases statoriques
v_{ar}, v_{br}, v_{cr}	tensions instantanées des phases rotoriques
v_{eff}	tension simple efficace
v_{dr}, v_{qr}	tensions rotoriques instantanés dans les axes d et q
v_{ds}, v_{qs}	tensions statoriques instantanés dans les axes d et q
v_{md}, v_{mq}	composantes directe et quadratique de la tension modulée
v_{vt}	vitesse du vent
$V(x)$	fonction candidate de Lyapunov
$[v_S], [v_R]$	vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques
x	variable d'état
X	réactance de la self de lissage
$[X]$	vecteur d'état
α	paramètre de dimensionnement du bus continu
β	angle de calage des pales
ϕ_{dr}, ϕ_{qr}	flux rotoriques instantanés dans les axes d et q
ϕ_{ds}, ϕ_{qs}	flux statoriques instantanés dans les axes d et q
$[\phi_S], [\phi_R]$	vecteurs des flux statoriques et rotoriques
λ	rapport de vitesse de la turbine
Ω_{mec}	vitesse de rotation mécanique de la MAS
Ω_t	vitesse angulaire de la turbine

ω_{gl}	pulsation électrique fondamentale du glissement
ω_r	pulsation électrique fondamentale des grandeurs rotorique
ω_s	pulsation électrique fondamentale des grandeurs statorique
ρ	densité de l'air
σ	coefficient de dispersion
θ_r	position du rotor (phase a_r) par rapport au stator (phase a_s)
*(exposant)	grandeur de référence

Introduction Générale

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître, posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre, et sur l'épuisement prochain des ressources fossiles.

Suite à cette prise de conscience, un développement économique respectueux de l'environnement s'avère absolument nécessaire.

L'énergie électrique est un élément déterminant pour tout développement socio-économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer. Vu l'ampleur de l'industrialisation de ces dernières décennies, la multiplication des appareils domestiques de plus en plus gourmands en consommation d'énergie électrique, la demande de celle-ci est devenue très importante. Face à cela et avec la diminution des réserves mondiales en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, les pays industrialisés ont massivement fait recours aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques traditionnelles, mais le risque d'accident nucléaire (comme la catastrophe de Tchernobyl du 26 avril 1986 qui reste gravée dans la mémoire commune et récemment l'accident nucléaire de la centrale de Fukushima au Japon), le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique et l'éolien.

Les énergies renouvelables sont propres et constituent une solution alternative pour subvenir aux besoins de la société actuelle. Longtemps négligées ces énergies reprennent la place qui leur est dû, grâce aux recherches et études qui se font de plus en plus diversifiées et pluridisciplinaires.

Même si les énergies fossiles (pétrole et gaz) ne vont pas être remplacées de sitôt par les énergies renouvelables en Algérie, la part de ces derniers ne cesse d'augmenter, depuis la création du commissariat aux énergies renouvelables en 1982, et l'élaboration récente des textes législatifs, loi sur les énergies renouvelables en 2004, et le programme national sur les énergies renouvelables adopté par l'état en 2010. L'option du recours aux énergies renouvelables a pris un essor certain en Algérie, elle est matérialisée par des projets importants et concrets, tel que le méga projet de la centrale hybride de Hassi R'mel.

L'aspect socio-énergétique du développement durable est un problème complexe dont la solution nécessite une approche pluridisciplinaire faisant intervenir le socio-politique, l'environnemental, les sciences et les technologies, l'institutionnel et l'économique.

L'apport scientifique et technologique concerne la disponibilité et l'applicabilité des connaissances scientifiques et de leur combinaison pour atteindre les objectifs fixés.

L'aspect économique concerne les coûts des technologies disponibles pour la poursuite des objectifs. En général, la technologie permettant de produire à moindre coût obtient la plus grande valeur en faisabilité économique. Dans le secteur électrique, le critère de la valeur actualisée nette (VAN) est un critère couramment utilisé. Il consiste précisément à déterminer le prix de vente en monnaies courantes qui devrait être pratiqué sur l'ensemble de la centrale si l'on voulait récupérer, aux bornes de la centrale, sous forme de recettes actualisées les dépenses actualisées supportées en terme d'amortissement du capital, de frais de fonctionnement et de coûts en combustible [Tch03].

L'aspect environnemental concerne l'impact des technologies sur la qualité de l'environnement. L'approche microéconomique conduit souvent à une évaluation

partielle des choses, d'abord parce qu'elle laisse dans l'ombre certains effets d'essence qualitative qu'il est difficile de mesurer en termes monétaires, ensuite parce qu'elle privilégie le seul point de vue de l'investisseur individuel dans un domaine où la collectivité est par la force des choses concernée, notamment du fait des "effets externes" liés à tout investissement énergétique. Il n'est pas rare et même de plus en plus souhaité que la puissance publique, lorsqu'elle examine les retombées d'un programme d'investissements énergétiques, complète l'approche microéconomique par une étude d'impacts, surtout dans le contexte où les préoccupations environnementales deviennent plus contraignantes et sont susceptibles d'attirer certains fonds.

L'aspect sociologique se réfère à la capacité et à la disponibilité de la société à accepter la ou les technologies. Il est souvent associé à l'aspect institutionnel qui étudie le mode d'organisation et les règles établies en vue de satisfaire les intérêts collectifs. Les programmes d'électrification rurale ont par exemple été un succès dans les zones où ils ont été conçus et intégrés dans les structures organisationnelles et institutionnelles des communautés rurales.

Le politique intervient en tant qu'organe d'orientation et de régulation. L'Etat définit la politique énergétique et la structure de flux de dépenses qui coïncide le mieux avec l'intérêt.

En outre, comprendre l'évolution des besoins énergétiques d'une société en étudiant uniquement la situation actuelle ou en faisant de la prospective, ne permet pas de dégager les tendances profondes. Ainsi une approche historique essaiera d'adopter une optique diachronique liant le présent au passé et au futur.

D'une manière globale, les principaux facteurs d'influence d'un système énergétique sont [Tch03]:

- Besoins en énergie.
- Moyens de production mis en œuvre.
- Transformation des ressources naturelles.
- Croissance économique, dont le rythme est remis en question dans certaines situations.
- Couverture des besoins sociaux.
- Demande de solutions technologiques.

- Nuisances à l'environnement, qui entraînent des conséquences négatives sur l'homme et affectent l'amélioration du bien-être général.
- Efficacité des moyens de production.

Les objectifs de ce présent travail sont :

- Travailler sur l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement en général, et d'évaluer, en particulier, l'impact de la centrale hybride de Hassi R'mel sur l'environnement en essayant de comparer la quantité de gaz carbonique émis par cette centrale avec celui émis par la centrale classique de Hassi R'mel.
- Le second objectif, concerne l'énergie éolienne, on s'intéressera aux modèles des différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens ainsi qu'à l'étude et la commande d'un système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage connecté au réseau.

Cette thèse est divisée en deux grands axes, le premier est constitué par le chapitre un et deux, le deuxième axe est représenté par le chapitre trois et quatre.

La première partie se veut une contribution à l'évaluation des impacts que pourraient avoir les énergies renouvelables sur le développement durable respectueux de l'environnement du secteur énergétique algérien, elle poursuit un objectif général : apporter des éléments susceptibles de favoriser la définition d'une politique énergétique dans un contexte de crise énergétique actuelle ou la recherche de solutions novatrices est plus que pressante.

Après une brève présentation des énergies renouvelables, **le chapitre 1** s'intéresse à l'impact de ces énergies sur l'environnement, en particulier l'impact de la centrale hybride de Hassi R'mel et ceci grâce à une étude comparative de deux stations électriques : la centrale hybride de Hassi R'mel et la centrale conventionnelle de Tilghemt. Cette comparaison aboutit, d'une part, à une évaluation des quantités de gaz carbonique CO₂ émises par chacune des deux stations, et d'autre part à une évaluation technico économique, ce qui met clairement en évidence l'intérêt environnemental de ce genre d'énergie, propre et renouvelable, tout en contribuant à un développement économique durable.

Le **chapitre deux** est l'identification et l'évaluation des aspects et impacts environnementaux des deux stations.

La deuxième partie s'intéresse aux aérogénérateurs, le **troisième chapitre**, est un résumé du modèle des différentes génératrices utilisées dans le système éolien, et le **quatrième chapitre** est une contribution à l'étude et la commande d'un système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage et connecté au réseau, il s'agit de développer le modèle de l'éolienne à machine asynchrone en vue de la commander à vitesse variable. Après la partie modélisation et commande, la simulation sera abordée à la fin du chapitre.

Chapitre 1

Impact des énergies renouvelables sur l'environnement.

1.1 Introduction

Après un bilan des ressources énergétiques renouvelables nous nous intéresserons dans ce chapitre aux différentes énergies renouvelables , nous aborderons l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement, et pour ce, nous allons évaluer les quantités de gaz à effet de serre (CO_2) dégagées par deux centrales différentes : la première est la centrale hybride de Hassi R'mel et la seconde est la centrale conventionnelle de Tilghemet , afin de mettre en évidence les avantages des énergies nouvelles du point de vue environnemental et du point de vue économique.

Comme le champ solaire principal en Algérie est situé dans des régions d'hydrocarbures dotées de gaz naturel, le but stratégique Algérien est de créer une synergie entre le solaire et le gaz naturel, tirant profit de notre gaz naturel abondant et des ressources solaires. Couplé à des énergies renouvelables le gaz naturel est une ressource énergétique de choix pour le développement de l'Algérie et offre le type même de vecteur structurant pour notre intégration à l'économie mondiale.

Indépendamment des unités de l'énergie solaire prévues pour alimenter les zones rurales, des projets d'énergies renouvelables reliées à la grille nationale sont en cours de développement. La stratégie de l'Algérie consiste à effectuer une synergie entre le solaire et le gaz naturel grâce aux projets hybrides solaire-gaz en profitant de la dotation algérienne de gaz naturel et l'ensoleillement permanent du sud.

Un premier projet hybride gaz-solaire, d'une grande capacité est en cours de développement. Le projet augmentera la part d'énergie solaire dans le bilan énergétique global.

L'Algérie voit des occasions idéales de combiner la source d'énergie fossile la plus riche de l'Algérie : le gaz naturel, avec la source d'énergie renouvelable la plus abondante : le soleil.

Le développement de l'énergie solaire pourrait sauver des quantités significatives d'hydrocarbures et en particulier de gaz naturel. Les implications positives sont doubles : Premièrement, la réduction de combustibles fossiles brûlés réduira les émissions de gaz à effet de serre, tout en contribuant à améliorer l'approvisionnement en énergie pour nos associés.

1.2 Energies renouvelables définitions, ressources et exploitation

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future.

C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau de la terre de la biomasse, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité, ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [Ger02].

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle, elles ont été exploitées par l'homme depuis l'aube de l'humanité, bois de feu, traction animale, bateau à voile, moulin à vent ...

Malheureusement, ces énergies furent délaissées au profit d'autres sources d'énergies que l'on pensait à l'époque plus intéressantes.

Ce n'est que dernièrement, suite à la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique du à l'effet de serre, les risques du nucléaire et les limites des ressources (pétrole, gaz, charbon et uranium) qu'il y a eu prise de conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement est absolument nécessaire.

Les énergies dites renouvelables et propres constituent une alternative aux énergies fossiles sur plusieurs points :

- Elles respectent l'environnement (sont propres) ne dégagent pas de gaz à effet de serre, ni de déchets toxiques.
- Elles sont comme leurs noms l'indiquent « inépuisables ».
- Elles permettent une production décentralisée adaptée aux besoins locaux.

Parmi les énergies renouvelables nous citons :

L'éolien, le solaire thermique et photovoltaïque, la biomasse, la géothermie, l'hydraulique.

1.2.1 Le solaire thermique et photovoltaïque

L'énergie solaire est l'une des ressources renouvelables les plus abondantes sur terre, le flux d'énergie solaire reçu annuellement sur la surface de la terre représente environ 15000 fois la consommation d'énergie [Mir05].

L'énergie solaire est actuellement exploitée selon deux techniques :

- La conversion du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques c'est le solaire thermique

Il est utilisé dans les chauffe-eau solaires qui sont très répandus en Europe, plus de 600.000 familles ont en équipé leurs habitations. Il est aussi utilisé dans les planchers thermiques.

- La conversion directe du rayonnement lumineux en électricité par des capteurs (cellule photovoltaïque) c'est le solaire photovoltaïque.

Les panneaux photovoltaïques composés de cellules à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons.

La technique photovoltaïque est en très forte croissance, en 2001 on comptait en Europe environ 250 MW installés et en 2003 ce chiffre est monté à 560 MW.

La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil.

1.2.2 La géothermie

La géothermie consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité.

Le sous sol est naturellement chaud surtout à grande profondeur, plus on s'enfonce dans les entrailles de la terre, plus les températures augmentent, 3à4°C tous les 100m, cette eau chaude est utilisée pour le chauffage des maisons et autres immeubles [Mir05].

L'exploitation des eaux souterraines et le développement des pompes à chaleurs pourraient faire de la géothermie une des grandes énergies durables de demain.

Le principe de la pompe à chaleur est le suivant un capteur prélève de la chaleur du sol à l'extérieur par exemple sous une pelouse, son origine se trouve d'ailleurs dans le rayonnement solaire, cette chaleur est transmise dans la maison via un plancher chauffant, dans tous les cas le transfert de la chaleur nécessite un fluide caloporteur.

La géothermie s'est développée au 20^{ème} siècle dans de nombreux pays pour la production d'électricité, avec des eaux de très hautes températures transformées en Vapeur à titre d'exemple citons la centrale bouillante en GUADLOUPE Française. Situation actuelle : une vingtaine de pays produisent de l'électricité à partir de la géothermie.

Dans le monde entier, la capacité de production des installations géothermiques dans 18 pays était d'environ 5800 MW en1990, elle atteint aujourd'hui les 8700 MW. La géothermie joue un rôle essentiel pour les pays en développement : 22% de l'électricité produite aux philippines, 12% au Salvador 15% en Islande. Le Japon est le premier producteur mondial d'équipement géothermique.

1.2.3 La biomasse

Le terme biomasse désigne au sens large l'ensemble de la matière vivante. Depuis le premier choc pétrolier, ce concept s'applique aux produits organiques végétaux utilisés à des fins énergétiques.

La biomasse désigne donc l'ensemble des végétaux capables par le biais de diverses transformations, de restituer l'énergie solaire qu'ils ont stockés, cette énergie

solaire est convertie en différentes sources énergétiques tel que :

➤ Chaleur et électricité

Cette énergie est produite par le bois et déchets agricoles (paille), déchets urbains ordures ménagères et déchet industriels du secteur agroalimentaire.

Ces déchets subissent des transformations thermochimiques (combustion, pyrolyse, gazéification) permettant principalement de créer de la chaleur et de l'électricité.

➤ Biocarburant

Carburant bioéthanol : l'amidon et le glucose extraits des cultures sucrières (betterave, canne à sucre) et céréalières (blé, maïs) produisent de l'éthanol par procédé de fermentation alcooliques.

Carburants bio gazole : il comprend les végétaux riches en huile (colza, tournesol et soja) l'huile extraite de leurs graines permet de produire du bio gazole qui peut remplacer le gazole actuel pour moteur diesel.

1.2.4 L'hydraulique

L'hydraulique première des énergies renouvelables au monde, se distingue par sa souplesse d'utilisation, ses atouts écologiques et économiques.

Comme les ancestrales roues entraînées par le débit d'un cours d'eau, les turbines des centrales hydrauliques sont activées par la force de l'eau passant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur. Plus la hauteur de la chute d'eau et le débit sont importants plus la puissance électrique développée sera élevée.

Chaque ouvrage hydraulique est donc adapté à la typologie des lieux pour atteindre un rendement optimal.

Notons aussi dans le domaine de l'énergie hydraulique, les ressources marémotrices de la houle et celles des courants marins qui sont très importants, de nombreux travaux dans le monde ont montré la faisabilité de l'exploitation des ressources de la houle. La plus grande usine marémotrice au monde se trouve en France (la Rance) avec une puissance de 240 MW [Ger02].

Le développement attendu de l'énergie éolienne offshore pourrait être avantageusement couplé à une production par les vagues où l'on pourrait mettre en commun les coûteuses infrastructures de génie civil.

1.2.5 L'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables l'éolien est l'une des plus prometteuses, l'évolution technologique (augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux) alliée à la baisse continue des coûts de production (effet de série) font actuellement de l'éolien l'une des énergies renouvelables les plus compétitives.

Pour toutes ces raisons l'énergie issue du vent fait déjà partie intégrante du paysage et la tendance s'annonce irréversible.

1.3 Etat de l'art de l'éolien

1.3.1 L'historique de l'éolien

Dès l'aube de l'humanité le vent a été exploité pour en extraire de l'énergie mécanique, en effet depuis 3000 ans environ, il fût utilisé pour la propulsion des navires, pour les moulins à blé, ainsi que pour le pompage, Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait dans ce domaine conçu un projet d'irrigation à partir de la puissance du vent.

Les premiers moulins à vent firent leurs apparition au milieu du XIXème siècle, utilisés tout d'abord pour moudre les grains d'où leurs noms de moulin, ils furent aussi utilisés aux pays bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés, il y avait alors environ 200 000 moulins à vent en Europe [Ada05], et c'est l'arrivée des machines à vapeur qui fût la cause de leur déclin et de leur disparition progressive.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891, qui fut sans doute le pionnier dans ce domaine, d'associer une turbine éolienne à une génératrice.

Dès lors les recherches allèrent bon train, et les aérogénérateurs firent une apparition massive, 1million dans le monde vers les années 60.

La crise pétrolière de 1973, relança les études et les expériences cette fois ci à grande échelle.

Actuellement, l'éveil et la prise de conscience du danger du réchauffement climatique dû aux gaz à effet de serre vont de nouveau relancer la recherche, dans le domaine des énergies renouvelables en général et de l'énergie éolienne en particulier.

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître (figure 1-1) posant des questions cruciales sur le réchauffement de la planète due aux gaz à effet de serre d'une part et sur l'épuisement des ressources fossiles d'une autre part [Mir05].

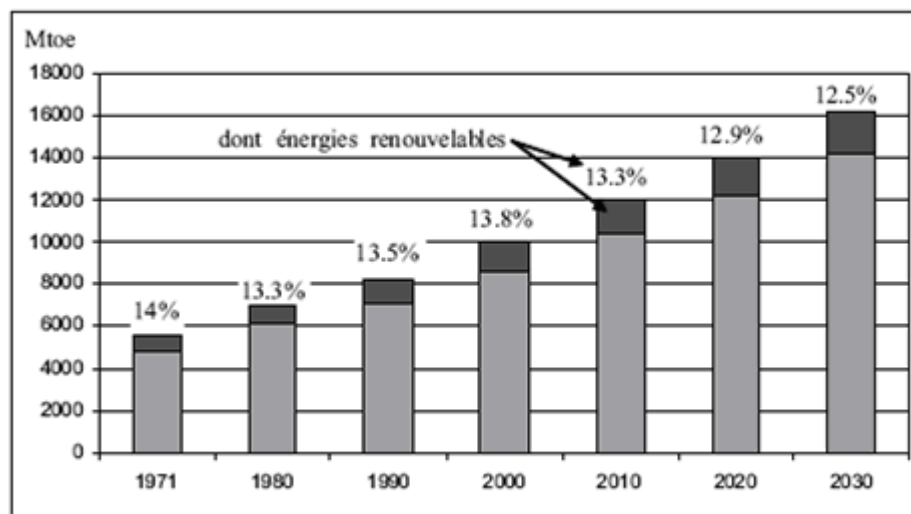


Figure 1.1. Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions.

L'énergie de nos jours, est produite essentiellement à partir de matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire.

La figure 1-2 montre la répartition des énergies dans le monde [Ada05].

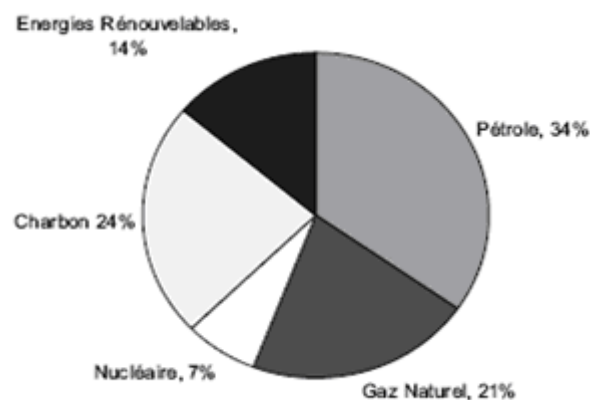


Figure 1.2. Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde.

Ces énergies non renouvelables qui ont contribué à la pollution atmosphérique et au réchauffement climatique, la pollution nucléaire par radiation qui est aujourd'hui le problème non résolu du stockage des déchets radioactifs, ainsi que la pérennité des ressources en énergies fossiles, en effet plusieurs sources tel que le pétrole le charbon et le gaz risquent de disparaître dans le courant du 21^{ème} siècle, ont contribué à la prise de conscience du monde qu'un développement économique et durable propre et respectueux de l'environnement est absolument nécessaire.

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air dû indirectement à l'ensoleillement de la terre c'est donc un sous produit du rayonnement solaire, en effet ce dernier est absorbé d'une façon différente aux pôles et à l'équateur vu la forme de la terre, le réchauffement de certaines parties du globe et à l'opposé le refroidissement des autres crée une différence de pression qui provoque le déplacement de ces masses. Ce déplacement s'effectue des zones où la densité de l'air (pression atmosphérique) est élevée vers celles où elle est faible.

L'énergie éolienne représente une énorme ressource de l'ordre de 30 MWh, la part terrestre exploitable est estimée à une valeur comprise entre 5 et 50 MWh /an [Mul02].

Vient s'ajouter à cela les zones offshore qui sont énormes.

L'énergie éolienne connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent et maintient depuis quelques années une croissance de 30% par an [Ada05].

Les aérogénérateurs produisent environ 2% de l'électricité mondiale mais le taux de croissance est élevé et pourrait atteindre 10% à l'horizon 2020.

L'Allemagne tient le rôle de leader dans le domaine avec 5432 MW en activité fin 2000.

Le Danemark fournit 14% de sa demande énergétique, c'est un pays producteur des turbines éoliennes.

Au Maghreb le Maroc a mis en service en 2000 la centrale de Tétouan située sur le détroit de Gibraltar elle compte 84 éoliennes de 600 KW chacune ce qui représente 2% de l'électricité produite au Maroc.

La France a lancé en 1996 le programme Eole 2005 qui prévoyait 250 à 500 MW vers 2005, en 2000 il a été rectifié pour un nouvel objectif de 3000MW en 2010 [Mul02].

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar.

La figure 1.3 présente la carte des vents en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER laboratoire de l'énergie éolienne.

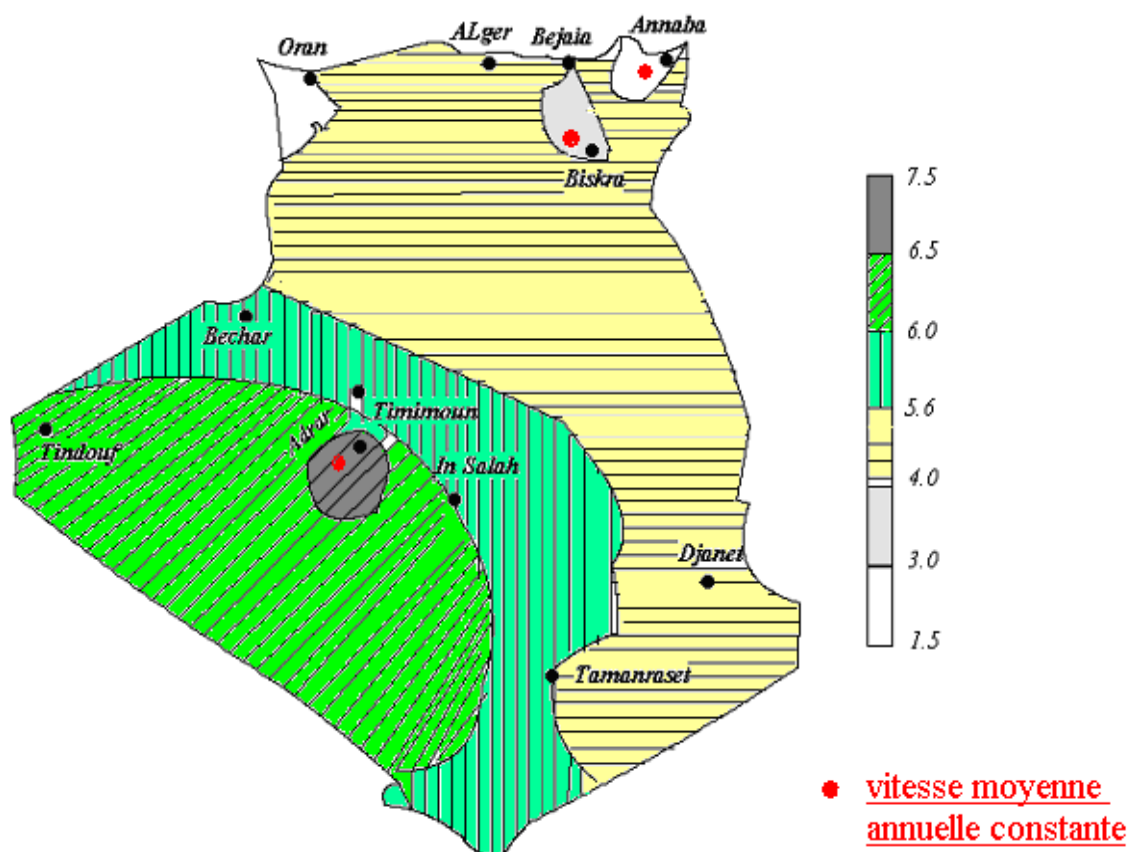


Figure 1.3. Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie.

Le tableau 1.1 représente en quelques chiffres la capacité d'énergie éolienne installée de part le monde d'après les statistiques de la « World Wind Energy Association».

Tableau 1.1 : Capacité d'énergie éolienne installée dans le monde en MW.

Source : Euroobserver 2001 à 2011

RANG	PAYS	2005	2011
1	Allemagne	18.415	27.210
2	Espagne	10.028	20.680
3	USA	9.149	40.200
4	Inde	4.430	13.000
5	Danemark (& Iles Faeroe)	3.136	3.800
6	Chine	1.260	42.300
7	Italie	1.718	5.800
8	Angleterre	1.332	5.200
9	Portugal	1.022	3.890
10	France	757	5.660
11	Hollande	1.219	2.328
12	Canada	683	4.000
13	Japon	1.061	2.300
14	Autriche	819	1.084
15	Australie	708	2.224
16	Grèce	573	1.629
17	Irlande	496	1.631
18	Suède	510	2.907
19	Norvège	267	520
20	Brésil	29	1.509
21	Egypte	145	550
22	Belgique	167	1.078
23	Taiwan	104	188
24	Korè du sud	98	173
25	Nouvelle Zélande	169	506
26	Pologne	83	1.616
27	Maroc	64	300
28	Mexique	3	873
29	Finlande	82	197
30	Ukraine	77	87
31	Costa Rica	71	123
32	Hongrie	18	329
33	Lituanie	6	179
34	Turquie	20	1.800
35	Iran	23	100
36	Reste Europe	129	163
37	Reste Amérique	109	109
38	Reste Asie	38	38
39	Reste Afrique & Moyen Orient	31	31
TOTAL MONDIAL		59.091	≈200.000

1.4 Aspect environnemental du développement durable

Le développement durable, respectueux de l'environnement dans le domaine énergétique, est un problème complexe dont la solution nécessite une approche multidisciplinaire qui va de l'environnement passant par les sciences et les technologies, jusqu'aux sociopolitique et l'économique.

La protection de l'environnement connaît un intérêt de plus en plus important, dû notamment au problème du réchauffement climatique causé par les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

1.4.1 Qu'est un gaz à effet de serre ?

Qu'est-ce qu'une serre ? Chacun sait que c'est un bâtiment couvert de vitres, qui laisse bien passer la lumière du soleil, mais empêche que la chaleur qui se forme à l'intérieur de la serre, sous l'effet de la lumière du soleil, ne se dissipe trop vite vers l'extérieur. Deux effets contribuent à retenir la chaleur prisonnière à l'intérieur de la serre :

Un effet purement mécanique : les vitres empêchent tout simplement l'air chaud d'aller ailleurs ! C'est pour cela que l'on trouve des serres faites d'une simple bâche de plastique, qui ne procurent que cet effet "mécanique".

Un "effet de serre", qui correspond en fait à une opacité du verre à l'infrarouge : en réponse à l'énergie reçue de l'extérieur, l'intérieur de la serre chauffe et émet des infrarouges. Or ces infrarouges émis par l'intérieur de la serre sont interceptés par le verre, qui est un matériau très opaque pour ce rayonnement particulier, ce qui empêche l'énergie de se dissiper vers l'extérieur et fait monter la température à l'intérieur.

Il existe au sein de notre atmosphère des gaz (les "gaz à effet de serre"), présents en petite quantité, qui jouent pour notre planète exactement le même rôle que les vitres de la serre dans l'exemple ci-dessus. Ces gaz n'empêchent pas la lumière du soleil d'arriver jusqu'à nous (ils sont très transparents au rayonnement solaire), mais

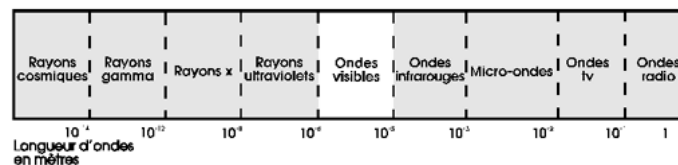
empêchent le rayonnement infrarouge émis par le sol de repartir vers l'espace. Ils font ainsi office de "couvercle" en retenant prisonnière, en quelque sorte, l'énergie - donc une température élevée - près du sol.

Un gaz à effet de serre est un gaz opaque, partiellement, au rayonnement infrarouge émis par la surface de la terre. La majeure partie d'entre eux sont transparents au rayonnement que la terre reçoit du soleil, mais pas tous, l'ozone, en particulier, est opaque aux ultraviolets reçus du soleil.

Notre étoile, le soleil, nous envoie chaque jour une quantité considérable d'énergie : en une année, l'humanité toute entière consomme une énergie qui représente moins de 3% de ce que le Soleil nous envoie chaque jour.

Cette énergie solaire nous arrive sous forme de rayonnement électromagnétique, dont la lumière fait partie.

Les rayonnements émis par le soleil sont : la lumière, les ultra-violet, les infrarouge, les rayons x, les ondes radio, les micro-ondes et les rayons gamma.



Tout corps ayant dépassé le zéro absolu (c'est à dire $-273,15^{\circ}\text{C}$) émet du rayonnement électromagnétique pour dissiper une partie de son énergie :

S'il n'est pas très chaud, il n'émettra que des ondes radio ; c'est le cas de certains objets dans l'espace (où effectivement il ne fait pas chaud : -270 degrés Celsius !),

S'il est plus chaud il émet aussi des infrarouges (par exemple notre corps émet des infrarouges, même la nuit : c'est grâce à cela que l'on peut construire des caméras à infrarouges qui permettent de nous "voir la nuit" en captant ces infrarouges),

S'il est encore plus chaud (à partir de 700°C , par exemple un morceau de métal chauffé "au rouge"), il émettra aussi de la lumière visible ; dans nos ampoules

électriques nous ne faisons rien d'autre que de chauffer à l'électricité un filament de métal vers les 2700 °C, ce qui lui fait rayonner de la lumière visible,

Encore plus chaud, il émettra aussi des ultraviolets, c'est le cas du soleil,

Encore plus chaud, il émettra des rayons X : c'est le cas de certains corps célestes.

Le soleil, qui est très chaud (6.000 °C à la surface), nous envoie un rayonnement composé de :

- 10% d'ultra-violets (dont une bonne partie est arrêtée par la fameuse "couche d'ozone", heureusement pour nous car les ultraviolets, qui sont des rayonnements "énergiques", sont néfastes à la vie : ils ont tendance à "casser", dans les cellules vivantes, des liaisons chimiques indispensables),
- 40% de lumière visible
- 50% d'infrarouges.

La Terre, qui n'est pas très chaude (15 ° C), émet uniquement des infrarouges (qui ne sont pas les mêmes que ceux du soleil).

Or un matériau peut très bien être transparent pour l'un de ces rayonnements et pas pour les autres : notre propre corps, par exemple, est transparent pour les rayons X (qui passent bien à travers ; c'est pour cela que l'on s'en sert en radiographie), mais ne l'est pas pour la lumière visible (sinon nous ne dirions pas : ôte-toi de là, je ne vois rien !).

La plupart des gaz à effet de serre (GES) sont d'origine naturelle. Mais certains d'entre eux sont uniquement dus à l'activité humaine ou bien voient leur concentration dans l'atmosphère augmenter en raison de cette activité. C'est le cas en particulier de l'ozone (O₃), du dioxyde de carbone (CO₂) et du méthane (CH₄).

L'ozone est fourni en grande quantité par l'activité industrielle humaine, alors que les CFC encore largement utilisés détruisent eux, l'ozone, ce qui fait que l'on peut constater un double phénomène :

- une accumulation d'ozone dans la troposphère au-dessus des régions industrielles, c'est le mauvais ozone, car il est près de nous, ce qui cause des irritations dans les yeux et d'autres problèmes de santé.
- une destruction de l'ozone dans la stratosphère au-dessus des pôles, c'est le trou qu'on constate dans la couche d'ozone naturelle, c'est dans la haute atmosphère, ce qui entraîne une augmentation des ultra-violets qui parviennent au sol, cela peut provoquer des dommages sanitaires directs (cancer).

La combustion des carbones fossiles comme le charbon, le lignite, le pétrole ou le gaz naturel (méthane) rejette du CO_2 en grande quantité dans l'atmosphère : la concentration atmosphérique de gaz carbonique a ainsi légèrement augmenté, passant de 0,030% à 0,038 % en 50 ans. Seule la moitié serait recyclée par la nature, et l'autre moitié resterait dans l'atmosphère, ce qui augmenterait l'effet de serre. Un des secteurs d'activités qui dégagent le plus de gaz à effet de serre est l'énergie .

1.4.2 Bilan environnemental

Dans le bilan environnemental, on identifie et quantifie les différents types d'émissions de manière à en évaluer l'impact sur les catégories de dégâts : effet de serre, destruction de la couche d'ozone acidification des sols et des eaux.

Le protocole de Kyoto considère les gaz suivants comme gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote(N_2O), les hydrofluorocarbures(HFC), les perfluorocarbures (PFC), et l'hexafluorure de soufre (SF_6) [ADEME].

Pour étudier l'impact sur l'environnement, on compare les émissions des différents gaz à une référence, par exemple pour le cas des GES on définit le pouvoir de réchauffement global (PRG), dans certaines littératures , le potentiel de réchauffement global, ou global warming potential (GWP) en anglais , par le CO_2 équivalent qui tient compte de la capacité de chacun des gaz à contribuer au réchauffement de la planète ,the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) recommande les équivalences suivantes pour une période de cent

ans [Tch03]:

$$1\text{CH}_4 = 21 \text{ CO}_{2\text{eq}} \quad 1\text{N}_2\text{O} = 310\text{CO}_{2\text{eq}} \quad 1\text{HFC} = 140\text{CO}_2 \quad 1\text{PFC} = 6500\text{CO}_2$$

$$1\text{SF}_6 = 23900 \text{ CO}_{2\text{eq}}$$

Le tableau 1.2 nous donne un exemple de contribution d'émission en différents gaz et de leur PRG, le pays concerné est la France.

Tableau 1.2 : PRG et émissions françaises des différents gaz [ADEME].

GAZ	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFC	PFC	SF ₆
PRG (à 100ans)	1	21	310	140	6500	23900
Emissions en 1995	338Mt	2.84Mt	0.173Mt	804 tonnes	180 tonne	111 Tonnes
Emission en équivalent CO ₂	338Mt	60Mt	54Mt	1.4Mt	1.1Mt	2.7Mt

1.4.3 Taux d'équivalence entre les consommations énergétiques à partir des combustibles et les émissions de CO₂.

Pour rappel :

$$1 \text{ tep} = 41.8\text{GJ (Giga joule)} = 11626\text{KWh.}$$

Les tep utilisées dans les tableaux suivants représentent l'énergie entrante dans l'installation de combustion, et non l'énergie finale après rendement de combustion.

Sachant qu'il peut exister des qualités différentes pour un même combustible, pétrole ou charbon par exemple.

Le tableau 1.3 représente les équivalences moyennes en tep (PCI) ou pouvoir calorifique inférieur des principaux combustibles.

Tableau 1.3 : Quantités de combustibles physiques pour obtenir une tep(PCI) [ADEME].

HOUILLE	CHARBON	FIOUL LOURD	SUPER- CARBURANT	GAZ NATUREL
1.62t	1.31t	1.05t	1270 l	10000 m ³

Les émissions de CO₂ par tep sont exprimés soit en tonnes de CO₂ ou en tonnes de carbones, la relation entre eux est liée aux poids moléculaire, qui est de 44 pour le CO₂ et 12 pour le C, on a alors :

$$1\text{tC} = 44/12 \text{ tCO}_2 = 3.67 \text{ tCO}_2$$

Il ya autant de carbone dans 1 tC que dans 3.67 tCO₂.

Le tableau 1.4 présente les émissions de CO₂ de différents combustibles, ils sont relatives à une tep de combustible (PCI), on suppose la combustion parfaite (pas d'imbrulés).

Tableau 1.4 : coefficients moyens d'émissions en CO₂ [ADEME].

	Emissions en tCO ₂ /tep	Emissions en tC/tep
Charbon	4.118	1.123
Pétrole	3.043	0.83
Gaz naturel	2.394	0.653

1.4.4 Evaluation des émissions de CO₂ liées au secteur électrique

Les centrales électriques génèrent des émissions en CO₂ différentes selon le combustible utilisé. Les niveaux d'émissions relatifs à chacun des modes de production possibles sont récapitulés dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Emissions de CO₂ des centrales électriques en gCO₂/KWh [ADEME].

Charbon	Fioul	Gaz	solaire	Eolien	Hydraulique	Nucléaire

915	676	404	0	0	0	0
-----	-----	-----	---	---	---	---

Le tableau 1.5 montre clairement l'importance de l'utilisation des énergies renouvelables pour réduire les émissions de carbone, d'où l'impact positif sur l'environnement.

1.4.5 Les émissions de CO₂ dans le monde.

D'après les statistiques de l'agence internationale de l'énergie (AIE), les émissions en CO₂ du à l'utilisation des énergies fossiles sont en hausse de 38% depuis 1990, Totalisant un record de 29 milliard de tonnes de CO₂.

La chine dont les emissions en CO₂ ont triplé depuis 1990, se retrouve en tête des pays pollueurs en CO₂, suivi par les états unis. Ces deux pays ont généré plus de 40% des émissions mondiales de CO₂ du à la combustion d'énergie figure 1.4.

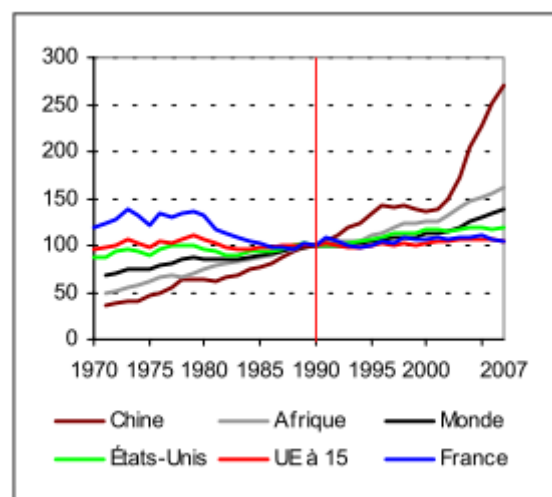


Figure 1.4. Emission de CO₂ dans le monde : Indice base 100 en 1990 [AIE].

Les émissions de CO₂ par habitant connaissent un écart très important de 1 à 20 entre les états –unis et l'Afrique, la figure 1.5 montre une baisse des émissions

de CO₂ dans les pays développées, qui ont ratifié le protocole de Kyoto, et une augmentation ailleurs.

Alors qu'elles ont presque doublé, les émissions de la chine (4.6tCO₂/habitant), sont presque égales à la moyenne des émissions dans le monde (4.4 tCO₂).

L'écart de développement, entre les pays industrialisés et les pays du tiers monde explique le faible niveau d'émission en Afrique (1tCO₂).

Avec 5,8 t CO₂ émises par an, un Français émet trois fois moins qu'un habitant des États-Unis (19 t CO₂) et reste en dessous de la moyenne européenne, Grâce, principalement, à un appareil de production d'électricité faiblement émetteur, figure 1.5.

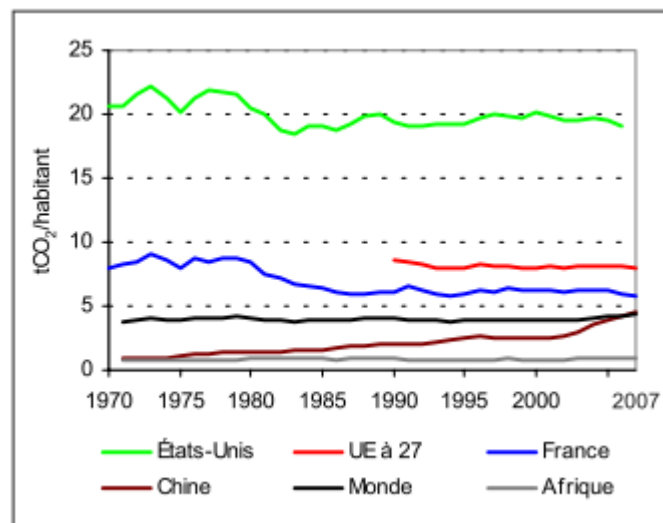


Figure 1.5. Emissions de CO₂ par habitant [AIE].

1.4.6 Les émissions de CO₂ en Algérie.

On note une très forte croissance d'émission de gaz carbonique en 45 ans

Pour l'ensemble de la période 1960-2005, on enregistre une moyenne annuelle de 59 188,4de tonnes de CO₂.

C'est en 2005 qu'on enregistre le plus haut niveau 137 536 tCO₂ et c'est en 1963 qu'on enregistre le plus bas niveau 5 422,7 t CO₂.

En 1960, par rapport aux données mondiales disponibles, la part relative de ce pays est de 0,07%, en 2005, cette même part est de 0,47%.

Le changement enregistré entre la première et la dernière année est de 2133%.

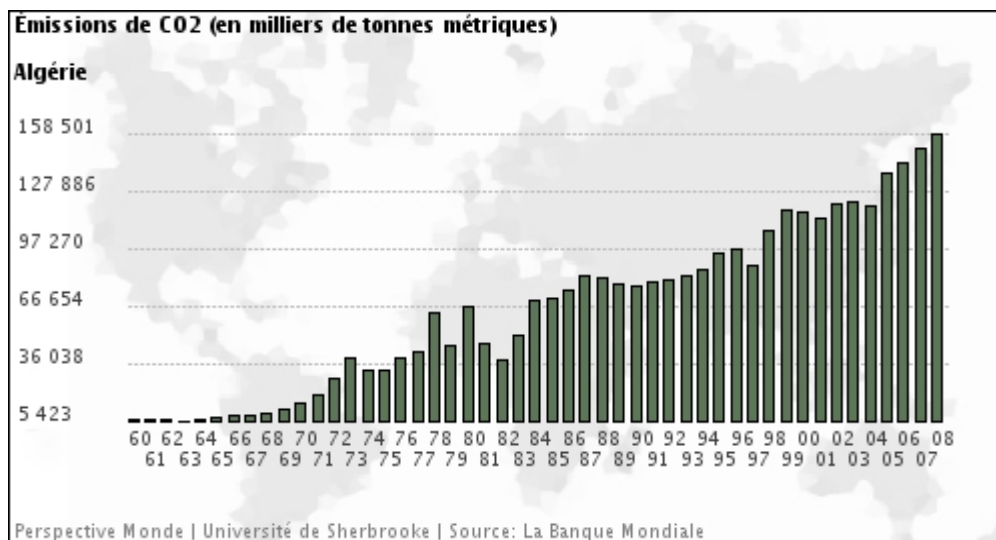


Figure 1.6. Émissions de CO₂ en milliers de tonnes métriques

1.5 Introduction des Energies Renouvelables en Algérie et Changement Politique.

Les énergies fossiles ont longtemps constitué la seule source d'énergie, particulièrement, dans notre pays, elles ne vont pas être de sitôt suppléer par les ER, cependant, le changement politique en faveur des ER est en train de se créer un chemin doucement mais sûrement.

Les ER contribuent à la diversification des systèmes énergétiques, mettant à la disposition de l'humanité une électricité propre verte et fiable, qui respecte notre environnement tout en contribuant à un développement durable

Des changements institutionnels, politiques et économiques sont nécessaires si les aspects sociaux et environnementaux sont à prendre en considération dans la définition des politiques énergétiques.

En effet, depuis la création du commissariat aux énergies renouvelables, et l'élaboration récente de textes législatifs sur les ER, le changement de politique Algérienne en faveur des ER et de la protection de l'environnement, ainsi que du développement durable, connaît un essor certain, qui est en train de se matérialiser par des projets de plus en plus importants, tel que le méga projet de la centrale hybride de Hassi R'mel.

La centrale de Hassi R'mel est une centrale électrique hybride solaire-gaz, d'une capacité de 150 MW.

Le contrat a été signé le 05/01/2007 et est développé par New Energy Algeria (NEAL), une coentreprise entre la SONATRACH, SONELGAZ et l'Espagne (ABENER).

Le projet de Hassi R'mel constitue une importante étape dans la promotion et l'utilisation des ER en Algérie.

Elle aura un impact positif sur l'environnement et le développement durable :

- moins de gaz brûlé, donc moins d'émissions en CO₂, moins de 33.000 tonnes/an de CO₂, estimé par Sonelgaz.
- le gaz naturel économisé, pourra être exporté, ou utilisé pour d'autres applications, plus de 7 millions m³/an.

Avec une durée d'ensoleillement d'environ 3500 heures/an, l'Algérie se place indéniablement parmi les pays les plus riches en potentialités dans le domaine des énergies renouvelables.

La réalisation du projet et son exploitation visent à atteindre l'objectif des 5% de la production d'électricité d'ici 2012 à 2013 à partir d'énergies renouvelables.

Sur le plan local, le projet contribue à la satisfaction énergétique par les ER et par la préservation des ressources gazières et donc un modèle de consommation énergétique. Sur le plan social, le projet est porteur de richesse et de savoir pour le pays.

1.5.1 Description de la centrale hybride de Hassi-r'mel.

La production prévue est d'une capacité de 150 MW soit 1769 600 Mwh/an :

- le cycle combine : 120 Mw.
- le cycle solaire 30Mw.

La centrale hybride à cycle combiné utilisera les matières suivantes :

- le rayonnement solaire comme énergie primaire.
- les miroirs solaires de type cylindro-parabolique en provenance d'Allemagne.
- le gaz naturel propre produit à Hassi R'mel.
- l'eau issue de la station d'épuration de la ville de Hassi R'mel.
- le réseau électrique haute tension disponible à Hassi R'mel.

1.5.2 Description du Procédé.

La centrale sera constituée d'un champ de miroirs solaires intégré à un cycle combiné utilisant le gaz naturel et le rayonnement solaire.

Le principe de la centrale thermo-solaire à cycle combiné consiste à combiner deux systèmes : le gaz à cycle combiné conventionnel (CC) et le thermo-solaire.

Dans la centrale à cycle combiné conventionnelle (CC), les gaz d'échappement de la turbine à gaz entrent dans la chaudière de récupération (HRSG) à une température d'environ 600° C. Ils transfèrent leur énergie thermique au cycle vapeur/eau et quittent la chaudière à une température d'environ 150° C.

L'eau en provenance du condenseur entre dans la chaudière et circule dans une direction opposée aux gaz d'échappement, elle sera chauffée au point d'ébullition, évaporée puis surchauffée.

La vapeur super chauffée actionne ensuite une turbine qui convertit la chaleur en énergie mécanique, et la turbine actionne un générateur qui convertit l'énergie mécanique en électricité.

Le champ solaire prévue est composé de miroirs de type cylindro-parabolique orientés selon la position du soleil.

Ces miroirs réfléchissent donc le rayonnement solaire sur des tubes servant de récepteurs, qui recueillent la chaleur et qui sont couvert d'une couche absorbante.

Dans les tubes circule un fluide caloporteur (huile synthétique) absorbant l'énergie thermo- solaire et la transportant à une unité de puissance conventionnelle.

Ainsi, l'huile chaude est utilisée pour convertir de l'eau en vapeur dans l'échangeur de chaleur, celle-ci ira frapper les pales d'une turbine d'alternateur, de l'électricité est alors produite figure 1.7.

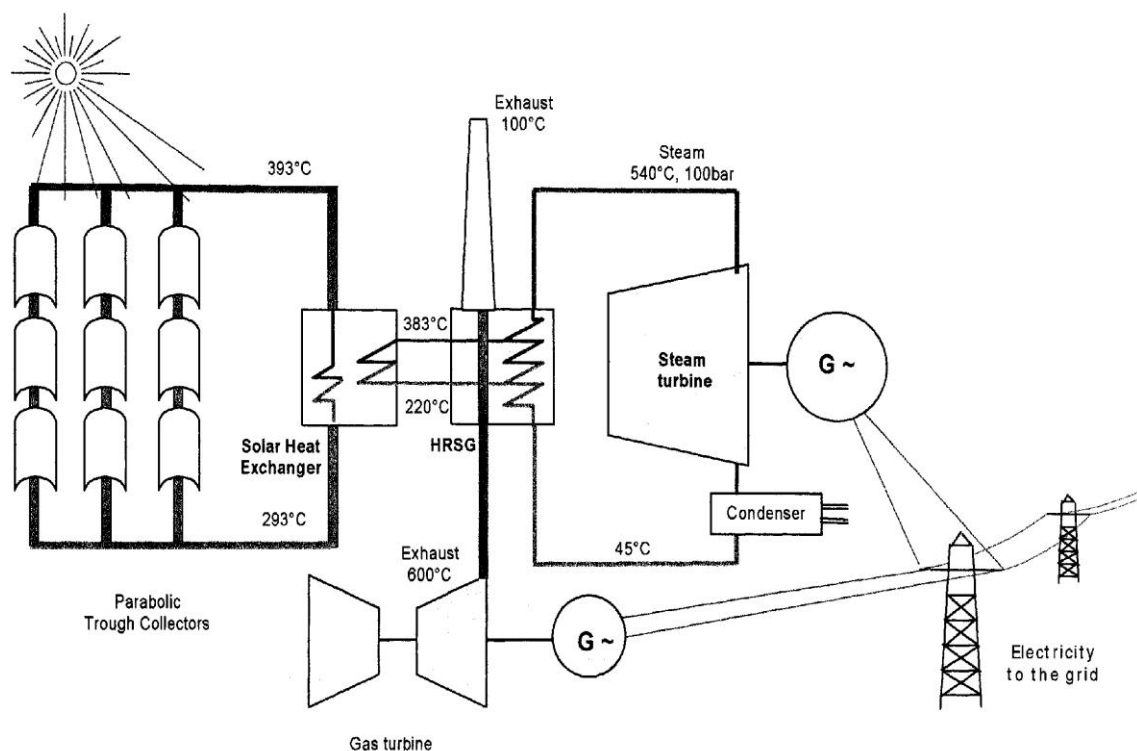


Figure 1.7. Schéma simplifié du procédé de la centrale thermo-solaire à cycle combiné intégré.

Nous allons commencer tout d'abord par le circuit d'huile où celle-ci est préchauffée dans une chaudière auxiliaire jusqu'à 35-38 °C pour alimenter la tuyauterie du champ solaire (l'irradiation solaire concentrée réchauffe le fluide qui circule à l'intérieur du tube récepteur. De cette manière, l'irradiation solaire directe se transforme en énergie thermique sous forme de chaleur sensible du fluide qui circule dans le récepteur. La concentration optique est telle que seule l'irradiation solaire directe est utilisable par le capteur, elle nécessite donc que le capteur suive en permanence le soleil tout au long de la journée.

Quand la température d'huile à la sortie du circuit solaire atteint 391°C ($P = 14$ bars), l'huile se dirige vers l'échangeur de chaleur au contact avec de l'eau qui est déjà préchauffée grâce à la chaudière HRSG (Heat Recovery Steam Generator) jusqu'à 195 °C ($P = 94,18$ bars) ; l'huile sort à 291°C. Durant la période nocturne ou bien dans le cas où la température de l'huile n'atteint pas la température voulue, la vanne d'huile du circuit du champ solaire se ferme et la vanne de by-pass s'ouvre pour assurer la circulation d'huile en dehors de l'échangeur.

Ensuite, la vapeur sort à 372 °C et à 87,2 bars, et se divise en deux parties pour alimenter les deux chaudières de récupération HRSG correspondant aux deux turbines à gaz pour être surchauffée. La vapeur arrive ensuite à la chaudière HRSG (pratiquement à la même pression et la même température), et alimente la chaudière en amont ; cette vapeur passe côté tubes de la chaudière (les gaz d'échappement passant côté calandre) et sort à 560°C et 83 bars qui sont les conditions de fonctionnement de la turbine à vapeur. Après détente dans cette dernière, la vapeur sort à 52 °C et 0,14 bar. La vapeur se dirige vers les aérocondenseurs, l'eau condensée va au réservoir principal d'où elle sera ensuite pompée et se diviser en deux parties pour être préchauffée dans les deux chaudières HRSG. La vapeur est introduite dans la partie terminale de la chaudière, soit tout près de la cheminée principale. Elle passe par plusieurs étapes : tout d'abord par le préchauffeur d'où elle sort à 140 °C et 6,92 bars avant d'être dirigée vers un ballon séparateur (dégazeur) puis elle revient dans l'évaporateur LP et retourne encore une fois au ballon pour subir une meilleure séparation des gouttelettes d'eau entraînées. La vapeur passe ensuite dans

l'économiseur-I HP et sort finalement de la chaudière à 195 °C et 94 bars. C'est cette vapeur qui va alimenter la chaudière HTF (Heat Transfer fluide) huile/eau.

Lorsque le crépuscule approche et que les niveaux d'énergie utile baissent, le débit d'huile diminue jusqu'à atteindre le débit minimal. Une fois que ce débit minimal ne permet plus d'obtenir une température de sortie d'huile de 393 °C, la circulation est interrompue et une nouvelle période nocturne commence.

Pendant la période nocturne, l'huile ne peut pas produire la vapeur au niveau de l'échangeur HTF car sa température est trop basse. E fait, deux choses vont se produire.

l'huile circule en circuit fermé à travers le champs solaire, et passe aussi dans la chaudière auxiliaire pour maintenir toujours la température de l'huile vers 35-38 °C pour éviter le givrage pendant le froid ou bien lorsque La température est basse.

L'eau entre dans le préchauffeur de la chaudière auxiliaire en provenance du réservoir principal d'eau condensée et passe dans le ballon dégazeur, ensuite dans l'évaporateur LP. Elle pénètre alors dans l'économiseur-I HP. Dans ce cas, au lieu de sortir du point chaudière pour aller dans le ballon ensuite dans l'évaporateur HP. Finalement, la vapeur d'eau passe directement dans les HP surchauffeur HP I et II qui sont munis de brûleurs pour augmenter la température de la vapeur jusqu'à 650°C

Pour alimenter la TAV, avec la contribution des gaz d'échappement des deux TAG, tout ces bruleurs sont munis d'une boucle de régulation qui assure l'alimentation en gaz naturel lorsque cela est nécessaire.

1.6 Comparaison de la centrale hybride de hassi-R'mel avec la centrale conventionnelle de Tilghemt

1.6.1 Présentation de la station de Tilghemt :

La centrale de production d'électricité de Tilghemt, d'une puissance nette globale de 220 (2 x 110 MW) MW comprend deux groupes turboalternateur. De conception récente, le contrôle largement automatisé des groupes permet une grande autonomie de fonctionnement. En particulier, il assure une marche en toute sécurité pour les cas d'incidence défavorable de facteurs ambiants, de régimes transitoires du réseau électrique ou encore d'accidents tout en préservant au maximum la disponibilité de la production d'électricité. La centrale est isolée sur une butte à 27 kilomètres à l'est de Hassi R'mel et 2 km ouest du carrefour avec la route nationale¹, (Laghouat Ghardaïa). Elle occupe une superficie de 206495 m².

1.6.2 Calcul des quantités de CO₂ émises par les deux centrales électriques

La technologie de la centrale électrique hybride de HassiR'mel consiste en une contribution de chaleur près de 20% venant du champ solaire. Puisque la centrale électrique hybride produit une puissance théorique de 150 Mwh, la puissance du champ solaire sera de l'ordre de 30Mwh.

Pour apprécier les avantages de la réalisation de cette centrale électrique d'un point de vue environnemental, nous avons calculé les quantités de CO₂ émises par cette centrale électrique afin de les comparer à celles libérées par la centrale conventionnelle de Tilghemt. Cette dernière a été choisie volontairement parce que la puissance qu'elle développe est pratiquement égale à celle de la centrale électrique hybride.

Nous avons pris le dioxyde de carbone comme exemple de la pollution atmosphérique puisque ce gaz est responsable d'une grande partie du phénomène de réchauffement climatique.

1.6.3 L'évaluation des quantités de CO₂ émises par la centrale électrique hybride

Pour la centrale hybride qui génère une puissance nette de 150 Mw/h et dont l'apport solaire est de 20%, nous avons considéré deux cas correspondant l'un à une marche dite de "jour" (où le cycle hybride est mis en œuvre pleinement), et l'autre dite de "nuit" (cycle combiné faisant appel aux turbines à gaz et à vapeur mais pas au champ solaire).

1.6.3-a Marche " jour "

Dans ce cas de figure, l'apport solaire étant de 20%, les brûleurs des fours des chaudières sont mis à l'arrêt, ce qui signifie une consommation de combustible beaucoup moindre.

La consommation de gaz naturel (GN) prévu est de 9072 kg/ h, soit :

$$D_{GN} = 9072 \text{ kg/ h} = 9072 / M_{GN} = 9072 / 18,47 = 491,24 \text{ kmol/ h}$$

Sachant que la masse molaire du GN est égale à :

$$M_{GN} = \sum M_i * y_i = 18,47 \text{ kg/ kmol}$$

Sachant que les masses molaires sont :

$$C=12, H=1, N=14, O=16, He=2.$$

$$M \longrightarrow 100 \%$$

$$M_i \longrightarrow y_i \%$$

Donc :

$$CH_4: \quad 16 \longrightarrow 100\%$$

$$M_{CH_4} \longrightarrow 85.3\%$$

$$M_{CH_4} = 13.65 \text{ Kg /Kmol}$$

C₂H₆ :

$$30 \longrightarrow 100\%$$

$$M_{C_2H_6} \longrightarrow 7.29\%$$

$$M_{C_2H_6} = 2.19 \text{ Kg /Kmol}$$

C₃H₈ :

$$44 \longrightarrow 100\%$$

$$M_{C_3H_8} \longrightarrow 1.73\%$$

$$M_{C_3H_8} = 0.76 \text{ Kg /Kmol}$$

C₄H₁₀ :

$$58 \longrightarrow 100\%$$

$$M_{C_4H_{10}} \longrightarrow 0.66\%$$

$$M_{C_4H_{10}} = 0.38 \text{ Kg /Kmol}$$

C₅H₁₂ :

$$72 \longrightarrow 100\%$$

$$M_{C_5}^+ \longrightarrow 0.19\%$$

$$M_{C_5}^+ = 0.14 \text{ Kg/Kmol}$$

CO₂ :

$$44 \longrightarrow 100\%$$

$$M_{CO_2} \longrightarrow 0.24\%$$

$$M_{CO_2} = 0.11 \text{ Kg/Kmol}$$

N₂ :

$$\begin{array}{lcl} 28 & \longrightarrow & 100\% \\ M_{N_2} & \longrightarrow & 4.44\% \end{array}$$

$$M_{N_2} = 1.24 \text{ Kg/Kg/Kmol}$$

He :

$$\begin{array}{lcl} 2 & \longrightarrow & 100\% \\ M_{He} & \longrightarrow & 0.15\% \end{array}$$

$$M_{He} = 0.003 = 0 \text{ Kg/Kmol}$$

Le tableau 1.6 représente les compositions molaires et les débits molaires partiels des constituants du GN nécessaires à la détermination des quantités de CO₂ émises par la combustion de chacun de ces hydrocarbures.

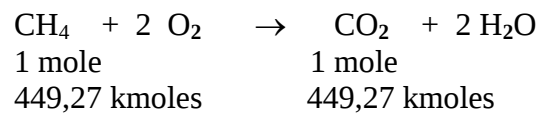
Tableau 1.6: Composition et débits molaires partiels des constituants du GN consommé en marche "jour" par la centrale hybride et estimation des quantités de CO₂ dégagées par combustion.

Constituants	Masse molaire (kg/kmole)	Fract. mol. y_i (% mol.)	Masse mol. partielle M_i (kg/kmole)	Débit mol. partiel D_i (kmole/h)	QCO ₂ (kmole/h)
CH ₄	16	85,3	13,65	449,27	449,27
C ₂ H ₆	30	7,29	2,19	38,40	76,79
C ₃ H ₈	44	1,73	0,76	9,11	27,34
C ₄ H ₁₀	58	0,66	0,38	3,48	13,90
C ₅ ⁺	72	0,19	0,14	1,00	5,00
He	2	0,15	0,00	0,79	0,00
CO ₂	44	0,24	0,11	1,26	1,26
N ₂	28	4,44	1,24	21,81	0,00
Total	/	100,00	18,47	491,24	573,56

L'estimation des quantités de CO₂ produites par combustion des différents constituants du GN suppose une combustion complète, c'est-à-dire qu'elle ne génère que du CO₂ et H₂O.

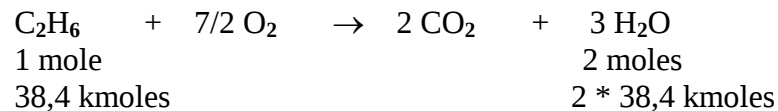
Les différentes réactions de combustion mises en jeu sont :

❖ Pour le méthane (CH₄) :



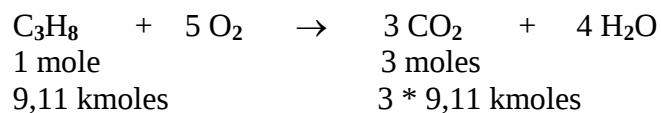
Soit : $D_{\text{CO}_2} = 449,27 \text{ kmol/h}$

❖ Pour l'éthane (C₂H₆) :



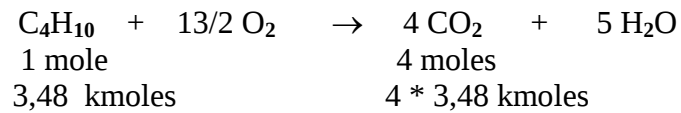
Soit : $D_{\text{CO}_2} = 76,79 \text{ kmol/h}$

❖ Pour le propane (C₃H₈) :



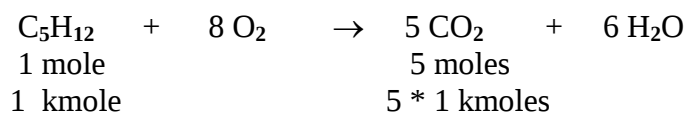
Soit : $D_{\text{CO}_2} = 27,34 \text{ kmol/h}$

❖ Pour le butane (C_4H_{10}):



Soit : $D_{CO_2} = 13,9 \text{ kmol/ h}$

Pour le pentane (C_5H_{12}):



Soit: $D_{CO_2} = 5 \text{ kmol/ h}$

En ajoutant l'ensemble de ces quantités de CO_2 émises par la combustion de chacun des hydrocarbures constituant le GN, on peut estimer la quantité globale de CO_2 de la centrale hybride lors de la marche "jour" tableau 1.6.

$$D_{CO_2} = 573,56 \text{ kmol/ h}$$

Cette quantité de CO_2 correspond à une masse de :

$$M_{CO_2(j)} = D_{CO_2} * 44 = 25\,236.64 \text{ Kg/h}$$

Les données climatiques détaillées établies sur une année par l'ONM indiquent une durée moyenne journalière d'ensoleillement de 9,5 heures. Ce qui signifie que la contribution journalière à la masse de CO₂ dégagée en marche "jour" par la centrale hybride est de :

$$M_{CO_2(J)} = 23\,538. * 9,5 \approx 239\,748.08 \text{ Kg/j}$$

Soit annuellement :

$$M_{CO_2(J)} = 223\,613.28 * 365 \approx 87\,508\,049.2 \text{ Kg/ an}$$

1.6.3-b Marche "nuit "

Dans ce cas de figure, il n'y a plus d'apport solaire, et donc les brûleurs des fours des chaudières doivent être mis en marche, ce qui signifie une consommation de combustible supérieure à la marche "jour".

La consommation de gaz naturel (GN) prévu est de 14 490 kg/ h, soit :

$$D_{GN} = 14\,490 \text{ kg/ h} = 14\,490 / M_{GN} = 784,62 \text{ kmols/ h}$$

Sachant que la masse molaire du GN est égale à 18,47 kg/ kmole

Nous avons rassemblé dans le tableau 1-7 les compositions molaires et les débits molaires partiels des constituants du GN nécessaires à la détermination des quantités de CO₂ émises par la combustion de chacun de ces hydrocarbures.

Tableau 1.7: Composition et débits molaires partiels des constituants du GN consommé en marche "nuit" par la centrale hybride et estimation des quantités de CO₂ dégagées par combustion.

Constituants	Masse molaire (kg/ kmole)	Fract. mol. y _i (% mol.)	Masse mol. partielle M _i (kg/ kmole)	Débit mol. partiel D _i (kmole/ h)	Q _{CO2} (kmole/ h)
CH ₄	16	85,3	13,65	669,28	669,28
C ₂ H ₆	30	7,29	2,19	57,20	114,40
C ₃ H ₈	44	1,73	0,76	13,57	40,72
C ₄ H ₁₀	58	0,66	0,38	5,18	15,54
C ₅ ⁺	72	0,19	0,14	1,49	7,45
He	2	0,15	0,00	1,18	0,00
CO ₂	44	0,24	0,11	1,88	1,88
N ₂	28	4,44	1,24	34,84	0,00
Total	/	100	18,47	784,62	849,27

En procédant de la même manière que précédemment, nous avons estimé ces quantités partielles de CO₂ et donc la quantité totale de gaz carbonique qui serait dégagée lors d'une marche "nuit" tableau 1.7.

$$D_{CO_2} = 849,27 \text{ kmol/ h}$$

Cette quantité de CO₂ correspond à une masse de :

$$M_{CO_2} = D_{CO_2} * 44 \approx 37,27 \text{ tonnes/h}$$

Sur la base retenue précédemment, à savoir 9,5 h/ jour d'ensoleillement, cela signifie que la durée de la marche "nuit" serait de 14,5 h/ jour, soit une contribution journalière de :

$$M_{CO_2} = 37,27 * 14,5 = 541,83 \text{ tonnes de CO}_2/\text{ j}$$

Soit annuellement :

$$M_{CO_2(N)} = 541,83 * 365 \approx 197\,769 \text{ tonnes/ an}$$

1.6.3-c Bilan global (24h)

La quantité globale de CO₂ émise par la centrale hybride sera égale à la somme des contributions des marches "jours" et "nuit" c'est-à-dire pendant les 24 h :

$$M_{CO2total} = M_{CO2(J)} + M_{CO2(N)} = 239,74 + 541,83 = 781,58 \text{ tonnes/ j}$$

$$Q_{CO2total} = 573.56 + 849.27 = 1422,83 \text{ kmoles de CO}_2/ \text{ h}$$

Sachant que la centrale produit 150 Mwh, la quantité de CO₂ dégagée et par Mw serait donc égale à :

$$M_{CO2total} = 5210.54 \text{ Kg de CO}_2/ \text{ Mw produit}$$

Remarque : les données qu'on a utilisées pour les calculs (les débits du gaz naturel et les fractions molaires des composantes y_i) sont obtenues des informations données par les ingénieurs de la station hybride.

1.6.4 L'évaluation des quantités de CO₂ émises par la centrale conventionnelle Tilghemt

Encore une fois, pour bien mettre en évidence les bienfaits de la réalisation de la centrale hybride, nous avons comparé ses performances avec celles de la centrale conventionnelle de Sonelgaz de Tilghemt d'une capacité sensiblement similaire de 220 Mw.

Bien que cette centrale soit dimensionnée pour produire 220 Mw, elle n'a en fait tourné durant l'année 2009 qu'avec une moyenne horaire de 110,5 Mw.

Les chiffres recueillis auprès de Sonelgaz indiquent que la consommation moyenne mensuelle de GN par cette centrale durant cette année 2009 a été de:

$$D_{GN} = 25\,996\,562 \text{ Nm}^3/ \text{ mois}$$

Soit une moyenne de: $D_{GN} = 36\,106,34 \text{ Nm}^3/ \text{ h}$

Equivalent à:

$$D_{GN} = 1\,612 \text{ kmol/ h}$$

Donc, en suivant la même démarche utilisée dans la partie précédente nous avons calculé la quantité de CO₂ émise pendant une marche de 24 heures.

Les résultats sont indiqués dans le tableau 1-8.

Tableau 1.8: Composition et débits molaires partiels des constituants du GN consommé par la centrale conventionnelle et estimation des quantités de CO₂ dégagées par combustion.

Constituants	Masse molaire (kg/ kmole)	Fract. mol. Y_i (% mol.)	Masse mol. partielle M_i (kg/ kmole)	Débit mol. partiel D_i (kmole/ h)	Q_{CO_2} (kmole/ h)
CH₄	16	85.3	13.65	1374.94	1374.94
C₂H₆	30	7.29	2.19	117.51	235.01
C₃H₈	44	1.73	0.76	27.89	83.66
C₄H₁₀	58	0.66	0.38	10.64	31.92
C₅⁺	72	0.19	0.14	3.06	15.31
He	2	0.15	0.00	2.42	0.00
CO₂	44	0.24	0.11	3.87	3.87
N₂	28	4.44	1.24	71.57	0.00
Total	/	100,00	18.47	1611.89	1744.71

$$Q_{CO_2} = 1\,744,71 \text{ kmol/ h}$$

$$Q_{CO_2} = 41\,873 \text{ kmol/ j}$$

$$Q_{CO_2} = 1744,71 * 44 = 76\,767.24 \text{ Kg/h}$$

$$Q_{CO_2} = 1\,842\,413.8 \text{ Kg/ j}$$

$$Q_{CO_2} = 672\,481\,032 \text{ Kg/an}$$

Sachant qu'on a pris comme base de calcul les données de l'année 2009 et que durant cette période, la centrale n'a produit que 110,5 Mwh, la quantité de CO₂ dégagée par Mw d'électricité produit serait donc égale à :

$$Q_{CO_2} = 16\,673.42 \text{ Kg de CO}_2/\text{Mw produit}$$

1.6.4-a Calcul des écarts

Pour pouvoir comparer les performances des deux centrales, nous avons ramené la quantité de CO₂ émise par les deux centrales par Mw produit, puisqu'elles ne produisent pas en fait la même puissance.

Nous avons regroupé dans le tableau 1.9 ci-dessous les quantités de CO₂ émises par les deux centrales. Ces quantités sont exprimées en différentes unités.

Tableau 1.9: Tableau comparatif entre les quantités de CO₂ émises par les deux centrales.

	Hybride	Sonelgaz	Ecart (%)
Puissance produite (MW)	150	110,5	/
Q_{CO2} (Kg/ j)	781582.36	1842413.8	57,57
Q_{CO2} (Kg/ MW)	5210.98	16673.42	68,74

1.6.4-b Evaluation technico économique

* Estimation de la quantité du gaz naturel économisée

La quantité de gaz naturel utilisée par la centrale hybride est :

$$M_{GN} \approx 296\,289 \text{ kg/jour}$$

$$M_{GN} \approx 108\,145\,485 \text{ Kg/ an}$$

$$V_{GN} \approx 359\,344.72 \text{ m}^3/\text{ jour}$$

$$V_{GN} \approx 131\,160\,823 \text{ m}^3/\text{ an}$$

La quantité de gaz naturel utilisée par la centrale conventionnelle est :

$$M_{GN} \approx 714\,567.36 \text{ Kg/ jour}$$

$$M_{GN} \approx 260\,817\,086 \text{ Kg/ an}$$

$$V_{GN} \approx 866\,552.16 \text{ m}^3/\text{ jour}$$

$$V_{GN} \approx 311\,958\,744 \text{ m}^3/\text{ an}$$

La quantité du gaz naturel pouvant être économisée grâce à cette nouvelle technologie qu'est l'hybride, sera donc la différence entre ces deux valeurs :

$$M_{(GN \text{ économisée})} \approx 714\,567.36 - 296\,289 = 418\,278.36 \text{ Kg/Jour}$$

$$M_{(GN \text{ économisée})} \approx 260\,817\,086 - 108\,145\,485 = 152\,671\,610 \text{ Kg/an}$$

$$V_{(GN \text{ économisée})} \approx 866\,552.16 - 359\,344.72 = 507\,207.44 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$V_{(GN \text{ économisée})} \approx 311\,958\,744 - 131\,160\,823 = 180\,797\,921 \text{ m}^3/\text{ an}$$

* Estimation du cout du gaz naturel économisé :

Etant donné que le prix d'un normale m^3 est de 12 DA, donc le cout du gaz naturel économisé grâce à l'utilisation du cycle combiné (gaz/solaire) par an sera :

_ Le cout du GN utilisé par la station hybride est :

$$C_{GN} \approx 359\,344.72 \times 12 = 4\,312\,136.6 \text{ DA/jour}$$

$$C_{GN} \approx 131\,160\,823 \times 12 = 1\,573\,929\,876 \text{ DA/an}$$

_ Le cout du GN utilisé par la station conventionnelle est :

$$C_{GN} \approx 866\,552.16 \times 12 = 10\,398\,625.92 \text{ DA/jour}$$

$$C_{GN} \approx 311\,958\,744 \times 12 = 3\,743\,504\,928 \text{ DA/an}$$

_ la différence de cout sera :

$$C_{GN\text{économisé}} \approx 10\,398\,625.92 - 4\,312\,136.6 = 6\,086\,489.32 \text{ DA/jour}$$

$$C_{GN\text{économisé}} \approx 3\,743\,504\,928 - 1\,573\,929\,876 = 2\,169\,575\,052 \text{ DA/an}$$

1.7 Conclusion

1- Au regard des résultats obtenus ci-dessus, on constate que la quantité de CO₂ émise par la centrale hybride, exprimée en Kg par Mw, représente 68,74 % en moins de celle émise par la centrale de Sonelgaz.

La quantité de CO₂ en Kg par jour produit émise par la centrale hybride est 57.57 % inférieure à celle émise par la centrale de Sonelgaz.

Malgré que la puissance de la centrale hybride soit plus élevée que celle de la centrale conventionnelle, 110.5Mw et 150Mw, cette dernière émet plus de quantité de CO₂ dans l'atmosphère.

2-D'après les résultats obtenus dans l'évaluation technico économique, nous constatons que le procédé utilisé dans la centrale hybride permettra un bénéfice très appréciable grâce à l'économie de quantités considérables de gaz naturel.

Ce qui montre clairement et met en évidence l'intérêt environnemental de ce genre d'énergie propre et renouvelable, qui permettra de préserver notre atmosphère et l'équilibre de notre écosystème tout en contribuant à un développement durable.

Chapitre 2

Etude et Evaluation des Aspects Environnementaux des deux Stations.

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'identification et l'évaluation des aspects et des impacts environnementaux de la centrale hybride et de la centrale conventionnelle sur l'environnement de Hassi R'mel.

Pour identifier les différents aspects environnementaux des deux stations, nous avons choisi d'adopter deux méthodes :

- 1- La première est basée sur nos observations pendant nos visites sur terrain
- 2- La deuxième consiste à utiliser la matrice de LEOPOLD.

2.2 Identification des aspects environnementaux de la station hybride :

Notre but est d'identifier tous les impacts possibles et remarquables pendant toutes les phases de la réalisation et du fonctionnement du projet.

Le tableau ci-dessous est divisé en deux parties présentant les deux phases de construction et d'exploitation de la station, et récapitule tous les impacts de chaque phase, leurs sources et même les éléments de l'environnement qui pourraient être touchés.

Tableau 2.1 Identification des impacts de la station hybride sur l'environnement.

phase	Nature d'impact	Nature du danger	Sources	Conséquences	Le milieu récepteur						
					Air	Eau	sol	Faune / Flore	Population	Ouvriers	Voisinage
Construction	Pollution d'air	Poussière	Travaux de terrassement et mouvement des engins	* augmentation du taux de brouillard. * réduction de la visibilité. * chute de la poussière sur les zones proches.	+	-	-	-	-	+	-
	Nuisances sonores	Bruit	Toutes les activités de construction (tous types déplacement)	* diminution de la capacité. * augmentation du risque d'accidents de travail.	-	-	-	-	-	+	+
	Modification de paysage	Déchets ménagers et solides	*bases de vies installation des équipements de construction * Travaux de remblai.	*diminution de l'attraction du site. *odeurs et insectes. * contamination du sol.	-	-	+	-	-	+	-
	Perturbation de la circulation	/	Equipement de transport	* accidents de la route. * émanation des particules fines de la poussière. * bruit et vibrations	+ (selon la nature de la charge des véhicules et les conditions du trafic)		-	-	+	+	+
Exploitation	Pollution d'air	*gaz d'échappement *vapeur	Fonctionnement des turbines	*perturbation respiratoire et visuelle	+	-	-	-	-	+	+
	Nuisances sonores	Bruit	Pompes, turbines, et autre machines	*perturbation, fatigue, déconcentration	-	-	-	-	-	+	+
	Modification de paysage	Déchets ménagers	*bases de vies. *bureaux administratifs.	*diminution de l'attraction du site. *odeurs et insectes.	-	-	-	-	-	+	-
	Pollution des sols	Déchets liquides	Le processus de la centrale	* Contamination des sols.	-	+	-	-	-	-	-
	Risques accidentels	/	Fonctionnement de la station (fils électrique turbines...)	*incendie, explosion *risque électrique	+	+	+	+	+	+	+

2.2.1 Interprétation

Dans le tableau précédent le moins (-) signifie que l'élément de l'environnement n'est pas touché par cet impact, et le plus (+) dénote que l'élément de l'environnement pourrait être touché.

A partir du tableau nous pouvons conclure les points suivants :

- La nature des impacts est semblable dans les deux phases mais les sources sont différentes.
- Dans la phase de construction les impacts sont provisoires et peuvent être contrôlés et éliminés à la fin des travaux de construction tandis que dans la phase de fonctionnement les impacts sont permanents et exigent beaucoup plus d'attention.
- Les éléments les plus touchés sont l'air et le sol et les ouvriers de la station.

La deuxième méthode consiste à utiliser la matrice de Léopold pour résumer tous les aspects environnementaux possibles et pour préciser l'environnement récepteur pendant seulement la phase d'exploitation. On a présenté dans la matrice des aspects environnementaux liés au fonctionnement de chaque activité de la centrale.

ACTIVITES		ASPECT ENVIRONNEMENTAL	IMPACTS				
Préchauffage de l'eau			Etre humain	eau	Air	Sol	déchets
Les panneaux Solaire	les miroirs	Eaux usées après lavage		X		X	
		Débris					X
	Tubes d'huile récepteurs	Fuite d'huile		X		X	
	Réservoir d'expansion d'huile	Fuite d'huile		X		X	
Echangeur de chaleur HTF	Réservoir d'eau	Fuite d'eau		X		X	
	Réservoir d'huile	Fuite d'huile		X		X	
	Conduite d'huile	Fuite d'huile		X		X	
	Conduite d'eau	Fuite d'eau		X		X	
Chaudière auxiliaire		Fuite de gaz			X		
		Fuite d'eau		X		X	
		Gaz d'échappement			X		
Pompes	Pompe d'huile caloportrice	Fuite d'huile		X		X	
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau		X		X	
	Pompe d'eau de lavage	Fuite d'eau		X		X	
	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile		X		X	
		Purge intermittente d'huile		X		X	

Production d'électricité							
Turbine à gaz	Compresseur d'air	Machine	X				
		Fuite d'huile sur vanne		X		X	
	Corps de la turbine	Machine	X				
		Gaz d'échappement			X		

	Alternateur	Machine	X				
	Transformateur	Machine	X				
	Les cuves d'huile de lubrification/ refroidissement	Fuite d'huile de lubrification/ refroidissement		X		X	
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile		X		X	
		Purge intermittente d'huile		X		X	
	Pompe d'huile de refroidissement	Fuite d'huile		X		X	
		Purge intermittente d'huile		X		X	
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau		X		X	

Turbine à vapeur	Compresseur	Machine	X				
	Corps de la turbine	Machine	X				
		Fuite de vapeur d'eau			x		
	Alternateur	Machine	X				
	Transformateur	Machine	X				
	Les cuves d'huile de lubrification/ refroidissement	Fuite d'huile de lubrification/ refroidissement		X		X	
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile		X		X	
		Purge intermittente d'huile		X		X	
	Pompe d'huile de	Fuite d'huile		X		X	

	refroidissement	Purge intermittente d'huile		X		X	
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau		X		X	
Traitement du gaz naturel							
Station de mesure		Fuite de gaz	X		X		
Station de régulation de la pression		Fuite d'huile de lubrification		X		X	
Ballon de récupération d'eau		Fuite d'eau		X		X	
Production de vapeur							
Chaudière de récupération HRSG	Tuyauterie d'alimentation d'eau	Fuite d'eau		X		X	
	Tuyauterie de vapeur sous pression	Fuite de vapeur			X		
	Système de by-pass des fumées	Gaz d'échappement			X		
	Bruleur	Gaz d'échappement			X		
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile		X		X	
		Purge intermittente d'huile		X		X	
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau		X		X	
Condensation de vapeur							
Les aérocondenseurs	Système by-pass de vapeur	Fuite de vapeur			X		
	Vanne de conduite de vapeur	Fuite de vapeur			X		
	Collecteur d'eau condensée	Fuite d'eau		X		X	

	Réservoir d'eau condensée	Fuite d'eau		X		X	
	pompes	Fuite d'eau		X		X	
	Ventilateur axial	Machine	X				
	Moteur électrique	Machine	X				
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile		X		X	
		Purge intermittente d'huile		X		X	
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau		X		X	
Traitement d'air							
Station de traitement d'air	Aspirateur	Machine	X				
	Filtre	Déchet					X
	Compresseur	Machine	X				
Traitement d'eau							
Station de traitement de l'eau utilisée dans le procédé (PTA)	Unité de filtration	Fuite d'eau		X		X	
	Unité d'osmose inverse	Fuite de produit chimique		X		X	
	Unité d'ionisation	Déversement/fuite de produit chimique		X		X	
	Unité de déminéralisation	Déchets					X

Station de traitement des eaux usées issus du procédé (PTE)	Cuve de collection d’eau usée	Eau usée		X		X	
	Station de traitement des boues	Déchets					X
Pompes	Pompes d’eau traitée	Purge intermittente d’eau traitée					
	Pompes d’huile	Fuite d’huile		X		X	
		Purge intermittente d’huile		X		X	
Equipement auxiliaire							
Générateur de secoure diesel	Moteur diesel	Les gaz d’échappement			X		
		Machine	X				
Bloc anti-incendie	Réservoir d’eau brute anti-incendie	Fuite d’eau			X		X
Réservoir d’eau de service		Fuite d’eau		X		X	
Réservoir d’huile de lubrification		Fuite d’huile		X		X	
Magasins de stockage	Aire pièce détachées	Déchets					X
	Aire de produits chimique	Fuite/déversement de produit chimique		X		X	
	Aire des huiles	Fuite/déversement d’huile		X		X	
	Aire habillement et produit d’entretien	Déchets					X
Analyses							

laboratoire		Eaux usées		X		X	
		Déversement de produits chimiques		X			
		Déchets divers					X
Activités humaines							
Ateliers, maintenance, bureaux et espace de vie		Produits d'entretien		X		X	
		Déchets issue des bureaux					X
		Déchets des locaux de vie					X
		Rejets des eaux sanitaires		X		X	
Bloc salle de contrôle	Salle de contrôle, bureau et sanitaire	Déchets					X
Activités Médicales	Infirmierie	Produits chimiques, pansement					X

Tableau 2.2 Identification des aspects environnementaux de la station hybride durant l'exploitation.

On peut observer les points suivants :

- Dans le champ solaire l'huile qui circule par la tuyauterie de miroirs présente le seul élément dangereux mais juste dans le cas d'une fuite.
- Les aspects environnementaux principaux sont les fuites d'eau, de pétrole et de gaz.
- Les éléments les plus touchés par les différentes activités du fonctionnement de la station sont : l'air, l'eau et le sol.
- Les gaz nocifs sont produits principalement par les turbines.

2.3 Evaluation des aspects environnementaux.

Pour l'évaluation des aspects environnementaux de la station hybride, nous avons appliqué la méthode "Kinney", c'est une méthode d'analyse qui permet de calculer un risque quelconque et voir s'il entre dans la catégorie des risques acceptables. Le degré d'importance d'un impact (le degré de significativité) dépend de la fréquence d'apparition et de la gravité.

$$\text{RISQUE IMPACT} = \text{FREQ} \times \text{GRAVITE}$$

La gravité est en fonction de 4 facteurs, et est égale à leur produit : l'effet sur le milieu, la génération des déchets, la conformité à la réglementation et les barrières et moyens de maîtrise existante.

Tab 2.3 Grille d'évaluation

						Fréquence										
Critère Indications		Effet sur le milieu	Conformité a la réglementation	Génération des déchets	Barrières et moyens de maitrise											
								très rare « 1 fois/ 30 ans »	Rare plus d'1 fois/30 ans)	Peut arriver mais peu probable 1 fois / an	Peut arriver 1 fois / mois	Frequent 1 fois/semaine				
Gravité	1	Négligeable sans effet	Pas de réglementation	Génération de déchets inertes	Maitrise totale action complete			1	2	3	4	5				
						Mineur : < 4	1	1	2	3	4	5				
	2	Mineur sans effet irréversible	Exigence moyenne	Déchets ménagers Et assimilés	Maitrise action partielle	faible : 5 - 9	2	2	4	6	8	10				
								Moyen 10 -29	3	3	6	9	12	15		
										Fort 30 -60	4	4	8	12	16	20
												Critique > 60	5	5	10	15



Impact significatifs (S)



à surveiller (AS)



Impact Non significatif (NS)

Les abréviations suivantes sont employées :

- G : Gravité
- F : Fréquence
- E.E : Effet sur l'environnement
- G.D : Génération des déchets
- C.R : Conformité à la réglementation
- B.M : Barrières et des moyens de maîtrise
- M. S : Marque de significativité

Finalement, les impacts peuvent être classés en trois groupes :

Impacts significatifs(**S**) : avec un indice de 12 à 25 et qui sont donc assez conséquents sur l'environnement.

Impacts à surveiller(**AS**) : avec un indice entre 8 et 10.

Impacts non significatifs : avec un indice entre 1 et 6.

Les résultats sont présentés dans le tableau 2.4

ACTIVITIES		ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX	Gravité				score	G	F	S.M
			E.E	G.D	C.R	B.M				
Water preheating										
Les panneaux Solaire	les miroirs	Eaux usées après lavage	2	/	3	2	12	3	2	6
		Débris	1	1	2	1	2	1	2	2
	Tubes d’huile récepteurs	Fuite d’huile	3	/	3	1	9	2	3	6
	Réservoir d’expansion d’huile	Fuite d’huile	3	/	3	1	9	2	3	6
Echangeur de chaleur HTF	Réservoir d’eau	Fuite d’eau	2	/	2	1	4	1	3	3
	Réservoir d’huile	Fuite d’huile	3	/	3	1	9	2	3	6
	Conduite d’huile	Fuite d’huile	3	/	3	1	9	2	3	6
	Conduite d’eau	Fuite d’eau	2	/	2	1	4	1	3	3
Chaudière auxiliaire		Fuite de gaz	3	/	3	2	18	3	2	6
		Fuite d’eau	2	/	2	1	4	1	3	3
		Gaz d’échappement	3	/	3	3	27	3	5	15
pompes	Pompe d’huile caloportrice	Fuite d’huile	2	/	3	1	6	2	3	6
	Pompe d’eau de refroidissement	Fuite d’eau	2	/	2	1	4	1	3	3
	Pompe d’eau de lavage	Fuite d’eau	2	/	2	1	4	1	3	3
	Pompe d’huile de lubrification	Fuite d’huile	3	/	3	1	9	2	3	6
		Purge intermittente d’huile	2	/	3	1	6	2	3	6
Production d’électricité										
Turbine à gaz	Compresseur d’air	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
		Fuite d’huile sur vanne	3	/	3	1	9	2	3	6

	Corps de la turbine	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
		Gaz d'échappement	3	/	3	3	27	3	5	15
	Alternateur	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
	Transformateur	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
	Les cuves d'huile de lubrification/ refroidissement	Fuite d'huile de lubrification/ refroidissement	3	/	3	1	27	3	2	6
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile	3	/	3	1	9	2	3	6
		Purge intermittente d'huile	2	/	3	1	6	2	4	8
	Pompe d'huile de refroidissement	Fuite d'huile	3	/	3	1	9	2	3	6
		Purge intermittente d'huile	2	/	3	1	6	2	4	8
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau	2	/	2	1	4	1	3	3

Turbine à vapeur	Compresseur	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
	Corps de la turbine	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
		Fuite de vapeur d'eau	2	/	1	1	2	1	3	3
	Alternateur	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
	Transformateur	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
	Les cuves d'huile de lubrification/ refroidissement	Fuite d'huile de lubrification/ refroidissement	3	/	3	1	9	2	3	6
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile	3	/	3	1	9	2	3	6
		Purge intermittente d'huile	2	/	3	1	6	2	4	8
	Pompe d'huile de	Fuite d'huile	3	/	3	1	9	2	3	6

	refroidissement	Purge intermittente d'huile	2	/	3	1	6	2	4	8
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau	2	/	2	1	4	1	3	3
Traitement du gaz naturel										
Station de mesure		Fuite de gaz	3	/	3	1	9	2	3	6
Station de régulation de la pression		Fuite d'huile de lubrification	3	/	3	1	9	2	3	6
Ballon de récupération d'eau		Fuite d'eau	2	/	2	1	4	1	3	3
Production de vapeur										
Chaudière de récupération	Tuyauterie d'alimentation d'eau	Fuite d'eau	2	/	2	1	4	1	3	3
	Tuyauterie de vapeur sous pression	Fuite de vapeur	3	/	2	1	6	2	3	6
	Système de by-pass des fumées	Gaz d'échappement	3	/	3	3	27	3	5	15
HRSG	Bruleur	Gaz d'échappement	3	/	3	3	27	3	5	15
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile	3	/	3	1	9	2	3	6
		Purge intermittente d'huile	2	/	3	1	6	2	4	8
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau	2	/	2	1	4	1	3	3
Condensation de vapeur										
Les Aérocondenseurs	Système by-pass de vapeur	Fuite de vapeur	2	/	2	1	4	1	4	4
	Vanne de conduite de vapeur	Fuite de vapeur	2	/	2	1	4	1	4	4
	Collecteur d'eau condensée	Fuite d'eau	2	/	2	1	4	1	4	4
	Réservoir d'eau condensée	Fuite d'eau	2	/	2	1	4	1	4	4

	pompes	Fuite d'eau	2	/	2	1	4	1	4	4
	Ventilateur axial	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
	Moteur électrique	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile	3	/	3	1	9	2	3	6
		Purge intermittente d'huile	2	/	3	1	6	2	4	8
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau	2	/	2	1	4	1	3	3
Traitement d'air										
Station de traitement d'air	Aspirateur	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
	Filtre	Déchets	2	1	3	1	6	2	4	8
	Compresseur	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10

Traitement d'eau										
Station de traitement de l'eau utilisée dans le procédé (PTA)	Unité de filtration	Fuite d'eau	2	/	3	1	6	2	3	6
	Unité d'osmose inverse	Fuite de produit chimique	3	/	3	2	18	3	3	9
	Unité d'ionisation	Déversement/fuite de produit chimique	3	/	3	2	18	3	3	9
	Unité de déminéralisation	Déchets	2	/	3	1	6	2	4	8
Station de traitement des eaux usées issus du procédé (PTE)	Cuve de collection d'eau usée	Eau usée	3	/	3	1	9	2	5	10
	Station de traitement des boues	Déchets	2	3	3	1	18	3	2	6
Pompes	Pompes d'eau traitée	Purge intermittente d'eau traitée	1	/	1	2	2	1	2	2

	Pompes d'huile	Fuite d'huile	3	/	3	1	9	2	3	6
		Purge intermittente d'huile	2	/	3	1	6	2	4	8

Equipment auxiliaires										
Générateur de secours diesel	Moteur diesel	Les gaz d'échappement	3	/	3	3	27	3	5	15
		Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
Bloc anti-incendie	Réservoir d'eau brute anti-incendie	Fuite d'eau	2	/	3	1	6	2	3	6
Réservoir d'eau de service		Fuite d'eau	2	/	2	1	4	1	4	4
Réservoir d'huile de lubrification		Fuite d'huile	3	/	3	1	9	2	3	6
Magasins de stockage	Aire pièce détachées	Déchets	3	1	3	1	9	2	3	6
	Aire de produits chimique	Fuite/déversement de produit chimique	3	/	3	2	18	3	4	12
	Aire des huiles	Fuite/déversement d'huile	3	/	3	2	18	3	4	12
	Aire habillement et produit d'entretien	Déchets	2	1	2	1	4	1	4	4
Analyses										
Laboratoire		Eaux usées	3	/	3	1	9	2	4	8

			Déversement de produits chimiques	3	/	3	2	18	3	3	9
			Déchets divers	2	2	3	1	12	3	3	9
Activités humaine											
Ateliers, maintenance bureaux et espace de vie			Produits d'entretien	2	1	2	1	4	1	4	4
			Déchets issue des bureaux	2	1	2	1	4	1	5	5
			Déchets des locaux de vie	1	2	2	1	4	1	5	5
			Rejets des eaux sanitaires	2	2	1	1	4	1	5	5
Bloc salle de contrôle	Salle de contrôle, bureau et sanitaire		Déchets	2	1	1	1	2	1	5	5
Activités médicales	Infirmierie		Produits chimiques, pansement	2	1	3	1	6	2	4	8

Tableau2.4 Tableau représentatif des marques de significativité attribuées à chaque aspect environnemental de la station hybride.

2.3.1 Interpretation

On a utilisé le signe (/) pour montrer que l'activité ne produit pas des déchets. On a évité d'employer le chiffre (1) même si on le considère ainsi dans le calcul de la gravité, parce qu'il indique que l'activité produit des déchets inertes.

- Le champ solaire ne présente aucun impact significatif.
- Il n'y a pas beaucoup d'impacts significatifs généralement les gaz d'échappement parce qu'ils représentent un problème permanent pendant le fonctionnement de la station mais la qualité du gaz utilisé dans le processus assure aucune émission du SO₂, une émission minimale du NO, mais toujours une quantité remarquable du CO₂.

2.4 Etude des aspects environnementaux de la centrale de (Tilghemt).

2.4.1 Identification des aspects environnementaux de la station conventionnelle

Les impacts possibles de cette station sur l'environnement sont résumés dans le tableau 2.5.

<i>ACTIVITES</i>		<i>ASPECT ENVIRONNEMENTAL</i>	<i>IMPACTS</i>				
			Etre humain	Eau	air	sol	déchets
Circuit d'alimentation du GN	station de gaz	Fuite de gaz			X		
	Séparation initiale	Fuite de gaz			X		
	Séparation finale	Fuite de gaz			X		
	Filtration	Déchets					X
		Fuite de gaz			X		
Chauffe de gaz	Chaudière	Gaz d'échappement			X		
Détente	Réservoir de condensat	Fuite de condensat		X		X	
	Réservoir d'eau	Fuite d'eau		X		X	
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile de lubrification		X		X	
	Pompe d'huile de refroidissement	Fuite d'huile de refroidissement		X		X	
	Pompe d'eau	Fuite d'eau de refroidissement		X		X	
Production d'électricité							
Turbine à gaz	Compresseur d'air	Machine	X				
		Fuite d'huile sur vanne		X		X	

	corps de la turbine	Gaz d'échappement			X		
		Machine	X				
	Transformateur	Machine	X				
	Alternateur	Machine	X				
	Cuves d'huile de lubrification et de refroidissement	Fuite d'huile de lubrification et de refroidissement		X		X	
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile de lubrification		X		X	
		Purge intermittente d'huile de lubrification		X		X	
	Pompe d'huile de refroidissement	Fuite d'huile de refroidissement		X		X	
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau de refroidissement		X		X	
Réservoirs	Réservoir d'eau	Fuite d'eau		X		X	
	Réservoir de condensat	Fuite de condensat		X		X	
	Réservoir de méthanol	Fuite de méthanol		X		X	
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile de lubrification		X		X	
		Purge intermittente d'huile de lubrification		X		X	
	Pompe d'huile de refroidissement	Fuite d'huile de refroidissement		X		X	
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau de refroidissement		X		X	
Générateur	Système de refroidissement air/eau	Fuite d'huile de lubrification		X		X	
		Fuite d'huile diélectrique		X		X	

		Déchets divers					X
Equipment auxiliaires							
Générateur de secours diesel	Moteur diesel	Les gaz d'échappement			X		
		Machine	X				
	Réservoir gazoil	L'huile de vidange		X		X	
		Fuite de gazoil		X		X	
Magasins de stockage	Aire pièce détachées	Déchets					X
	Aire de produits chimique	Fuite/déversement de produit chimique		X		X	
	Aire des huiles	Fuite/déversement d'huile		X		X	
	Aire habillement et produit d'entretien	Déchets					X
Analyses							
Laboratoire		Eaux usées		X		X	
		Déversement de produits chimiques		X		X	
		Déchets divers					X
Activités humaines							
Ateliers, maintenance, bureaux et espace de vie		Produits d'entretien					X
		Déchets issue des bureaux					X
		Déchets des locaux de vie					X
		Rejets des eaux sanitaires		X		X	
Bloc salle de contrôle	Salle de contrôle, bureau et	Déchets					X

	sanitaire	Fuite de produits d'extinction					X
Activités médicale	Infirmierie	Produits chimiques, pansement					X

Tableau 2.5: Identification des aspects environnementaux de la station conventionnelle.

2.4.2 Interprétation

- Les trois éléments de l'environnement : l'air, l'eau et le sol sont les plus touchés par les activités de cette station conventionnelle.
- Comme dans la station hybride les fuites de gaz, d'huile et d'eau sont les aspects environnementaux principaux.
- La fuite du méthanol et de condensat représentent des aspects environnementaux additionnels.

2.4.3 Evaluation des aspects environnementaux de la centrale conventionnelle.

En suivant la même démarche de l'évaluation utilisée dans la partie précédente (la méthode de Kinney), nous avons obtenu le tableau 2.6.

<i>ACTIVITIES</i>		<i>ASPECTS ENVIRONNEMENTALS</i>	<i>Gravité</i>				<i>score</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>MS</i>
			<i>E.E</i>	<i>G.D</i>	<i>C.R</i>	<i>B.M</i>				
Circuit d'alimentation du GN	station de gaz	Fuite de gaz	3	/	3	1	9	2	2	4
	Séparation initiale	Fuite de gaz	3	/	3	1	9	2	2	4
	Séparation finale	Fuite de gaz	3	/	3	1	9	2	2	4
	Filtration	Déchets	2	1	3	1	6	2	4	8
		Fuite de gaz	3		3	1	9	2	2	4
Chauffe de gaz	Chaudière	Gaz d'échappement	3	/	3	3	27	3	5	15
Détente	Réservoir de condensat	Fuite de condensat	3	/	3	2	18	3	3	9
	Réservoir d'eau	Fuite d'eau	2	/	2	1	4	1	3	3
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile de lubrification	3	/	3	2	18	3	3	9
	Pompe d'huile de refroidissement	Fuite d'huile de refroidissement	3	/	3	2	18	3	3	9
	Pompe d'eau	Fuite d'eau de refroidissement	3	/	2	2	1	3	3	9
Production d'électricité										

Turbine à gaz	Compresseur d'air	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
		Fuite d'huile sur vanne	3	/	3	2	18	3	3	9
	corps de la turbine	Gaz d'échappement	3	/	3	3	27	3	5	15
		Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
	Transformateur	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
	Alternateur	Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
	Cuves d'huile de lubrification et de refroidissement	Fuite d'huile de lubrification et de refroidissement	3	/	3	2	18	3	3	9
Pompes	Pompe d'huile de lubrification	Fuite d'huile de lubrification	3	/	3	2	18	3	3	9
		Purge intermittente d'huile de lubrification	3	/	3	2	18	3	4	12
	Pompe d'huile de refroidissement	Fuite d'huile de refroidissement	3	/	3	2	18	3	3	9
	Pompe d'eau de refroidissement	Fuite d'eau de refroidissement	2	/	2	2	8	2	3	6
Réservoirs	Réservoir d'eau	Fuite d'eau	2	/	2	2	8	2	3	6
	Réservoir de condensat	Fuite de condensat	3	/	3	2	18	3	3	9

	Réservoir de méthanol	Fuite de méthanol	3	/	3	2	18	3	3	9
Pompes	Pompe d’huile de lubrification	Fuite d’huile de lubrification	3	/	3	2	18	3	3	9
		Purge intermittente d’huile de lubrification	3	/	3	2	18	3	4	12
	Pompe d’huile de refroidissement	Fuite d’huile de refroidissement	3	/	3	2	18	3	3	9
	Pompe d’eau de refroidissement	Fuite d’eau de refroidissement	2	/	2	2	8	2	3	6
Générateur	Système de refroidissement air/eau	Fuite d’huile de lubrification	3	/	3	2	18	3	3	9
		Fuite d’huile diélectrique	3	/	3	2	18	3	3	9
		Déchets divers	3	2	3	1	18	3	4	12
Equipements auxiliaires										
Générateur de secours diesel	Moteur diesel	Les gaz d’échappement	3	/	3	3	27	3	5	15
		Machine	3	/	3	1	9	2	5	10
	Réservoir gazoil	L’huile de vidange	3	/	3	2	18	3	3	9
		Fuite de gazoil	3	/	3	2	18	3	3	9
Magasins de stockage	Aire pièce détachées	Déchets	3	1	3	2	18	3	4	12
	Aire de produits chimique	Fuite/déversement de produit chimique	3	/	3	2	18	3	3	9

	Aire des huiles	Fuite/déversement d'huile	3	/	3	2	18	3	3	9
	Aire habillement et produit d'entretien	Déchets	2	1	3	2	12	3	4	12
Analyses										
Laboratoire		Eaux usées	2	1	3	2	12	3	3	9
		Déversement de produits chimiques	3	/	3	2	18	3	3	9
		Déchets divers	2	2	3	2	24	3	4	12
Activités humaine										
Ateliers, maintenance, bureaux et espace de vie		Produits d'entretien	3	1	2	2	12	3	4	12
		Déchets issue des bureaux	2	2	3	1	12	3	4	12
		Déchets des locaux de vie	2	2	3	1	12	3	5	15
		Rejets des eaux sanitaires	2	1	2	1	4	1	5	5
Bloc salle de contrôle	Salle de contrôle, bureau et sanitaire	Déchets	2	1	3	1	6	2	5	10
		Fuite de produits d'extinction	3	/	3	2	18	3	3	9
Activités médicale	Infirmierie	Produits chimiques, pansement	2	1	2	1	4	1	4	4

Tableau 2.6 représentatif des marques de significativité attribuées à chaque aspect environnemental de la station conventionnelle.

2.5. Interprétation.

Après avoir observé le tableau 2.6 on peut noter que :

- Les gaz d'échappement représentent le problème principal dans cette station comme dans toutes les centrales dépendant seulement sur des combustibles fossiles.
- Il est également évident que tous les différents types de déchets présentent les impacts principaux qui devraient être contrôlés.

2.6 Conclusion

L'application de la méthode kinney a permis l'identification et l'évaluation des aspects environnementaux des deux stations, d'où l'intérêt de l'utilisation des énergies renouvelables pour un développement durable respectueux de l'environnement.

Chapitre 3

Les Génératrices les plus utilisées dans les systèmes éoliens.

3.1 Introduction

Ce chapitre est une présentation des modélisations des différentes génératrices utilisées dans le système éolien, et qui font l'objet d'une continuité de travaux antérieurs.

3.2 Eléments constitutifs d'une éolienne

Une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux :

- Le mât : c'est généralement un tube en acier, il supporte l'ensemble des équipements (nacelle + rotor), il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne, suivant le type de l'éolienne il varie entre 10 et 100m. Etant donné que le vent souffle plus fort en hauteur le mât des éoliennes à axe horizontal est généralement entre 80 et 100m, à l'intérieur sont disposés des câbles de transport de l'énergie électrique, les appareillages de connexions au réseau de distribution (transformateur) ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle.
- La nacelle : qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique tel que l'arbre lent et rapide les roulements, le multiplicateur, le générateur et les systèmes d'orientation des pales et de la nacelle. Pour capter au mieux l'énergie du vent, un calculateur est intégré dans la nacelle, afin d'orienter l'hélice perpendiculairement à la direction du vent, de modifier l'angle de calage des pales dans le cas d'un contrôle pitch, pour contrôler et coordonner tout cela la nacelle contient aussi

divers actionneurs de commande. Les signaux émis par l'anémomètre (appareil qui mesure la vitesse du vent) sont transmis au système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer celle-ci si la vitesse du vent atteint 5m/s ou de l'arrêter si le vent dépasse 25m/s. Pour le système d'orientation de la nacelle, une girouette placée sur la nacelle indique le sens du vent, les signaux transmis à l'ordinateur permettent de commander le système d'orientation de la nacelle face au vent. Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. L'arbre lent relie le moyeu au multiplicateur et est muni d'un système de freinage hydraulique en cas de besoin. La vitesse de rotation de l'hélice est de 12 à 15 tr/min ce qui n'est pas suffisant à un alternateur pour fonctionner correctement, un multiplicateur est donc placé juste avant l'alternateur pour augmenter la vitesse de rotation à environ 1500 tr/min. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique actionné en cas d'urgence.

- Le rotor : est formé par les pales assemblées dans leur moyeu, le nombre de pales varie de 1 à 3, le rotor tripale est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire la pollution visuelle et le bruit. En effet un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.

Tous ces éléments sont représentés par la figure 3.1.

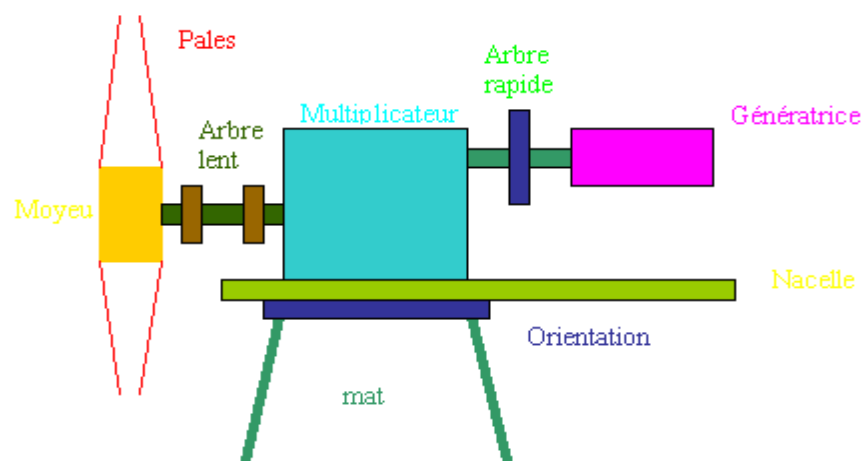


Figure 3.1. Différents éléments constitutifs d'une éolienne [Mul02].

3.3 Principe et théorie d'une éolienne

Le vent est caractérisé par trois grandeurs variables pendant le temps :

Sa direction sa vitesse et son intensité. L'appareil qui mesure le vent et le plus utilisé aujourd'hui est l'anémomètre à coupelle.

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Dans l'hypothèse que la masse volumique de l'air est constante on peut dire que :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

Considérons le système à axe horizontal de la figure 1.5 où v_1 v_2 représentent les vitesses du vent en amont et en aval de l'aérogénérateur, or la vitesse du vent qui traverse le rotor est égale à la moyenne de ces deux vitesses soit :

$$\frac{v_1 + v_2}{2} \quad (3.2)$$

La masse d'air en mouvement en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (v_1 + v_2)}{2} \quad (3.3)$$

La puissance extraite est donnée par la deuxième loi de Newton :

$$P_m = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (3.4)$$

Soit en remplaçant m par son expression (3.3) dans l'équation (3.4), on obtient :

$$P_m = \frac{\rho S (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (3.5)$$

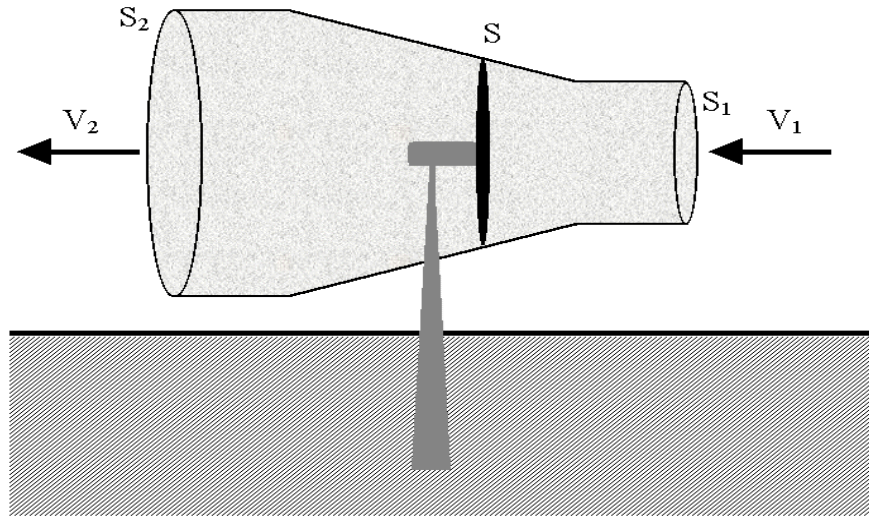


Figure 3.2. Tube de courant d'air autour d'un aérogénérateur.

Pour un vent supposé non perturbé, traversant une surface S à une vitesse v_1 , pendant une unité de temps (1 seconde), on obtient une puissance théorique égale à :

$$P_{mt} = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (3.6)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air.

S représente la surface des pales balayée par la masse d'air en mouvement.

Cependant, le dispositif de conversion extrait une puissance P_m inférieure à la puissance théoriquement récupérable à cause de la vitesse non nulle des masses d'air en amont de la turbine, le coefficient de puissance de l'aérogénérateur est défini par :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} \quad (3.7)$$

D'où :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{v_1}{v_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right)}{2} \quad (3.8)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus figure 3.3 on remarque que ce ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance théorique présente une limite théorique appelée limite de Betz égale à $16/27$ soit 0,59.

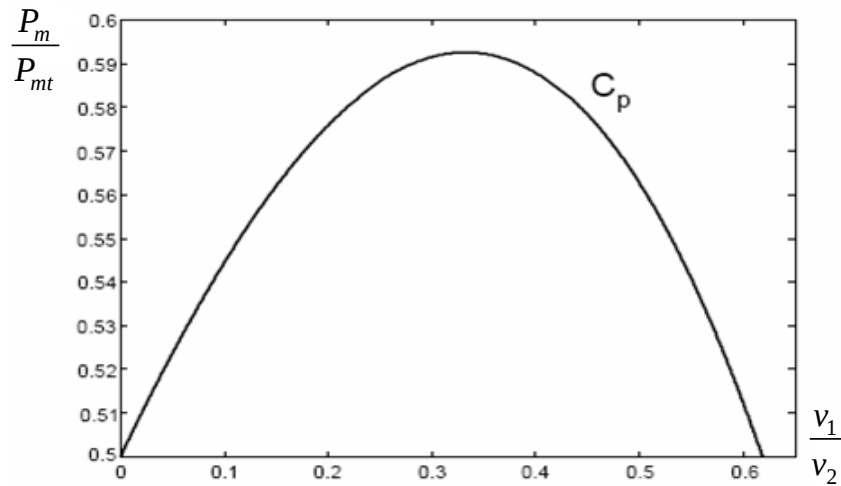


Figure 3.3. Coefficient de puissance.

La formule de Betz montre que l'énergie maximale extractible pour une éolienne ne peut dépasser 59% de l'énergie cinétique du vent.

En réalité certains aérogénérateurs parmi les plus perfectionnés peuvent atteindre jusqu'à 60 à 70% de cette puissance maximale.

En fait ce coefficient de puissance dépend de chaque voilure figure 3.4.

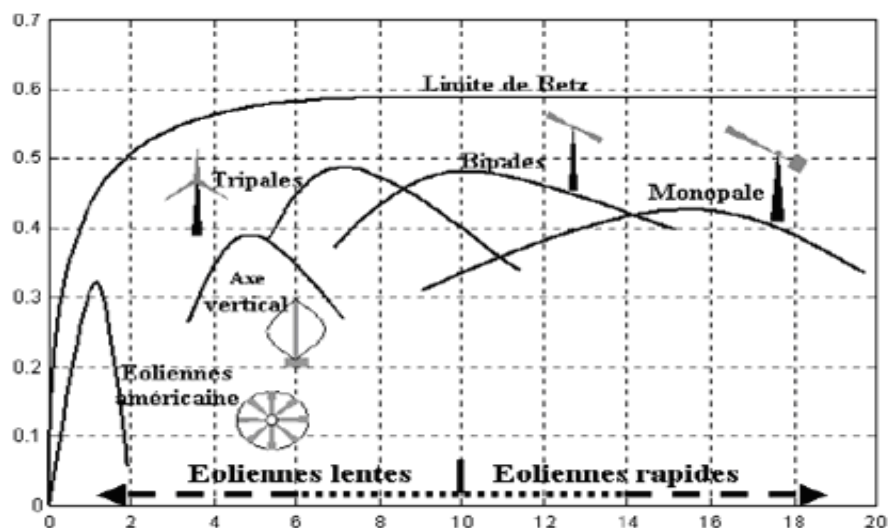


Figure 3.4. Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [Poi03].

3.4 Etude des génératrices asynchrones à cage

3.4.1 Modèle biphasé de la GAS dans le référentiel généralisé

La figure 3.5 représente le schéma équivalent de la GAS dans le référentiel de Park généralisé (u, v) [Pal05], [Sey03].

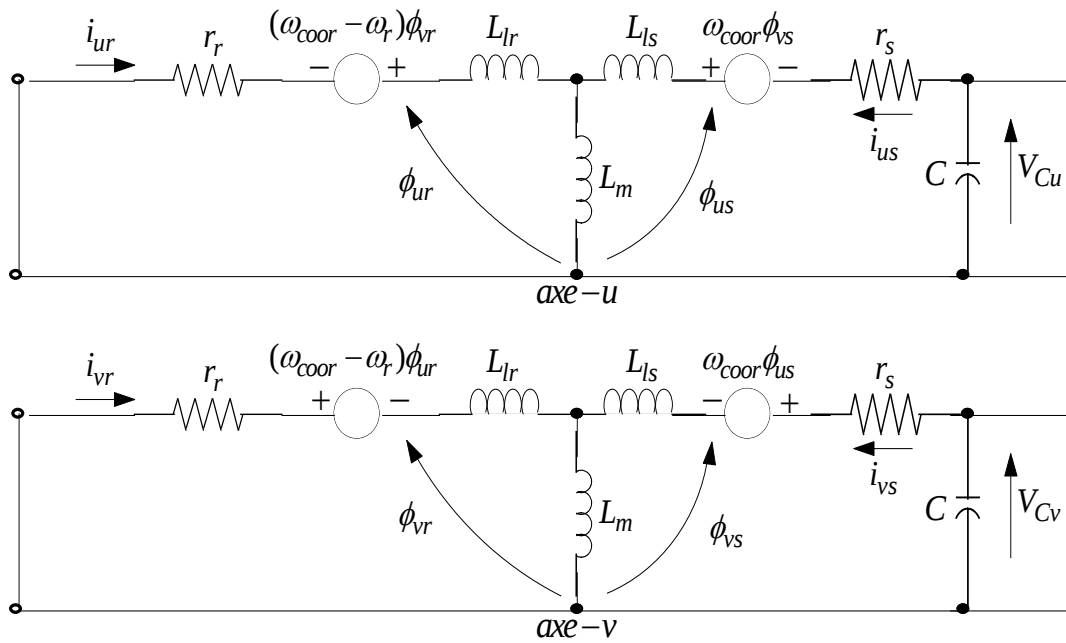


Figure 3.5. Schéma équivalent de la GAS dans le référentiel de Park généralisé.

Les systèmes d'équations différentielles de la GAS suivant le référentiel de Park généralisé (u, v) sont :

1. Equations électriques :

$$\begin{cases} -v_{us} = r_s i_{us} + \frac{d}{dt} \phi_{us} - \omega_{coor} \phi_{vs} \\ -v_{vs} = r_s i_{vs} + \frac{d}{dt} \phi_{vs} + \omega_{coor} \phi_{us} \\ v_{ur} = 0 = r_r i_{ur} + \frac{d}{dt} \phi_{ur} - (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{vr} \\ v_{vr} = 0 = r_r i_{vr} + \frac{d}{dt} \phi_{vr} + (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{ur} \end{cases} \quad (3.9)$$

2. Equations des flux magnétiques :

$$\begin{cases} \phi_{us} = L_s i_{us} + L_m i_{ur} \\ \phi_{vs} = L_s i_{vs} + L_m i_{vr} \\ \phi_{ur} = L_r i_{ur} + L_m i_{us} \\ \phi_{vr} = L_r i_{vr} + L_m i_{vs} \end{cases} \quad (3.10)$$

3.4.2 Modèle biphasé de la GAS lié au stator

Le système d'axe (α, β) est immobile par rapport au stator, d'où $\omega_{\text{coor}} = 0$. Cependant, en remplaçant dans les systèmes d'équations (3.9) et (3.10) les indices (u, v) par (α, β) , on obtient les systèmes d'équations suivants :

$$\begin{cases} -v_{\alpha s} = r_s i_{\alpha s} + \frac{d}{dt} \phi_{\alpha s} \\ -v_{\beta s} = r_s i_{\beta s} + \frac{d}{dt} \phi_{\beta s} \\ v_{\alpha r} = 0 = r_r i_{\alpha r} + \frac{d}{dt} \phi_{\alpha r} + \omega_r \phi_{\beta r} \\ v_{\beta r} = 0 = r_r i_{\beta r} + \frac{d}{dt} \phi_{\beta r} - \omega_r \phi_{\alpha r} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} \phi_{\alpha s} = L_s i_{\alpha s} + L_m i_{\alpha r} \\ \phi_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + L_m i_{\beta r} \\ \phi_{\alpha r} = L_r i_{\alpha r} + L_m i_{\alpha s} \\ \phi_{\beta r} = L_r i_{\beta r} + L_m i_{\beta s} \end{cases} \quad (3.12)$$

Les inductances propres et mutuelles figurant dans les relations du système (3.12) sont données par [Bel96], [Abd97] :

$$\begin{cases} L_s = L_{m\alpha} + \ell_{\sigma\alpha s} + \ell_{\sigma\alpha sr} = L_{\alpha s} \\ L_s = L_{m\beta} + \ell_{\sigma\beta s} + \ell_{\sigma\beta sr} = L_{\beta s} \\ L_r = L_{m\alpha} + \ell_{\sigma\alpha r} + \ell_{\sigma\alpha sr} = L_{\alpha r} \\ L_r = L_{m\beta} + \ell_{\sigma\beta r} + \ell_{\sigma\beta sr} = L_{\beta r} \\ L_{\alpha sr} = L_{m\alpha} + \ell_{\sigma\alpha sr} \\ L_{\beta sr} = L_{m\beta} + \ell_{\sigma\beta sr} \end{cases} \quad (3.13)$$

En prenant $\ell_{\sigma\alpha sr} = \ell_{\sigma\beta sr} = 0$, avec $L_{\alpha sr} = L_{\beta sr} = L_m$ et en substituant ces grandeurs dans les équations des flux (3.12), on aura :

$$\begin{cases} \phi_{\alpha s} = (L_{m\alpha} + \ell_{\sigma\alpha s})i_{\alpha s} + L_{m\alpha} i_{\alpha r} \\ \phi_{\beta s} = (L_{m\beta} + \ell_{\sigma\beta s})i_{\beta s} + L_{m\beta} i_{\beta r} \\ \phi_{\alpha r} = (L_{m\alpha} + \ell_{\sigma\alpha r})i_{\alpha r} + L_{m\alpha} i_{\alpha s} \\ \phi_{\beta r} = (L_{m\beta} + \ell_{\sigma\beta r})i_{\beta r} + L_{m\beta} i_{\beta s} \end{cases} \quad (3.14)$$

En posant : $\ell_{\sigma\alpha s} = \ell_{\sigma\beta s} = \ell_{\sigma s}$ et $\ell_{\sigma\alpha r} = \ell_{\sigma\beta r} = \ell_{\sigma r}$ et sachant que les inductances cycliques totales statoriques et rotoriques selon (α, β) sont donn es par [Abd97], [Hal91], [Kis06] :

$$\begin{cases} L_{\alpha s} = L_{m\alpha} + \ell_{\sigma s} \\ L_{\beta s} = L_{m\beta} + \ell_{\sigma s} \\ L_{\alpha r} = L_{m\alpha} + \ell_{\sigma r} \\ L_{\beta r} = L_{m\beta} + \ell_{\sigma r} \end{cases} \quad (3.15)$$

et les inductances cycliques de saturation sont exprim es par [Jai02], [Lia98] :

$$L_{m\alpha} = L_m + \frac{i_{m\alpha}}{i_{m\beta}} L_{\alpha\beta} = L \cos^2 \mu + L_m \sin^2 \mu \quad (3.16)$$

$$L_{m\beta} = L_m + \frac{i_{m\beta}}{i_{m\alpha}} L_{\alpha\beta} = L \sin^2 \mu + L_m \cos^2 \mu \quad (3.17)$$

Avec :

$$\cos \mu = \frac{i_{m\alpha}}{|i_m|} \quad (3.18)$$

$$\sin \mu = \frac{i_{m\beta}}{|i_m|} \quad (3.19)$$

L'inductance cyclique d'intersaturation est :

$$L_{\alpha\beta} = \frac{i_{m\alpha} i_{m\beta}}{|i_m|} \cdot \frac{dL_m}{d|i_m|} (L - L_m) \quad (3.20)$$

avec L est l'inductance dynamique donn e par la relation suivante :

$$L = \frac{d|\phi_m|}{d|i_m|} \quad (3.21)$$

et L_m est l'inductance de magnétisation [Hal91], [Sey03] :

$$L_m = \frac{|\overline{\phi_m}|}{|\overline{i_m}|} \quad (3.22)$$

A partir des conditions magnétiques linéaires, il en résulte que : $L_{\alpha\beta} = 0$, $L_{m\alpha} = L_{m\beta} = L_m$, $L_{s\alpha} = L_{s\beta}$ et $L_{r\alpha} = L_{r\beta}$ [Hal91], [Abd97].

L'expression du courant de magnétisation est exprimée par [Sin06a], [Lia98] :

$$i_m = \sqrt{(i_{\alpha s} + i_{\alpha r})^2 + (i_{\beta s} + i_{\beta r})^2} \quad (3.23)$$

En réarrangeant toutes les équations, et en remplaçant les équations des flux dans le système d'équations (3.11), on obtient après tout calcul fait le système d'équations tenant en compte de la saturation du circuit magnétique de la machine suivant [Abd97], [Bel96] :

$$\left\{ \begin{array}{l} -v_{\alpha s} = r_s i_{\alpha s} + \ell_{\sigma s} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + \ell_{m\alpha} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + \ell_{m\alpha} \frac{di_{\alpha r}}{dt} + \ell_{\alpha\beta} \frac{di_{\beta s}}{dt} + \ell_{\alpha\beta} \frac{di_{\beta r}}{dt} \\ -v_{\beta s} = r_s i_{\beta s} + \ell_{\sigma s} \frac{di_{\beta s}}{dt} + \ell_{m\beta} \frac{di_{\beta s}}{dt} + \ell_{m\beta} \frac{di_{\beta r}}{dt} + \ell_{\alpha\beta} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + \ell_{\alpha\beta} \frac{di_{\alpha r}}{dt} \\ 0 = r_r i_{\alpha r} + \ell_{\sigma r} \frac{di_{\alpha r}}{dt} + \ell_{m\alpha} \frac{di_{\alpha r}}{dt} + \ell_{m\alpha} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + \ell_{\alpha\beta} \frac{di_{\beta s}}{dt} + \ell_{\alpha\beta} \frac{di_{\beta r}}{dt} \\ \quad + \omega_r (L_r i_{\beta r} + L_m i_{\beta s}) \\ 0 = r_r i_{\beta r} + \ell_{\sigma r} \frac{di_{\beta r}}{dt} + \ell_{m\beta} \frac{di_{\beta r}}{dt} + \ell_{m\beta} \frac{di_{\beta s}}{dt} + \ell_{\alpha\beta} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + \ell_{\alpha\beta} \frac{di_{\alpha r}}{dt} \\ \quad - \omega_r (L_r i_{\alpha r} + L_m i_{\alpha s}) \end{array} \right. \quad (3.24)$$

3.4.3 Mise du modèle biphasé sous forme d'état

En mettant le système d'équations (3.24) sous forme compacte, on aura :

$$[B][U] = [A][I] + \omega_r [C][I] + [L][\dot{I}] \quad (3.25)$$

Avec :

$$[U] = [v_{\alpha s} \ v_{\beta s} \ 0 \ 0]^T ;$$

$$[I] = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} & i_{\beta s} & i_{\alpha r} & i_{\beta r} \end{bmatrix}^T \text{ et } [\dot{I}] = \frac{d}{dt}[I];$$

$$[B] = \text{diag}[-1 \quad -1 \quad 0 \quad 0];$$

$$[A] = \text{diag}[r_s \quad r_s \quad r_r \quad r_r];$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \\ -L_m & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix};$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{\alpha s} & L_{\alpha \beta} & L_{m\alpha} & L_{\alpha \beta} \\ L_{\alpha \beta} & L_{\beta s} & L_{\alpha \beta} & L_{m\beta} \\ L_{m\alpha} & L_{\alpha \beta} & L_{\alpha r} & L_{\alpha \beta} \\ L_{\alpha \beta} & L_{m\beta} & L_{\alpha \beta} & L_{\beta r} \end{bmatrix}.$$

En mettant (3.25) sous forme d'état, on trouve :

$$[\dot{I}] = [L]^{-1} \{ [B][U] - [A][I] - \omega_r [C][I] \} \quad (3.26)$$

Afin de compléter la relation (3.26), on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique suivante [Sin06a] :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P L_m (i_{\beta s} i_{\alpha r} - i_{\alpha s} i_{\beta r}) \quad (3.27)$$

et celle de la vitesse rotorique dynamique [Sin06a], [Ouh98] :

$$\frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} = C_r - C_{em} \quad (3.28)$$

3.5 Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel généralisé

La théorie de la machine asynchrone à double alimentation est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations statoriques et rotoriques triphasé à des axes perpendiculaires (biphasés), appelés l'axe direct u et axe quadrature v . Pour des raisons de simplification ; nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La machine sera supposée idéale, c'est à dire que les ampères-tours seront supposés distribués sinusoïdalement le long de l'entrefer de la machine et que les harmoniques d'espace seront négligés ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau ;
- Les pertes dans le fer (par hystérésis et courant de Foucault) seront négligées ;
- La saturation du circuit magnétique sera négligée ;
- Les grandeurs homopolaires seront considérées comme nulles.

3.5.1 Modèle biphasé de la GADA dans le référentiel de Park généralisé

La transformée de Park appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes :

- Homopolaire (indice o) ;
- D'axes directs (indice u) ;
- D'axes en quadrature (indice v).

La conversion des variables réelles de la machine en variable de la machine primitive implique la transformation des enroulements de la machine originale en des enroulements disposés selon deux axes u et v , qui a pour effet de rendre des inductances mutuelles et propres du modèle indépendantes de la rotation.

La figure 3.6 représente la disposition système d'axes réel (X_a, X_b, X_c) ainsi que celui d'axes fictifs (u, v) de la GADA.

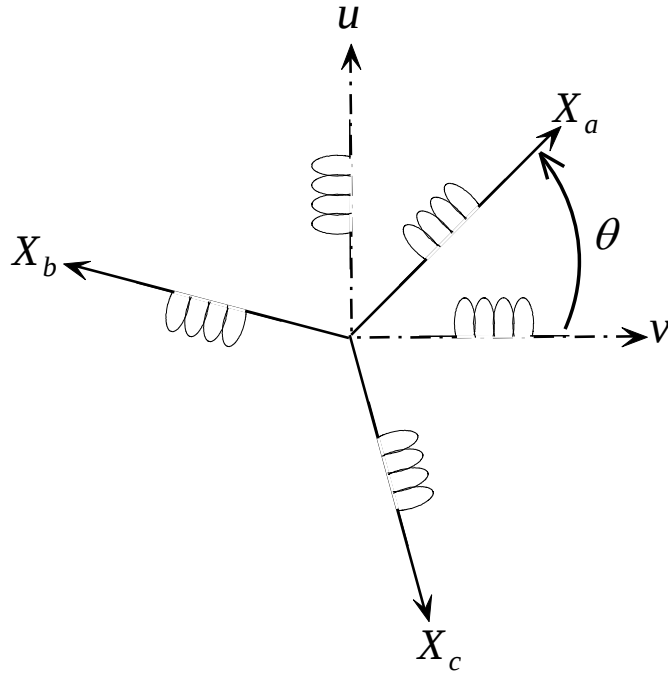


Figure 3.6. Disposition des enroulements de la GADA selon les axes réels et fictifs.

Le passage au système biphasé revient géométriquement à exprimer les composantes (u, v) en fonctions de (X_a, X_b, X_c); de plus cette transformation triphasée doit obligatoirement conserver les F.m.m c'est à dire le champ dans la machine ne doit pas être altéré [Khe07].

La projection des courants réels sur le système d'axes (u, v) s'écrit sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Avec :

$\theta = \int \omega_{\text{coor}} dt$: Angle entre le système d'axes (u, v) et le système d'axes (X_a, X_b, X_c) ;

ω_{coor} : Vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé par rapport au système d'axe triphasé.

Ou bien :

$$[V_p] = [P(\theta)] \times [V_s] \quad (3.30)$$

Où :

La matrice $[p(\theta)]$ est appelée matrice de Park ;

$[v_p]$ est le vecteur des tensions du système d'axes biphasé ;

$[v_s]$ est le vecteur des tensions du système d'axes triphasé.

Pour la transformation inverse, c'est-à-dire pour le passage du système biphasé au système triphasé, on utilise la matrice de Park inverse suivante :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_o \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Ou encore :

$$[V_s] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [V_p] \quad (3.32)$$

La matrice $[p(\theta)]^{-1}$ est appelée matrice de transformation de Park inverse [Abd97].

La figure 3.7 représente le schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park généralisé (u, v) .

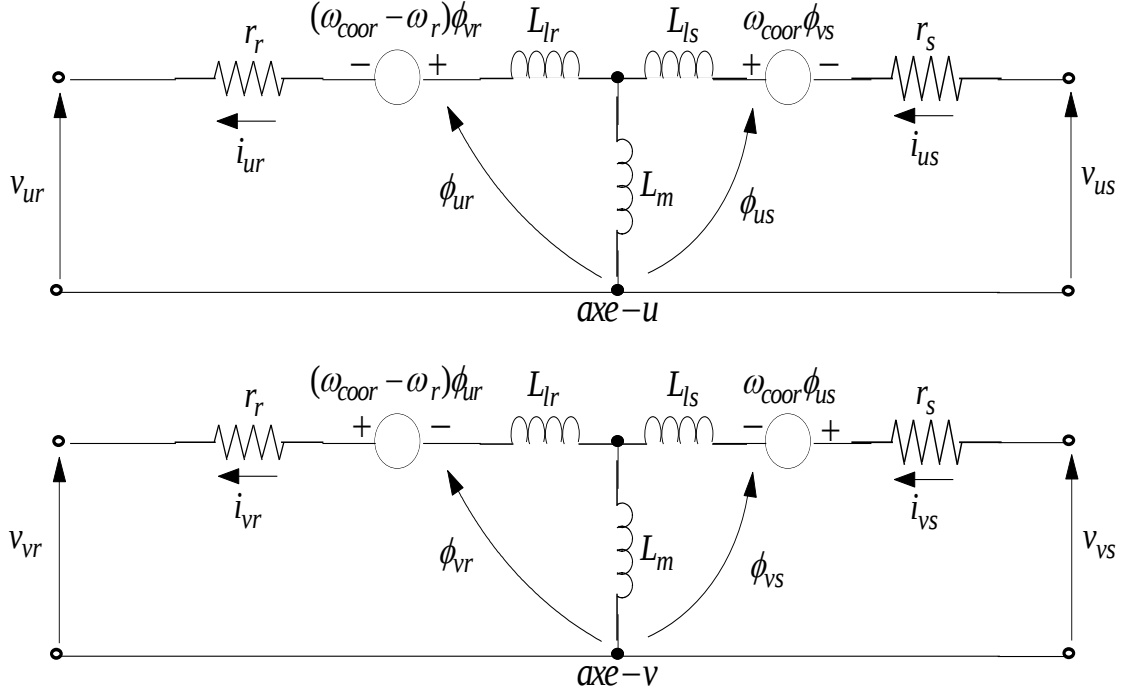


Figure 3.7. Schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park généralisé.

Les systèmes d'équations différentielles de la GADA suivant le système d'axe (u, v) sont :

Equations électriques :

$$\begin{cases} v_{us} = -r_s i_{us} + \frac{d}{dt} \phi_{us} - \omega_{coor} \phi_{vs} \\ v_{vs} = -r_s i_{vs} + \frac{d}{dt} \phi_{vs} + \omega_{coor} \phi_{us} \\ v_{ur} = r_r i_{ur} + \frac{d}{dt} \phi_{ur} - (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{vr} \\ v_{vr} = r_r i_{vr} + \frac{d}{dt} \phi_{vr} + (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{ur} \end{cases} \quad (3.33)$$

Equations des flux magnétiques :

$$\begin{cases} \phi_{us} = -L_s i_{us} + L_m i_{ur} \\ \phi_{vs} = -L_s i_{vs} + L_m i_{vr} \\ \phi_{ur} = L_r i_{ur} - L_m i_{us} \\ \phi_{vr} = L_r i_{vr} - L_m i_{vs} \end{cases} \quad (3.34)$$

Avec :

$$\begin{cases} L_s = L_{ls} + L_m \\ L_r = L_{lr} + L_m \end{cases} \quad (3.35)$$

3.5.2 Modèle biphasé de la GADA lié au champ tournant

Le système d'axe de la GADA dans le repère de Park est immobile par rapport au champ tournant, d'où $\omega_{coord} = \omega_s$. En remplaçant les indices (u, v) par (d, q) et ω_{coord} par ω_s dans les systèmes d'équations (3.33) et (3.34), on aura les systèmes suivants [Abd07] :

Le système d'équations électriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = -r_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = -r_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (3.36)$$

Le système d'équations des flux magnétiques :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \phi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} - L_m i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} - L_m i_{qs} \end{cases} \quad (3.37)$$

En introduisant le système d'équations des flux magnétiques (3.37) dans celui d'équations électriques (3.36), et en réarrangeant tout, on trouve :

$$\begin{cases} v_{ds} = -r_s i_{ds} - L_s \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \frac{di_{dr}}{dt} + \omega_s L_s i_{qs} - \omega_s L_m i_{qr} \\ v_{qs} = -r_s i_{qs} - L_s \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \frac{di_{qr}}{dt} - \omega_s L_s i_{ds} + \omega_s L_m i_{dr} \\ v_{dr} = r_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} - L_m \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_{gl} L_r i_{qr} + \omega_{gl} L_m i_{qs} \\ v_{qr} = r_r i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} - L_m \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_{gl} L_r i_{dr} - \omega_{gl} L_m i_{ds} \end{cases} \quad (3.38)$$

où : $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$.

3.5.3 Mise du modèle biphasé sous forme d'état

En mettant le système d'équations (3.38) sous forme compacte, on obtient :

$$[B][U] = [L][\dot{I}] + \omega_{gl} [C][I] + [D][I] \quad (3.39)$$

Avec :

$$[U] = [v_{ds} \ v_{qs} \ v_{dr} \ v_{qr}]^T;$$

$$[I] = [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr}]^T \text{ et } [\dot{I}] = \frac{d}{dt}[I];$$

$$[B] = \text{diag}[1 \ 1 \ 1 \ 1];$$

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

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & -L_r \\ -L_m & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix};$$

$$[D] = \begin{bmatrix} -r_s & \omega_s L_s & 0 & -\omega_s L_m \\ -\omega_s L_s & -r_s & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}.$$

En mettant (3.39) sous forme d'état, on trouve :

$$\dot{[I]} = [L]^{-1} \{ [B][U] - [D][I] - \omega_{gl} [C][I] \} \quad (3.40)$$

3.5.4 Expressions du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique

Afin de compléter la relation (3.40), on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et des courants rotoriques suivante [Poi03] :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_s} (i_{qr} \phi_{ds} - i_{dr} \phi_{qs}) \quad (3.41)$$

Et celle de la vitesse rotorique dynamique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r \quad (3.42)$$

3.6 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

Cette machine comporte comme toutes les autres machines triphasées un stator bobiné. Mais, dans ce cas là (MSAP) le rotor est remplacé par des aimants, et ceci présente l'avantage d'éliminer le système balais bague, les pertes rotoriques ainsi que la présence d'une source d'alimentation afin de fournir le courant d'excitation.

La figure 3.8 représente le schéma de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

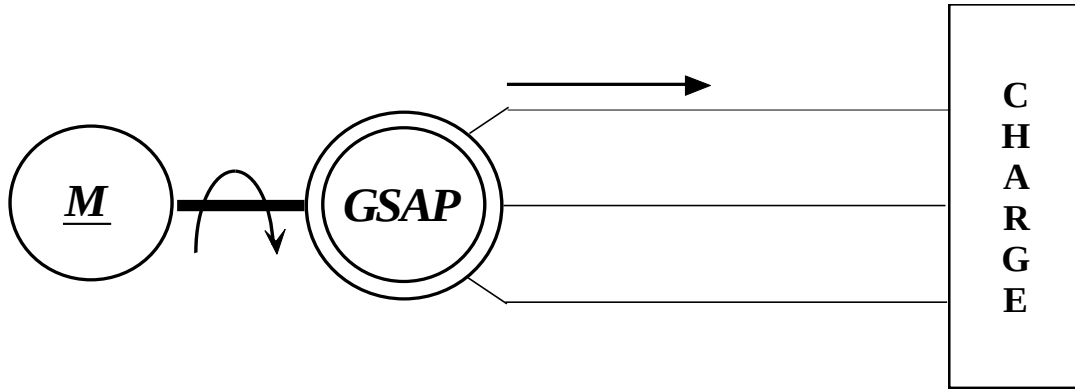


Figure 3.8. Schéma représentatif de la GSAP.

3.6.1 Modèle mathématique de la GSAP dans le référentiel généralisé

Le modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimants permanents nécessite l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices, car cela permet une étude et une exploitation plus aisées. Ces simplifications proviennent des propriétés des machines à courants alternatifs [Ame05].

- La saturation du circuit magnétique est négligée ;
- La distribution sinusoïdale des f.m.m créées par les enroulements statoriques ;
- L'effet d'encochage est négligé ;
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température ;
- L'hystérésis, l'effet de peau et les courants de Foucault sont aussi négligés.

3.6.2 Modèle biphasé de la GSAP dans le référentiel généralisé

La modélisation de cette machine nécessite aussi comme toute autres machines triphasées de passer du système d'axes triphasés (réel) au système d'axes biphasés (et réciproquement). Pour cela il faut utiliser les transformations de Park suivantes :

$$\begin{bmatrix} x_u \\ x_v \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_u \\ x_v \\ x_o \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Où :

x_a, x_b, x_c sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées ;

x_u, x_v sont les valeurs instantanées des grandeurs biphasées ;

x_o est la composante homopolaire ;

$[P(\theta)]$ est la matrice directe de Park ;

$[P(\theta)]^{-1}$ est la matrice inverse de Park.

Les matrices de Park modifiées (matrices orthogonales) sont données ensuite :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Avec θ est l'angle entre l'axe u est l'axe de référence dans le système triphasé.

La figure 3.9 représente schématiquement les enroulements de la GSAP selon le repère de Park généralisé (u, v) .

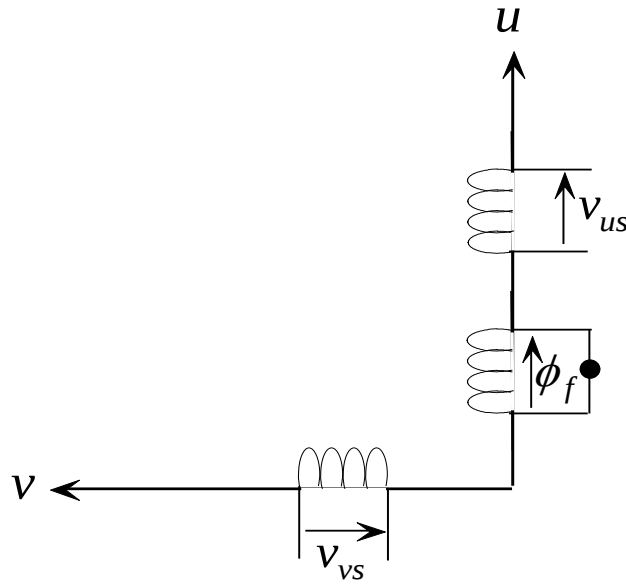


Figure 3.9. Représentation schématique des enroulements de la GSAP selon (u, v) .

Les systèmes d'équations différentielles de la GAS suivant le référentiel de Park généralisé (u, v) sont :

Equations électriques :

$$\begin{cases} v_{us} = -r_s i_{us} - \frac{d}{dt} \phi_{us} - \omega_{coor} \phi_{vs} \\ v_{vs} = -r_s i_{vs} - \frac{d}{dt} \phi_{vs} + \omega_{coor} \phi_{us} \end{cases} \quad (3.47)$$

Equations des flux magnétiques :

$$\begin{cases} \phi_{us} = L_{us} i_{us} + \phi_f \\ \phi_{vs} = L_{vs} i_{vs} \end{cases} \quad (3.48)$$

3.6.3 Modèle biphasé de la GSAP lié au rotor

Dans le cas de la machine synchrone à aimants permanents, l'axe direct u est orienté suivant le rotor, c'est-à-dire suivant la direction de l'aimantation [Cim05].

Le système d'axe (x, y) dans le référentiel de Park est lié au rotor, d'où $\omega_{coord} = \omega_r$. Cependant, en remplaçant dans les systèmes d'équations (3.47) et (3.48) les indices (u, v) par (x, y) , on obtient les systèmes d'équations suivants :

1. Système d'équations électriques :

$$\begin{cases} v_{xs} = -r_s i_{xs} - \frac{d}{dt} \phi_{xs} - \omega_r \phi_{ys} \\ v_{ys} = -r_s i_{ys} - \frac{d}{dt} \phi_{ys} + \omega_r \phi_{xs} \end{cases} \quad (3.49)$$

2. Système d'équations magnétiques :

$$\begin{cases} \phi_{xs} = L_{xs} i_{xs} + \phi_f \\ \phi_{ys} = L_{ys} i_{ys} \end{cases} \quad (3.50)$$

L_{xs} et L_{ys} représentent respectivement les inductances statorique directe et en quadrature ;

ϕ_f représente le flux des aimants.

En introduisant le système d'équations (3.50) dans le système d'équations électriques (3.49), et en remplaçant d/dt par p (opérateur de Laplace), on aura :

$$\begin{cases} v_{xs} = -r_s i_{xs} - L_{xs} p i_{xs} - p \phi_f - \omega_r L_{ys} i_{ys} \\ v_{ys} = -r_s i_{ys} - L_{ys} p i_{ys} + \omega_r L_{xs} i_{xs} + \omega_r \phi_f \end{cases} \quad (3.51)$$

Sachant que ϕ_f est constant, donc $p \phi_f = 0$.

3.6.4 Mise du modèle biphasé sous forme d'état

En mettant le système d'équations (3.51) sous forme compacte, on aura :

$$[B][U] = [A][I] + \omega_r [C][I] + [L]\dot{[I]} + \omega_r [D]\phi_f \quad (3.52)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [U] &= \begin{bmatrix} v_{xs} & v_{ys} \end{bmatrix}^T ; \\ [I] &= \begin{bmatrix} i_{xs} & i_{ys} \end{bmatrix}^T \text{ et } \dot{[I]} = p[I] ; \\ [B] &= \text{diag}[1 \ 1] ; \\ [A] &= \text{diag}[-r_s \ -r_s] ; \\ [L] &= \text{diag}[-L_{xs} \ -L_{ys}] ; \\ [D] &= \text{diag}[0 \ 1]^T ; \\ [C] &= \begin{bmatrix} 0 & -L_{ys} \\ L_{xs} & 0 \end{bmatrix} . \end{aligned}$$

En réécrivant l'équation (3.52) sous forme d'état, on obtient :

$$\dot{[I]} = [L]^{-1} \{ [B][U] - [A][I] - \omega_r ([C][I] + [D]\phi_f) \} \quad (3.53)$$

3.6.5 Expressions du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique

Pour compléter le modèle électromécanique de la GSAP, on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique au système (3.55).

L'expression du couple électromagnétique est exprimée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\phi_{xs} i_{ys} - \phi_{ys} i_{xs}) \quad (3.54)$$

En substituant (3.51) dans (3.55), on trouve [Gol99] :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \left[(L_{xs} - L_{ys}) i_{xs} i_{ys} + \phi_f i_{ys} \right] \quad (3.55)$$

L'équation mécanique est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} - f \Omega = C_r - C_{em} \quad (3.56)$$

3.7 Différents types de turbines

Il existe deux types de turbines qui se réfèrent à la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice: les turbines à axe horizontal, et celles à axe vertical.

La plupart des éoliennes actuelles sont à axe horizontal, car elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Le nombre de pales varie de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu, car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

Les éoliennes à axe vertical sont encore au stade expérimental, deux structures sont parvenues au stade d'industrialisation, le rotor Savoniuns et le rotor Darrieus. Même si quelques projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées [Abd07].

Les éoliennes sont classées selon leur puissance délivrée et le diamètre de leur hélice comme suit :

- Petite : pour un diamètre de moins de 12m et une puissance délivrée moins de 40kW.
- Moyenne : pour un diamètre entre 12m à 45m et une puissance délivrée entre 40kW et 999kW.
- Grande : pour un diamètre de 46m et au-delà et une puissance délivrée de 1MW et plus.

3.8 Commande de la puissance d'une éolienne

La commande de l'éolienne vise à maximiser son exploitation tant que les limites de sécurité sont respectées. Deux zones de contrôle sont distinguées (la zone II et la zone III) selon la vitesse du vent, voir (figure 3.10).

- La zone I : la turbine ne fournit pas encore de puissance, la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage V_d ou V_{on} .
- La zone II : la puissance fournie est fonction de la vitesse du vent, c'est la zone pour laquelle une extraction maximale de la puissance est réalisée (MPPT), en adaptant la vitesse de la génératrice de manière à rester aux alentours de λ_{opt} . l'angle de calage des pales β étant fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est égal à sa valeur maximale C_{pmax} , seul le contrôle du couple électromagnétique de la génératrice est mis en œuvre dans cette zone.
- La zone III : la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation, par action sur l'orientation des pales, et où la puissance fournie est pratiquement égale à P_n .
- La zone IV : dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête la rotation et le transfert d'énergie (mise en drapeau de l'éolienne $\beta=90^\circ$).

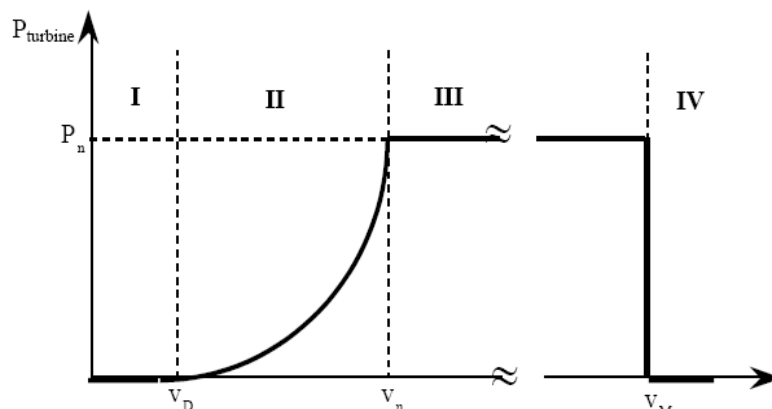


Figure 3.10. Caractéristique de la puissance en fonction de la vitesse du vent [Abd07].

La plupart des aérogénérateurs utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur nominale de la génératrice :

- Le système pitch ou à pas ou calage variable est une technique active, assez coûteuse qui consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe, elle est donc utilisée dans les systèmes à vitesse variable de moyenne et forte puissance. Les pales sont face au vent aux basses vitesses du vent, puis s'inclinent pour atteindre la position drapeau à la vitesse maximale. Ce système offre les avantages suivants : Une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage stall, dans les mêmes conditions de fonctionnement, ainsi qu'un démarrage rapide par changement de l'angle de calage.
- Le système Stall ou à décrochage aérodynamique est plus robuste car c'est la forme des pales et le choix de l'angle de calage qui conduit à une perte de portance, au delà d'une certaine vitesse de vent, c'est donc une solution passive. Ce système présente les avantages suivants : La construction du rotor est plus simple et moins coûteuse, il n'y a pas de système de contrôle de l'angle de calage, et la maintenance est plus aisée, car le nombre de pièces mécaniques en mouvement est réduit.

Chez certains fabricants, des systèmes hybrides se sont développés, le stall actif ou le décrochage aérodynamique est obtenu grâce à une orientation minime des pales [Mul02].

3.9 Intérêt de la vitesse variable

De nombreuses études ont montré l'intérêt de la vitesse variable en éolien sur le plan énergétique, y compris dans le petit éolien où le surcoût entraîné par la vitesse variable, (du fait de l'électronique de puissance et de réglage supplémentaire) est compensé par le surplus de production.

Mais c'est aussi et surtout sur le plan de la durée de vie des systèmes que se situe l'avantage de la vitesse variable. En effet, les chaînes à vitesse variable sont moins « raides » que les chaînes à vitesse fixe ou presque fixe rigidement couplées au réseau : cette liaison rigide se solde par de fortes oscillations de puissance engendrées par les turbulences. Ces variations sont à la longue nuisibles pour les éléments mécaniques : la vitesse variable permet de mieux lisser la production à travers l'énorme moment d'inertie que constitue la voilure [khe07].

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure 3.11.

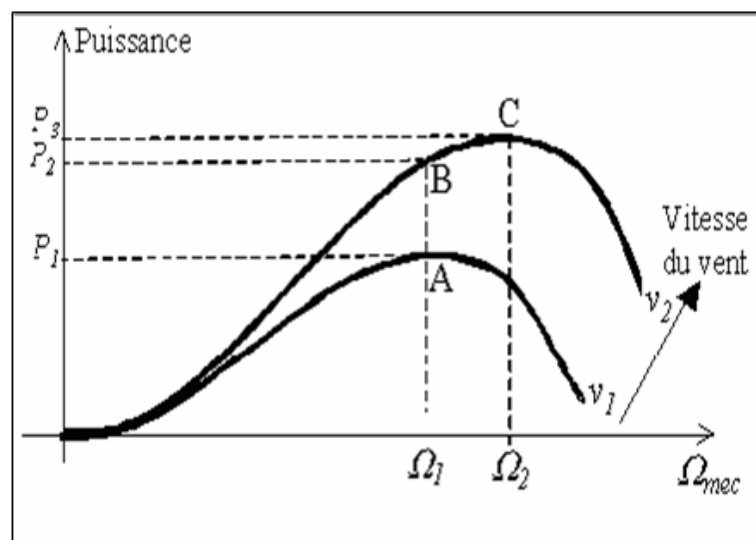


Figure 3.11 Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent [Khe07].

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 ; on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (Point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence ($\Omega_{réf}$) calculée pour maximiser la puissance extraite [Khe07].

3.10 Conclusion

Ce chapitre est un résumé des différents modèles de génératrices utilisés dans les aérogénérateurs.

Les différents types d'éoliennes ont été présentés et l'intérêt de la vitesse variable a été clairement mis en évidence.

Chapitre 4

Commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur la GAS pilotée par le stator

4.1 Introduction

La machine asynchrone à cage est actuellement largement utilisée grâce à plusieurs avantages qu'elle présente, simplicité, robustesse, prix peu élevé, entretien facile et de fonctionnement sûr [Abd08].

La génératrice asynchrone à cage peut fonctionner à vitesse variable grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance, et peut générer une production de puissance électrique sur une vaste gamme de vitesse du vent. Une adaptation constante est ainsi possible entre la puissance aérodynamique et le réseau de distribution [Ela04].

Néanmoins, ces convertisseurs doivent être bien commandés afin de pouvoir transiter la totalité de la puissance générée par la machine, car ils peuvent être des générateurs de perturbations harmoniques importantes. Partant de ce constat, on a opté pour l'utilisation de l'une des techniques de commande connue par son adaptation aux changements paramétriques et par sa stabilité, qui est nommée commande par mode de glissement, tout en l'associant à la commande vectorielle à flux rotorique orienté.

4.2 Description du système étudié

Le système étudié est connecté au réseau, considéré puissant et se compose d'un aérogénérateur basé sur la génératrice asynchrone à cage, de deux convertisseurs de puissance contrôlés en MLI, du bus continu, du filtre d'entrée et du transformateur. Le schéma global du système est représenté par la figure 4.1.

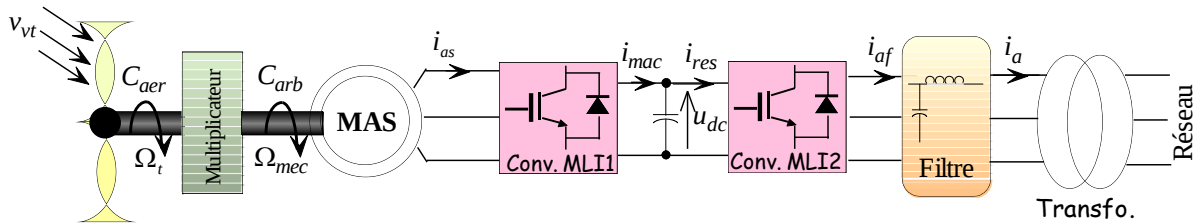


Figure 4.1. Schéma global du système étudié.

4.3 Modélisation du système éolien

4.3.1 Modélisation et principes de contrôle de la turbine

Un aérogénérateur est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

La puissance du vent captée par les pales est exprimée comme suit :

$$P_{vt} = \frac{\rho}{2} S v_{vt}^3 \quad (4.1)$$

Avec, ρ : densité de l'air 1.225 kg/m^3 ; S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne ; v_{vt} : vitesse du vent.

La puissance du vent disponible n'est en réalité jamais totalement captée par les pales, d'où la puissance aérodynamique est toujours inférieure à celle du vent ; dans le

cas où l'angle de calage de pales est nul ($\beta = 0$), la puissance aérodynamique en fonction de la puissance du vent est obtenue selon le coefficient de puissance de l'éolienne :

$$P_{aer} = C_p(\lambda)P_{vt} \quad (4.2)$$

Le coefficient de puissance (C_p) est exprimé en fonction de la vitesse relative (λ) représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent, qui est donné par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{v_{vt}} \quad (4.3)$$

Où, Ω_t : vitesse angulaire de la turbine ; R : rayon des pales.

La variation du coefficient de puissance (C_p) en fonction du rapport de vitesse (λ) est représentée par la figure 4.2.

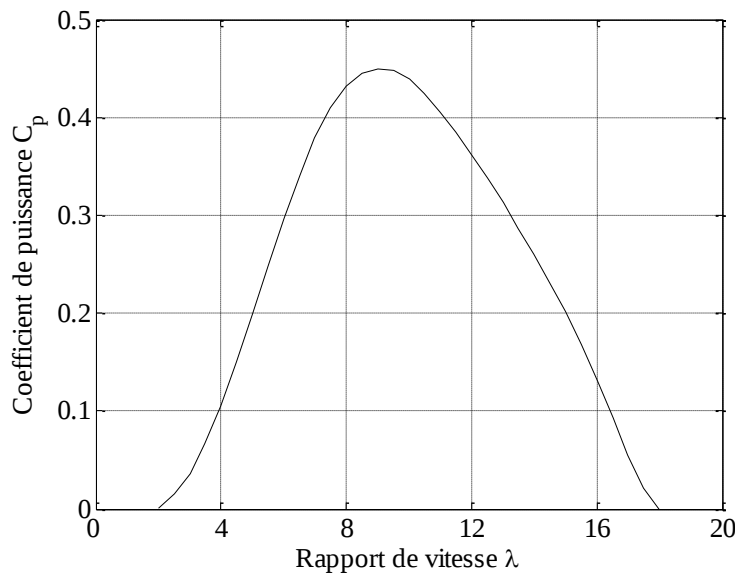


Figure 4.2. Coefficient de puissance (C_p) en fonction du rapport de vitesse (λ).

Le couple aérodynamique est donné par [Dav07] :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = \frac{\rho}{2} C_p(\lambda) S v_{vt}^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (4.4)$$

La vitesse mécanique de rotation de la turbine (avant le multiplicateur) et celle de rotation de l'arbre de la génératrice électrique (après le multiplicateur) sont exprimées par l'expression suivante :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{K} \quad (4.5)$$

Avec, K : rapport du multiplicateur de vitesse.

Les couples sur l'arbre lent C_{aer} et sur l'arbre rapide C_{arb} sont exprimés par la relation suivante :

$$C_{arb} = \frac{C_{aer}}{K} \quad (4.6)$$

Les masses des différents éléments de la turbine sont représentées par l'inertie $J_{turbine}$. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice J_g , et on suppose que le multiplicateur de vitesse est idéal. L'inertie totale J est donnée par l'expression suivante [Ghe08] :

$$J = \frac{J_{turbine}}{K^2} + J_g \quad (4.7)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet d'établir l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum C = C_{mec} \quad (4.8)$$

Le couple mécanique est en fonction du couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, du couple des frottements visqueux C_{visq} , et du couple issu du multiplicateur C_{arb} .

$$C_{mec} = C_{arb} - C_{em} - C_{visq} \quad (4.9)$$

Le couple visqueux est donné par la formule suivante :

$$C_{visq} = f \Omega_{mec} \quad (4.10)$$

Où, f : coefficient de frottement visqueux.

Après quelques manipulations des équations (4.8) – (4.10), on aura :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} = C_{arb} - C_{em} \quad (4.11)$$

A partir des équations précédentes, on établit le schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine représenté par la figure 4.3.

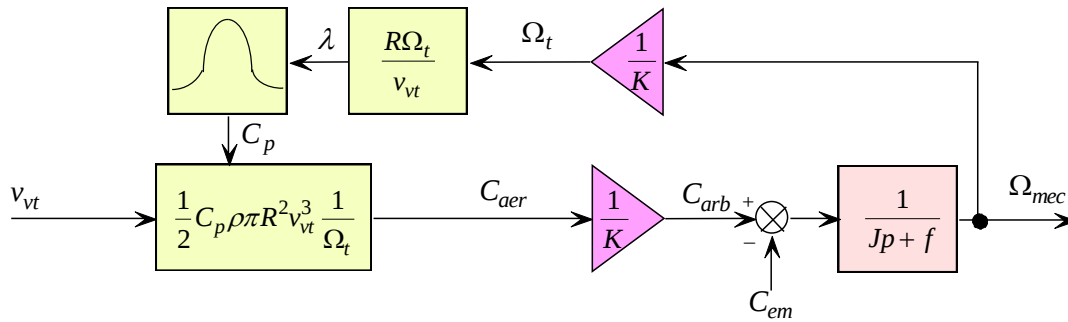


Figure 4.3. Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine.

Le schéma bloc nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée par action sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

La vitesse du vent est variable dans le temps, et pour garantir un captage maximal de l'énergie éolienne incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent. Ceci est réalisé en utilisant la technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT).

La vitesse mécanique optimale de la turbine (correspondant à λ_{opt} et $\beta = 0^\circ$, voir figure 4.2), on la détermine à partir de la vitesse du vent mesurée, et en la multipliant par la valeur du gain du multiplicateur on aura la vitesse mécanique du rotor de la MAS, qui sera utilisé comme grandeur de référence pour la régulation (PI dans notre cas), qui élaborera à son tour la consigne de commande convenant au couple électromagnétique que devrait développer la machine pour passer à la vitesse optimale.

Le couple issu de la régulation de vitesse, sera utilisé comme grandeur de référence du couple dans la structure fonctionnelle du modèle de la turbine (figure 4.3). Le schéma bloc fonctionnel avec la régulation de vitesse est donné par la figure 4.4.

En remplaçant le coefficient de puissance C_p par C_{pmax} et λ par λ_{opt} dans l'expression de la puissance aérodynamique (4.2), on aura l'expression de la puissance mécanique suivante :

$$P_{mec} = -\frac{1}{2} C_{pmax} \frac{\rho \pi R^5}{K^3 \lambda_{opt}^3} \Omega_{mec}^3 \quad (4.12)$$

Le signe négatif (-) est utilisé pour dire que la puissance est générée.

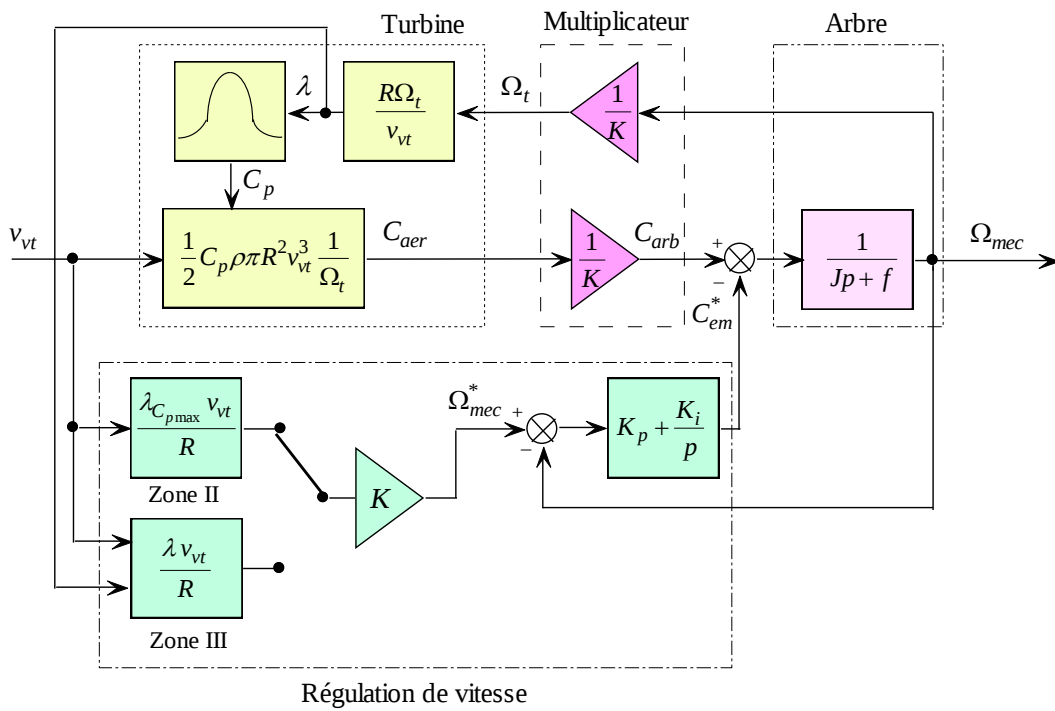


Figure 4.4. Schéma bloc fonctionnel avec régulation de la vitesse.

4.3.2 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension représente aujourd'hui la « brique de base » dans les systèmes d'interface avec le réseau. Il permet entre autres de contrôler les puissances (active et réactive) échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode

onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas [Lav05].

L'onduleur est constitué de trois branches où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante :

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur } i \text{ est fermé } (K_i \text{ conduit, } \bar{K}_i \text{ bloqué}) \\ 0 & \text{l'interrupteur } i \text{ est ouvert } (K_i \text{ bloqué, } \bar{K}_i \text{ conduit}) \end{cases}$$

Avec, $f_i + \bar{f}_i = 1$ et $i = 1 \dots 3$.

La figure 4.5 représente le schéma de l'onduleur triphasé.

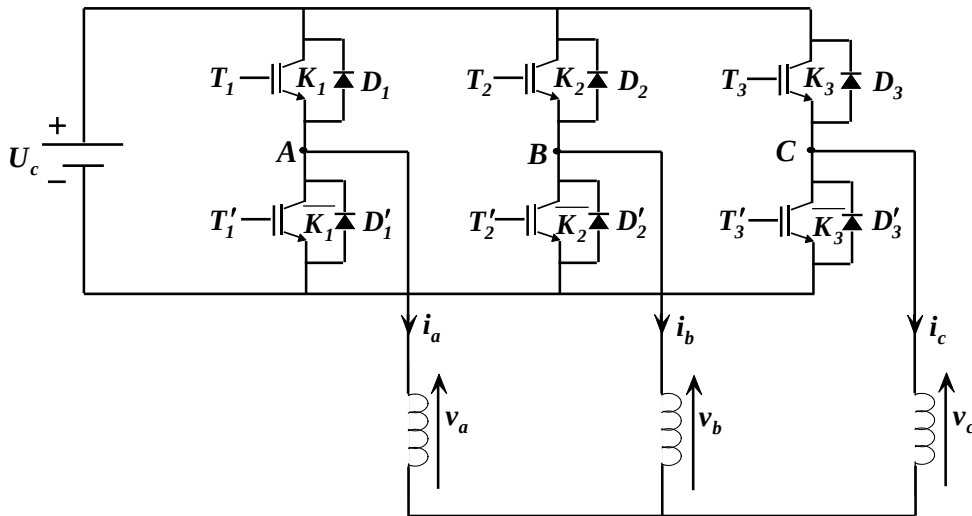


Figure 4.5. Onduleur triphasé à deux niveaux.

Les tensions composées sont :

$$u_{AB} = v_a - v_b = U_c(f_1 - f_2) \quad (4.13)$$

$$u_{BC} = v_b - v_c = U_c(f_2 - f_3) \quad (4.14)$$

$$u_{CA} = v_c - v_a = U_c(f_3 - f_1) \quad (4.15)$$

Les tensions simples v_a , v_b et v_c forment un système triphasé équilibré, tel que :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (4.16)$$

La résolution des équations (4.13) – (4.16) nous donne :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

4.3.3 Modélisation de la machine asynchrone à cage

Comme tout système, l'étude des machines électriques s'appuie sur un modèle de représentation. Ainsi, la modélisation est primordiale pour l'étude et la commande des machines électriques, néanmoins la répartition des enroulements et la géométrie propre de la machine asynchrone à cage (MAS) rendent son modèle difficile à mettre en œuvre. Cependant, l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices permet de contourner cette difficulté :

- l'entrefer est d'épaisseur uniforme ;
- l'effet d'encoche est négligeable ;
- force magnétomotrice à répartition spatiale sinusoïdale ;
- machine de construction symétrique ;
- la saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables [Abd97].

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

4.3.3.1 Modèle triphasé de la MAS

La figure 4.6 représente schématiquement les enroulements de la MAS, où l'angle θ_r représente la position du rotor (phase a_r) par rapport au stator (phase a_s).

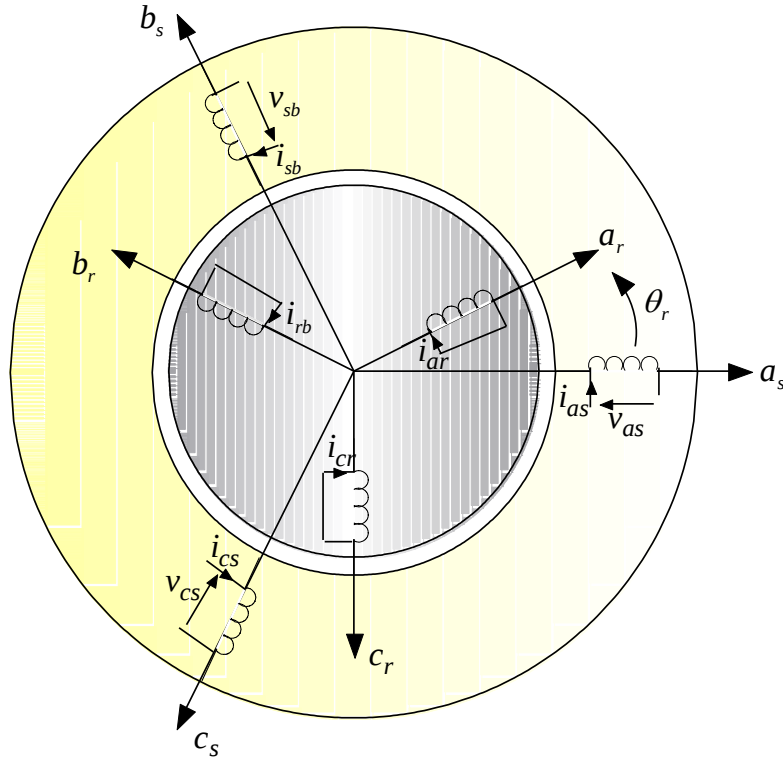


Figure 4.6. Représentation schématique des enroulements de la MAS.

a. Equations électriques

Les équations électriques des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{as} = R_s i_{as} + \frac{d}{dt} \phi_{as} \\ v_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d}{dt} \phi_{bs} \\ v_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d}{dt} \phi_{cs} \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\begin{cases} v_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d}{dt} \phi_{ar} = 0 \\ v_{br} = R_r i_{br} + \frac{d}{dt} \phi_{br} = 0 \\ v_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d}{dt} \phi_{cr} = 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

Soit on écriture matricielle :

$$\begin{cases} [v_S] = [R_S][i_S] + \frac{d}{dt}[\phi_S] \\ [v_R] = [R_R][i_R] + \frac{d}{dt}[\phi_R] \end{cases} \quad (4.20)$$

Avec :

$$[v_S] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [i_S] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [R_S] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_R] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix};$$

$$[\phi_S] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}; [v_R] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; [i_R] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\phi_R] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}.$$

R_s, R_r : Résistance par phase statorique et rotorique ;

$[v_S], [v_R]$: Vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques ;

$[\phi_S], [\phi_R]$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques ;

$[i_S], [i_R]$: Vecteurs des courants des phases statoriques et rotoriques.

b. Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants. L'écriture matricielle ci-dessous résume les équations des flux statoriques et rotoriques :

$$[\phi_S] = [L_S][i_S] + [M_{sr}][i_R] \quad (4.21)$$

Avec :

$$[L_S] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & M_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & M_{cc} \end{bmatrix}.$$

$$[\phi_R] = [L_R][i_R] + [M_{rs}][i_S] \quad (4.22)$$

Où :

$$[L_R] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} ; [M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ba} & M_{ca} \\ M_{ab} & M_{bb} & M_{cb} \\ M_{ac} & M_{bc} & M_{cc} \end{bmatrix}$$

L_s : Inductance propre d'une phase statorique ;

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique ;

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques ;

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques ;

$M_{sr} = M_{rs}$: Inductance mutuelle entre phase a du stator et phase a du rotor.

Pour l'ensemble stator et rotor, on écrira en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} [\phi_S] \\ [\phi_R] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_S] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_R] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_S] \\ [i_R] \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

La matrice d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est donnée par :

$$[M_{sr}] = L_m \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

L_m : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les axes en question coïncident.

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t.$$

4.3.3.2 Transformation de Park

La modélisation de la MAS passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales, pour cela on applique les matrices de passage de Park directe et inverse suivantes :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Avec, $\theta = \theta_s$ pour les grandeurs statoriques et $\theta = \theta_r$ pour les grandeurs rotoriques.

Le changement de variables relatifs aux courants, aux tensions et aux flux est donné par les transformations suivantes :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix}.$$

X : tension, courant ou flux ; o : indice de l'axe homopolaire.

4.3.3.3 Modèle biphasé de la MAS lié au champ tournant

Ce système d'axes (d,q) est immobile par rapport au champ électromagnétique créée par les enroulements statoriques.

a. Equations électriques

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (4.27)$$

b. Equations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (4.28)$$

En introduisant le système d'équations (4.28) dans (4.27), et en posant $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$ et $p = \frac{d}{dt}$, on aura :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s p i_{ds} + L_m p i_{dr} - \omega_s (L_s i_{qs} + L_m i_{qr}) \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s p i_{qs} + L_m p i_{qr} + \omega_s (L_s i_{ds} + L_m i_{dr}) \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r p i_{dr} + L_m p i_{ds} - \omega_{gl} (L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r p i_{qr} + L_m p i_{qs} + \omega_{gl} (L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) \end{cases} \quad (4.29)$$

L'expression du couple électromagnétique en fonction des courants statoriques et des flux rotoriques est exprimée par [Abd10] :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (4.30)$$

Les puissances active et réactive statoriques sont données par :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (4.31)$$

4.4 Commande par mode de glissement

4.4.1 Principe de la commande par mode de glissement

Un système à structure variable est un système dont la structure change durant son fonctionnement [Nem02]. La commande de tels systèmes par mode de glissement a en général deux modes de fonctionnement (figure 4.7) :

- Le mode non glissant (reaching mode) ou mode d'accès, ou encore mode de convergence (MC).
- Le mode glissant (sliding mode).

Ainsi, la trajectoire de phase, partant d'une condition initiale quelconque, atteint la surface de commutation en un temps fini, (mode non glissant), puis tend asymptotiquement vers le point d'équilibre avec une dynamique définie par le mode glissant [Ami08].

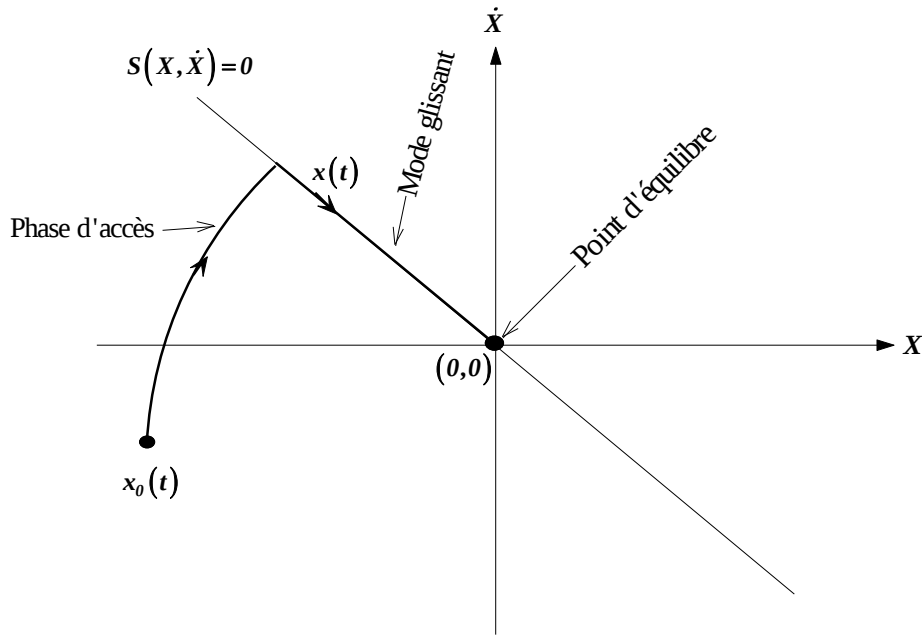


Figure 4.7. Mode de fonctionnement dans le plan de phase.

4.4.2 Conception de l'algorithme de commande par mode de glissement

La conception de la commande par mode de glissement prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche, qui s'effectue principalement en trois étapes complémentaires définies par [Sai06] :

- Choix des surfaces de glissement ;
- Définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant ;
- Détermination de la loi de commande.

4.4.2.1 Choix des surfaces de glissement

On considère le modèle d'état suivant :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (4.32)$$

Où $[X] \in R^n$ est le vecteur d'état, $[U] \in R^m$ est le vecteur de commande, avec $n > m$.

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande $[U]$. Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état x

vers sa valeur de référence x^* , plusieurs travaux proposent la forme générale suivante [Slo91] :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \quad (4.33)$$

Avec :

λ : gain positif;

$e(x) = x^* - x$: écart de la variable à réguler ;

r : degré relatif, c'est le plus petit entier positif représentant le nombre de fois qu'il faut dériver afin de faire apparaître la commande, tel que : $\frac{\partial s}{\partial x} \neq 0$ assurant la contrôlabilité ;

$S(x)$: est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro pour un choix correct du gain λ et c'est l'objectif de la commande.

4.4.2.2 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. On présente deux types d'approches qui sont :

a. Approche directe

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Elle est donnée sous la forme [Fna06] :

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (4.34)$$

b. Approche de Lyapunov

Il s'agit de choisir une fonction candidate de Lyapunov $V(x) > 0$ (fonction scalaire positive) pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$.

En définissant par exemple une fonction candidate de Lyapunov pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (4.35)$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = S(x) \dot{S}(x) \quad (4.36)$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$S(x) \dot{S}(x) < 0 \quad (4.37)$$

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse et de la stabilité des systèmes non linéaires [Col94], [Sin04].

4.4.2.3 Détermination de la loi de commande

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface), c'est pour cette raison que la surface est déterminée indépendamment de la commande. Maintenant, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés. De ce fait, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. La partie continue peut en effet amener à réduire autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (U_{eq}) et l'autre la stabilité (U_n).

$$U = U_{eq} + U_n \quad (4.38)$$

U_{eq} correspond à la commande proposée par Filipov. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x) = 0$. La commande équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle $\dot{S}(x) = 0$.

La commande discrète U_n est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système [Ami08], [Nem02].

Afin de mettre en évidence le développement précédant, on considère le système d'état (4.32). On cherche à déterminer l'expression analogique de la commande U .

La dérivée de la surface $S(x)$ est :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (4.39)$$

En remplaçant (4.32) et (4.38) dans (4.39), on trouve :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} \{ [A][X] + [B]U_{eq} \} + \frac{\partial S}{\partial t} [B]U_n \quad (4.40)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où, on déduit l'expression de la commande équivalente :

$$U_{eq} = - \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} [B] \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} [A][X] \right\} \quad (4.41)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que :

$$\frac{\partial S}{\partial X} [B] \neq 0 \quad (4.42)$$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (4.40), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial X} [B]U_n \quad (4.43)$$

et la condition d'attractivité $S(x)\dot{S}(x) < 0$ devient :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial X} [B] U_n < 0 \quad (4.44)$$

Afin de satisfaire la condition, le signe de U_n doit être opposé à celui de $S(x) \frac{\partial S}{\partial X} [B]$. La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'une fonction *sign* (figure 4.8).

$$U_n = K_x \text{sign } S(x) \quad (4.45)$$

Le signe de K_x doit être différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial X} [B]$.

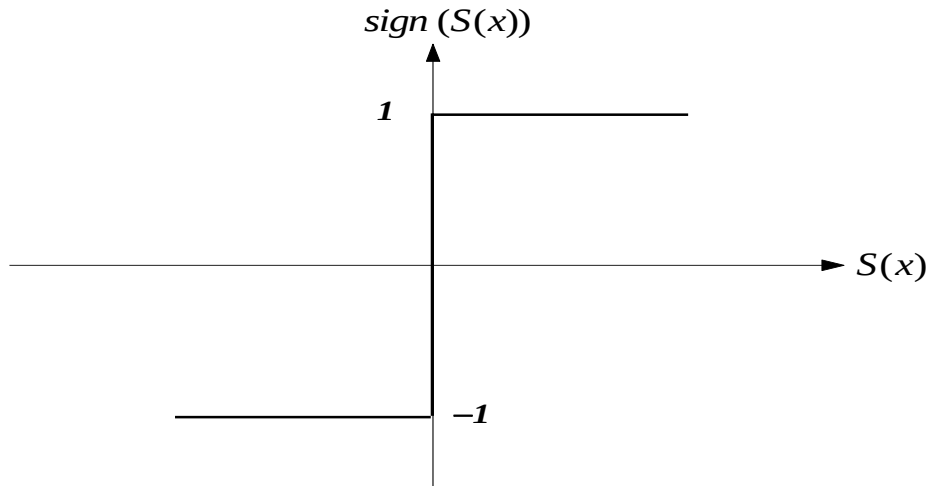


Figure 4.8. Fonction *sign* (non linéarité tout ou rien).

Cependant, cette dernière génère sur la surface de glissement, un phénomène appelé broutement (ou chattering en anglais), qui est en général indésirable car il ajoute au spectre de la commande, des composantes de hautes fréquences [Wit00]. La figure 4.9 représente le phénomène broutement.

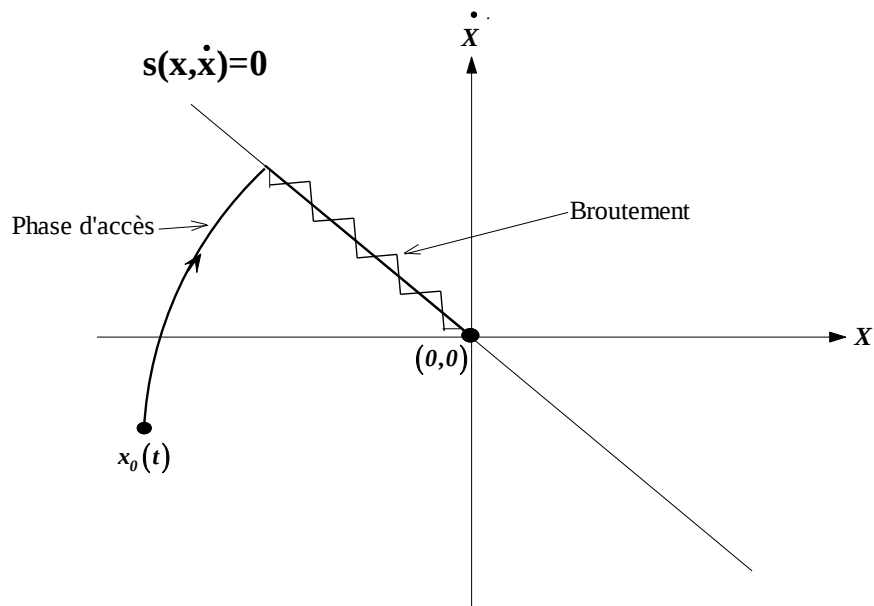


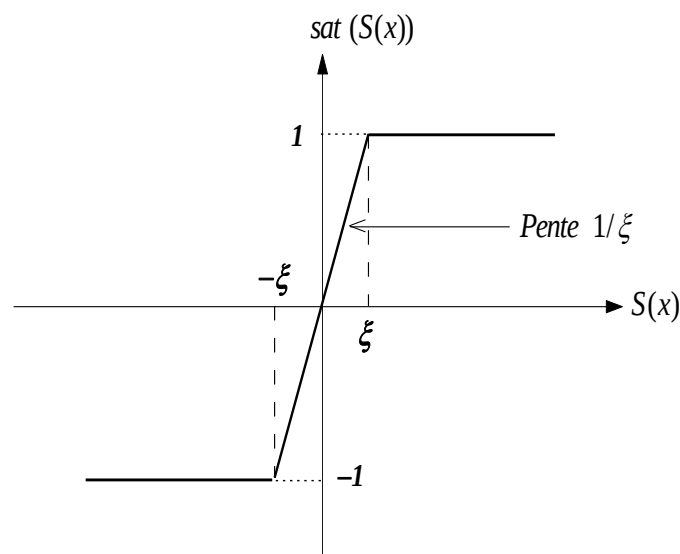
Figure 4.9. Phénomène de broutement.

Néanmoins, le broutement peut être réduit (ou éliminé) en remplaçant la fonction *sign* par une fonction de saturation adéquate qui filtre ces hautes fréquences. On donne ci-dessous un exemple de fonction de saturation (figure 4.10).

$$\text{sat}(S(x)) = 1 \quad \text{si} \quad S(x) > \varepsilon$$

$$\text{sat}(S(x)) = -1 \quad \text{si} \quad S(x) < -\varepsilon$$

$$\text{sat}(S(x)) = \frac{S(x)}{\varepsilon} \quad \text{si} \quad |S(x)| \leq \varepsilon$$

Figure 4.10. Fonction de saturation ($\varepsilon > 0$ et petit).

Alors, on obtient la commande douce suivante :

$$U_n = \begin{cases} K_x \text{sign } S(x) & \text{si } |S(x)| > \varepsilon \\ \frac{K_x}{\varepsilon} \text{sign } S(x) & \text{si } |S(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (4.46)$$

On peut aussi la remplacer par une fonction de classe C^1 . On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction (figure 4.11).

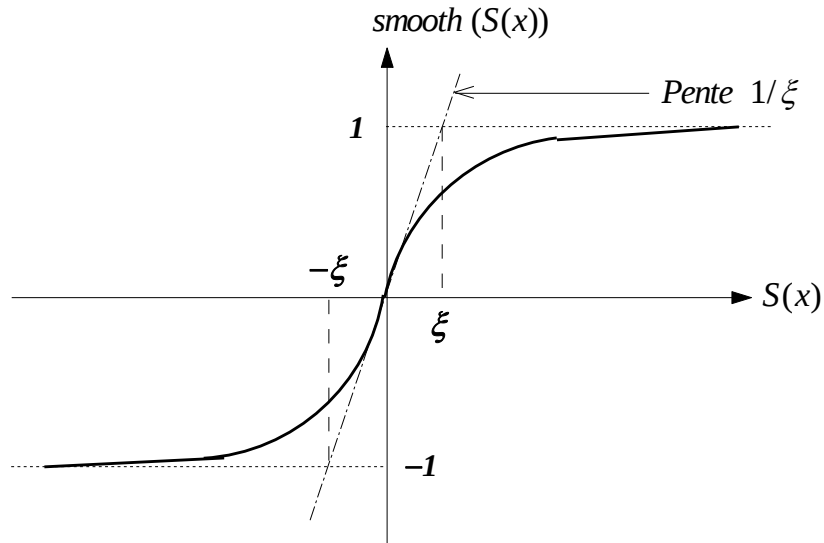


Figure 4.11. Fonction de classe C^1 ($\varepsilon > 0$ et petit)

$$\text{Smooth}(S(x)) = \tanh(S(x)) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{S(x)}{|S(x)| + \varepsilon} \quad (4.47)$$

D'où, on aura la commande douce suivante :

$$U_n = K_x \frac{S(x)}{|S(x)| + \varepsilon} \quad (4.48)$$

4.4.3 Orientation du flux rotorique

En considérant comme grandeur de référence la vitesse Ω_{mec}^* , et en exprimant que :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \phi_r^* \\ \phi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (4.49)$$

En remplaçant (4.49) dans (4.25) et (4.30), on aura :

$$C_{em}^* = P \frac{L_m}{L_r} \phi_r^* i_{qs} \quad (4.50)$$

$$\begin{cases} R_r i_{dr} = 0 \Rightarrow i_{dr} = 0 \\ R_r i_{qr} + \omega_{gl}^* \phi_r^* = 0 \Rightarrow i_{qr} = -\frac{\omega_{gl}^* \phi_r^*}{R_r} \end{cases} \quad (4.51)$$

A partir des équations des flux rotoriques (4.28), on aura :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\phi_{dr} - L_m i_{ds}) \quad (4.52)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} (\phi_{qr} - L_m i_{qs}) \quad (4.53)$$

En remplaçant (4.49) dans (4.52) et (4.53), on trouve :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\phi_r^* - L_m i_{ds}) \quad (4.54)$$

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (4.55)$$

En introduisant (4.54) et (4.55) dans les équations des flux rotorique (4.28), on aura :

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} (\phi_r^* - L_m i_{ds}) \quad (4.56)$$

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} - \frac{L_m^2}{L_r} i_{qs} \quad (4.57)$$

En substituant (4.51) dans (4.52), on obtient :

$$\phi_r^* = L_m i_{ds} \quad (4.58)$$

Et à partir de l'équation (4.55) :

$$L_m i_{qs} = -L_r i_{qr} \quad (4.59)$$

En remplaçant (4.56) et (4.57) dans (4.27), on trouve :

$$v_{ds}^* = R_s i_{ds} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) p i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} p \phi_r^* - \omega_s^* \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qs} \quad (4.60)$$

$$v_{qs}^* = R_s i_{qs} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) p i_{qs} + \omega_s^* \left[\left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \phi_r^* \right] \quad (4.61)$$

On pose $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \Rightarrow L_s - \frac{L_m^2}{L_r} L_s \left(1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \right) = L_s \sigma$.

Puisque $\phi_{dr} = \phi_r^*$ et $p \phi_{dr} = 0 \Rightarrow p \phi_r^* = 0$, alors :

$$v_{ds}^* = R_s i_{ds} + L_s \sigma p i_{ds} - L_s \sigma \omega_s^* i_{qs} \quad (4.62)$$

$$v_{qs}^* = R_s i_{qs} + L_s \sigma p i_{qs} + L_s \sigma \omega_s^* i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \omega_s^* \phi_r^* \quad (4.63)$$

L'équation mécanique est :

$$J p \Omega_{mec} = C_{em}^* - C_{arb} - f \Omega_{mec} \quad (4.64)$$

D'après (4.28) et (4.32)

$$p \phi_r = -\frac{R_r}{L_r} \phi_r + \frac{R_r L_m}{L_r} i_{ds} \quad (4.65)$$

En réarrangeant les équations précédentes, on tire le système d'équation d'état suivant :

$$\begin{cases} p i_{ds} = \frac{1}{L_s \sigma} (v_{ds}^* - R_s i_{ds} + L_s \sigma \omega_s^* i_{qs}) \\ p i_{qs} = \frac{1}{L_s \sigma} (v_{qs}^* - R_s i_{qs} - L_s \sigma \omega_s^* i_{ds} - \frac{L_m}{L_r} \omega_s^* \phi_r^*) \\ p \Omega_{mec} = \frac{1}{J} (C_{em}^* - C_{arb} - f \Omega_{mec}) \\ p \phi_r = -\frac{R_r}{L_r} \phi_r + \frac{R_r L_m}{L_r} i_{ds} \end{cases} \quad (4.66)$$

4.4.4 Surface de régulation de la vitesse

La surface de régulation de la vitesse dont le degré relatif $r = 1$ est de la forme :

$$S(\Omega_{mec}) = \Omega_{mec}^* - \Omega_{mec} \quad (4.67)$$

En dérivant la surface $S(\Omega_{mec})$, on obtient :

$$pS(\Omega_{mec}) = p\Omega_{mec}^* - p\Omega_{mec}$$

D'où :

$$pS(\Omega_{mec}) = p\Omega_{mec}^* - \frac{1}{J}(C_{em}^* - C_{arb} - f\Omega_{mec})$$

En remplaçant le C_{em}^* par son expression (4.50), on trouve :

$$pS(\Omega_{mec}) = p\Omega_{mec}^* - \frac{1}{J}\left(P\frac{L_m}{L_r}\phi_r^*i_{qs} - C_{arb} - f\Omega_{mec}\right) \quad (4.68)$$

A présent, en remplaçant le courant i_{qs} par le courant de commande $i_{qs}^* = i_{qseq} + i_{qsn}$ dans l'équation (4.68), on aura :

$$pS(\Omega_{mec}) = p\Omega_{mec}^* - \frac{P}{J}\frac{L_m}{L_r}\phi_r^*i_{qseq} - \frac{P}{J}\frac{L_m}{L_r}\phi_r^*i_{qsn} + \frac{C_{arb}}{J} + \frac{f}{J}\Omega_{mec} \quad (4.69)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, on a $S(\Omega_{mec}) = 0$ et par conséquent $pS(\Omega_{mec}) = 0$ et $i_{qsn} = 0$, d'où on tire la formule de la commande équivalente à partir de la relation (4.69) :

$$i_{qseq} = \frac{JL_r}{PL_m\phi_r^*}\left(p\Omega_{mec}^* + \frac{C_{arb}}{J} + \frac{f}{J}\Omega_{mec}\right) \quad (4.70)$$

Durant le mode de convergence, la condition $S(\Omega_{mec}) pS(\Omega_{mec}) < 0$ doit être vérifiée. En remplaçant (4.70) dans (4.69), on obtient :

$$pS(\Omega_{mec}) = -\frac{P}{J}\frac{L_m}{L_r}\phi_r^*i_{qsn} \quad (4.71)$$

On prend la commande douce suivante :

$$i_{qsn} = K_{\Omega} \frac{S(\Omega_{mec})}{|S(\Omega_{mec})| + \varepsilon_{\Omega}} \quad (4.72)$$

4.4.5 Surface de régulation du flux rotorique

Prenant la même surface que celle de la vitesse :

$$S(\phi_r) = \phi_r^* - \phi_r \quad (4.73)$$

D'où :

$$pS(\phi_r) = p\phi_r^* - p\phi_r \quad (4.74)$$

Substituant l'équation de $p\phi_r$ (système d'équations (4.66)) dans (4.74), on trouve :

$$pS(\phi_r) = p\phi_r^* + \frac{R_r}{L_r} \phi_r - \frac{R_r}{L_r} L_m i_{ds} \quad (4.75)$$

En introduisant le courant de commande $i_{ds}^* = i_{dseq} + i_{dsn}$ dans l'équation (4.75), on aura :

$$pS(\phi_r) = p\phi_r^* + \frac{R_r}{L_r} \phi_r - \frac{R_r}{L_r} L_m i_{dseq} - \frac{R_r}{L_r} L_m i_{dsn} \quad (4.76)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, on a $S(\phi_r) = 0$ et par conséquent $pS(\phi_r) = 0$ et $i_{dsn} = 0$, d'où on tire i_{dseq} de la relation (4.76) :

$$i_{dseq} = \frac{L_r}{R_r L_m} \left(p\phi_r^* + \frac{R_r}{L_r} \phi_r \right) \quad (4.77)$$

Durant le mode de convergence, la condition $S(\phi_r) pS(\phi_r) < 0$ doit être vérifiée. En remplaçant (4.77) dans (4.76), on obtient :

$$pS(\phi_r) = -\frac{R_r}{L_r} L_m i_{dsn} \quad (4.78)$$

On considère la commande non linéaire suivante :

$$i_{dsn} = K_{\phi_r} \frac{S(\phi_r)}{|S(\phi_r)| + \varepsilon_{\phi_r}} \quad (4.79)$$

4.4.6 Surface de régulation des courants statoriques

On prend les surfaces suivantes :

$$S(i_{ds}) = i_{ds}^* - i_{ds} \quad (4.80)$$

$$S(i_{qs}) = i_{qs}^* - i_{qs} \quad (4.81)$$

Les dérivées de ces dernières sont respectivement :

$$pS(i_{ds}) = pi_{ds}^* - pi_{ds} \quad (4.82)$$

$$pS(i_{qs}) = pi_{qs}^* - pi_{qs} \quad (4.83)$$

En substituant les expressions des courants pi_{sd} et pi_{sq} données par le système d'équations (4.66) dans les équations précédentes, on obtient :

$$pS(i_{ds}) = pi_{ds}^* - \frac{1}{L_s \sigma} (v_{ds}^* - R_s i_{ds} + L_s \sigma \omega_s^* i_{qs}) \quad (4.84)$$

$$pS(i_{qs}) = pi_{sq}^* - \frac{1}{L_s \sigma} \left(v_{qs}^* - R_s i_{qs} - L_s \sigma \omega_s^* i_{ds} - \frac{L_m}{L_r} \omega_s^* \phi_r^* \right) \quad (4.85)$$

En remplaçant les tensions v_{ds} et v_{qs} par les tensions de commande $v_{ds}^* = v_{dseq} + v_{dsn}$ et $v_{qs}^* = v_{sqeq} + v_{sqn}$, on aura :

$$pS(i_{ds}) = pi_{ds}^* - \frac{1}{L_s \sigma} (v_{dseq} + v_{dsn} - R_s i_{ds} + L_s \sigma \omega_s^* i_{qs}) \quad (4.86)$$

$$pS(i_{qs}) = pi_{qs}^* - \frac{1}{L_s \sigma} \left(v_{sqeq} + v_{sqn} - R_s i_{qs} - L_s \sigma \omega_s^* i_{ds} - \frac{L_m}{L_r} \omega_s^* \phi_r^* \right) \quad (4.87)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, les conditions $S(i_{ds}) = 0$ et $S(i_{qs}) = 0$ et par suite $pS(i_{ds}) = 0$, $S(i_{qs}) = 0$, $v_{sqn} = 0$ et $v_{dsn} = 0$. Alors, on tire à partir des équations (4.86) et (4.87), les expressions des commandes équivalentes v_{dseq} et v_{sqeq} respectivement :

$$v_{dseq} = \sigma L_s \left[pi_{ds}^* + \frac{1}{\sigma L_s} R_s i_{ds} - \omega_s^* i_{qs} \right] \quad (4.88)$$

$$v_{qseq} = \sigma L_s p i_{qs}^* + R_s i_{qs} + \sigma L_s \omega_s^* i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \omega_s^* \phi_r^* \quad (4.89)$$

Durant le mode de convergence, les conditions $S(i_{ds}).pS(i_{ds}) < 0$ et $S(i_{qs}).pS(i_{qs}) < 0$, doivent être vérifiées. En substituant les équations (4.88) et (4.89) dans (4.86) et (4.87), les expressions des commandes équivalentes v_{dseq} et v_{qseq} respectivement, on aura :

$$pS(i_{ds}) = -\frac{1}{L_s \sigma} v_{dsn} \quad (4.90)$$

$$pS(i_{qs}) = -\frac{1}{L_s \sigma} v_{qsn} \quad (4.91)$$

On prend :

$$v_{dsn} = K_{ds} \frac{S(i_{ds})}{|S(i_{ds})| + \varepsilon_{ds}} \quad (4.92)$$

$$v_{qsn} = K_{qs} \frac{S(i_{qs})}{|S(i_{qs})| + \varepsilon_{qs}} \quad (4.93)$$

D'après le système d'équations (4.51),

$$\omega_{gl}^* = \frac{-i_{qr} R_r}{\phi_r^*} \quad (4.94)$$

Les équations (4.49), (4.51) et (4.53) donnent :

$$\omega_{gl}^* = \frac{R_r}{\phi_r^*} \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (4.95)$$

On note que : $\omega_s^* = \omega_{gl}^* + \omega_r$.

La représentation schématique de la commande par mode de glissement associée à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la GAS dédiée au système éolien à vitesse variable est illustrée par la figure 4.12.

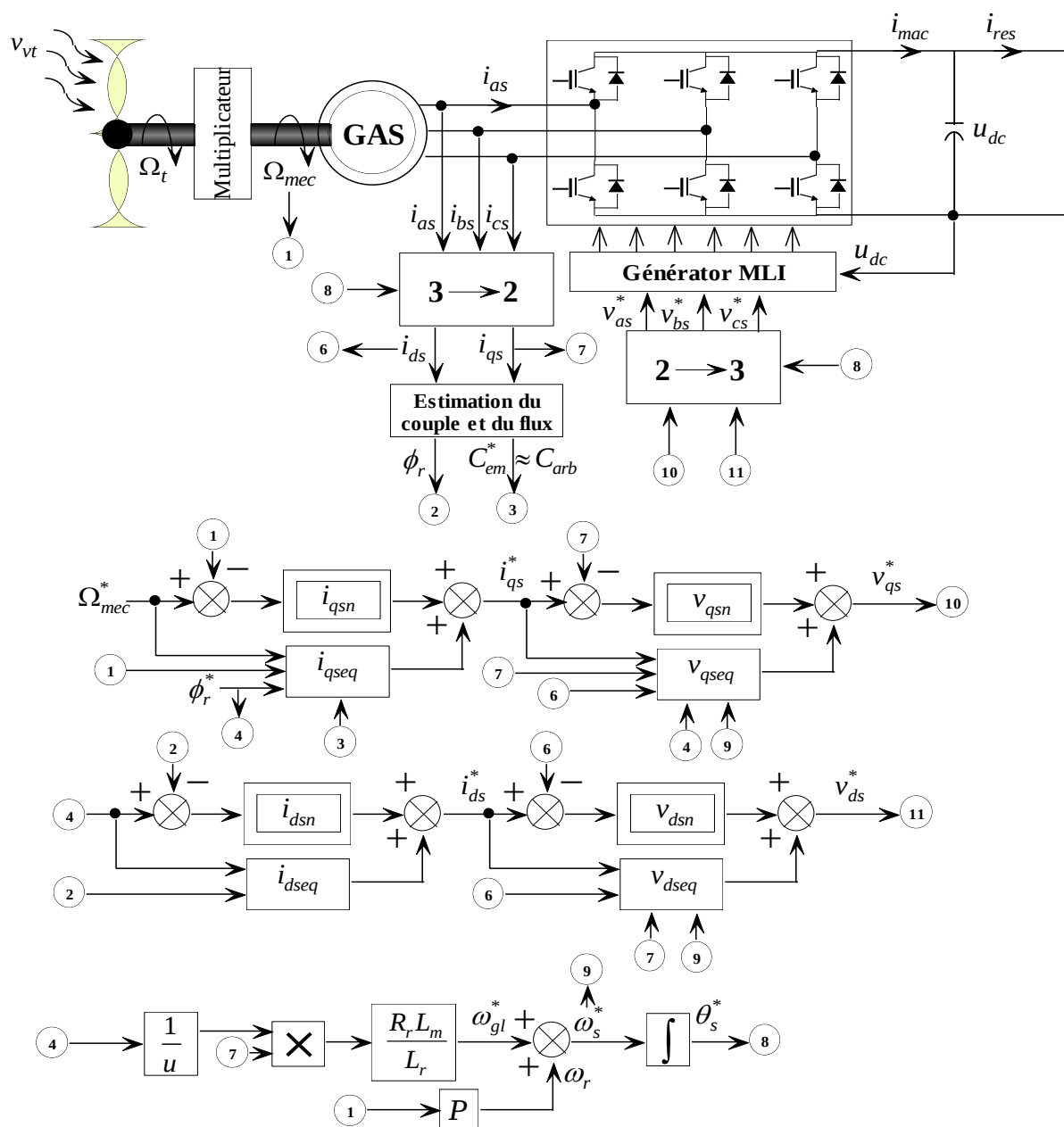


Figure 4.12. Schéma bloc de la commande par mode de glissement associée à la commande vectorielle à flux rotorique orienté de la GAS.

4.5 Contrôle de la liaison au réseau

La topologie du convertisseur MLI2 (situé entre le bus continu et le filtre) permet de générer et également d'appeler un courant provenant du réseau. L'objectif du convertisseur relié au réseau électrique est de maintenir la tension du bus continu constante quelque soit l'amplitude et le sens de la puissance. Ce dernier est commandé de manière à contrôler les courants transités par le filtre. A partir de la mesure de la

tension du bus continu, le convertisseur est commandé de façon à imposer des références aux tensions simples.

La tension du bus continu est définie par la relation suivante :

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (i_{mac} - i_{res}) \quad (4.96)$$

Où, C est la capacité du bus continu.

La puissance active de référence injectée au réseau est exprimée par la formule suivante :

$$P^* = u_{dc} i_{ond}^* \quad (4.97)$$

Avec :

$$i_{ond}^* = i_{mac} - i_{mac}^* \quad (4.98)$$

et,

$$i_{mac}^* = PI(u_{dc}^* - u_{dc}) \quad (4.99)$$

Les expressions des courants de références en fonctions des puissances active et réactive de références et des tensions du réseau mesurées sont donnés dans le repère de Park (d, q) comme suit [Ham08] :

$$\begin{bmatrix} i_{fd}^* \\ i_{fq}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_d^2 + v_q^2} \begin{bmatrix} P^* & Q^* \\ -Q^* & P^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (4.100)$$

Afin de maintenir le facteur de puissance du réseau unitaire, la puissance réactive de référence injectée au réseau est fixée à une valeur nulle [Car07].

Les tensions de référence sont exprimées selon les axes d, q par :

$$\begin{cases} v_{md}^* = v_d^* + v_d - \omega_s L_f i_{fq} \\ v_{mq}^* = v_q^* + v_d + \omega_s L_f i_{fd} \end{cases} \quad (4.101)$$

Avec :

$$\begin{cases} v_d^* = \text{PI}(i_{fd}^* - i_{fd}) \\ v_q^* = \text{PI}(i_{fq}^* - i_{fq}) \end{cases} \quad (4.102)$$

Les puissances active et réactive échangées avec le réseau sont :

$$\begin{cases} P = v_d i_d + v_q i_q \\ Q = v_q i_d - v_d i_q \end{cases} \quad (4.103)$$

En négligeant les pertes dans le condensateur, dans le convertisseur et dans le filtre, la représentation sous forme d'un schéma bloc du dispositif de commande est donnée sur la figure 4.13.

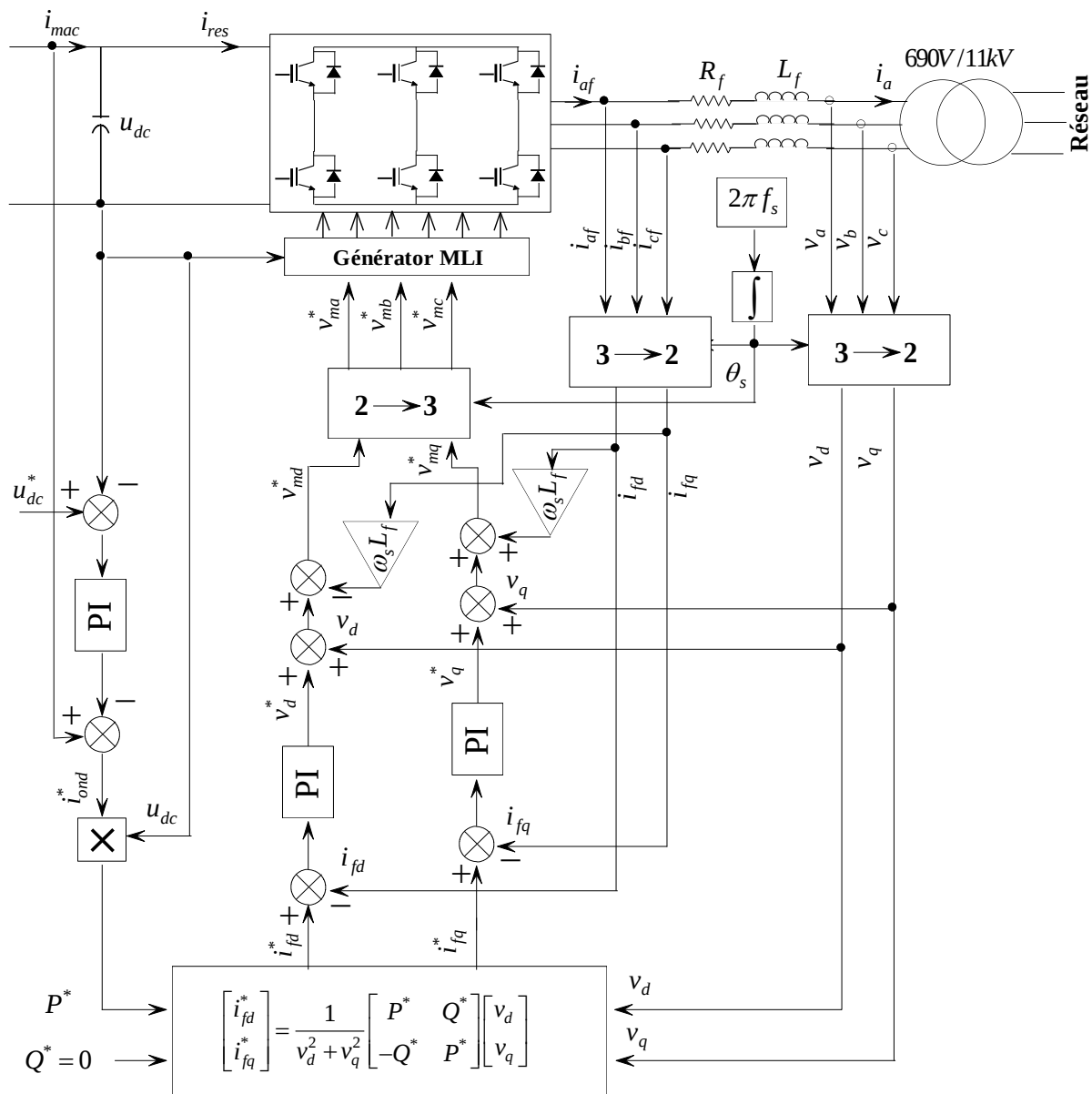


Figure 4.13. Schéma bloc représentatif du contrôle de la liaison au réseau.

4.6 Dimensionnement du bus continu

Le couplage des deux convertisseurs MLI est fait par l'intermédiaire du bus continu. En se basant sur les équations du dimensionnement du bus continu, dont les démonstrations sont données par [Ela04], on calcule la tension nécessaire à partir des relations suivantes :

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_{max}X^2}{9v_{eff}^4} + 1} \quad (4.104)$$

$$u_{dc} = \alpha v_{eff} 2\sqrt{2} \quad (4.105)$$

Dans notre cas, la puissance maximale est de $1.5MW$, la tension simple efficace est égale à $690V$ et l'impédance de la self de lissage de $1mH$ à comme valeur de réactance $X = 0.314\Omega$.

Après tout calcul fait, on trouve : $u_{dc} = 1950V$.

4.7 Résultats et interprétations

Dans cette partie, les résultats de simulation de la chaîne de conversion d'énergie basée sur la génératrice asynchrone à cage pilotée par le stator (dont les paramètres sont fournis en annexe C), obtenus sous Matlab/Simulink sont représentés et commentés.

La vitesse mécanique ainsi que sa référence de la génératrice asynchrone à cage sont représentées par la figure 4.14. Il est à noter que le profil du vent est choisi de façon à obtenir les différentes performances de la chaîne de conversion de l'énergie, pour des vitesses inférieures et supérieures à la vitesse de synchronisme tout en passant par celle de synchronisme, cela pour mettre en évidence les deux zones (II et III) de fonctionnement de la chaîne. L'évolution de la puissance mécanique sur l'arbre de la GAS (générée par la turbine) est illustrée par la figure 4.15, cette dernière varie

dans les phases de fonctionnement à des vitesses mécanique inférieures à la vitesse nominale, et elle est fixée par le dispositif de limitation de puissance à sa valeur nominale durant la phase de fonctionnement avec la vitesse supérieure à celle nominale. La figure 4.16 représente l'évolution du couple électromagnétique et de sa référence, celle-ci montre que le couple électromagnétique poursuit sa référence. Les deux composantes du flux rotorique sur les axes direct et quadratique sont illustrées sur la figure 4.17. Le flux direct poursuit sa référence et le flux quadratique est nul, cela est dû à l'orientation du flux rotorique réalisée conjointement avec la commande par mode de glissement. Les figures 4.18 et 4.19 montrent l'évolution de la tension et du courant statoriques et leur zoom, respectivement. Celles-ci dévoilent que la tension et le courant sont presque déphasés de 180° , c'est-à-dire de signe opposé, ce qui signifie que la puissance produite est de signe négatif (sens de transition de la puissance active, de la machine vers le réseau). L'allure du courant rotorique obtenue est donnée par la figure 4.20. Celui-ci augmente et diminue proportionnellement à la puissance mécanique (figure 4.15). La figure 4.21 représente les allures de la puissance active et réactive statoriques de la GAS. La tension du bus continu est maintenue constante et poursuit parfaitement sa référence, ce qui est illustré par les figures 4.22 et 4.23. Les allures de la tension et du courant avant le filtre (sortie du convertisseur MLI2) et de leur zoom sont données respectivement par les figures 4.24 et 4.25. Les figures 4.26 et 4.27 représentent les allures de la tension et du courant côté réseau avant le transformateur et de leurs zooms, respectivement. L'amplitude et la fréquence de la tension sont imposées par le réseau ($690\sqrt{2}V, 50Hz$) et l'amplitude du courant injecté au réseau est imposée par la technique du contrôle de la liaison au réseau à base de la régulation de la tension du bus continu et du contrôle du convertisseur MLI2 ; la figure 4.27 montre que la tension et le courant sont en opposition de phase, ce qui veut dire que l'écoulement de puissance est de l'aérogénérateur vers le réseau. La figure 4.28 illustre l'évolution des puissances active et réactive côté réseau. La puissance active injectée au réseau poursuit sa valeur de référence qui est égale à la puissance mécanique générée par l'aérogénérateur multiplié par le rendement de la chaîne supposé égal à 95%. La puissance réactive varie légèrement autour de sa valeur de référence imposée nulle.

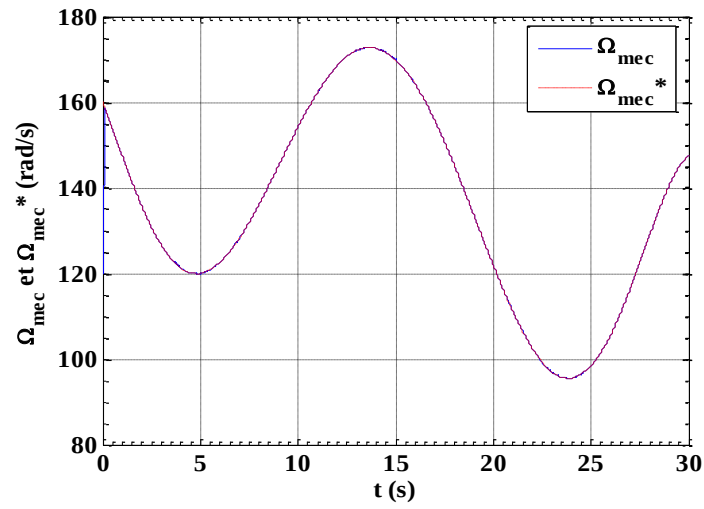


Figure 4.14. Vitesse mécanique de la GAS.

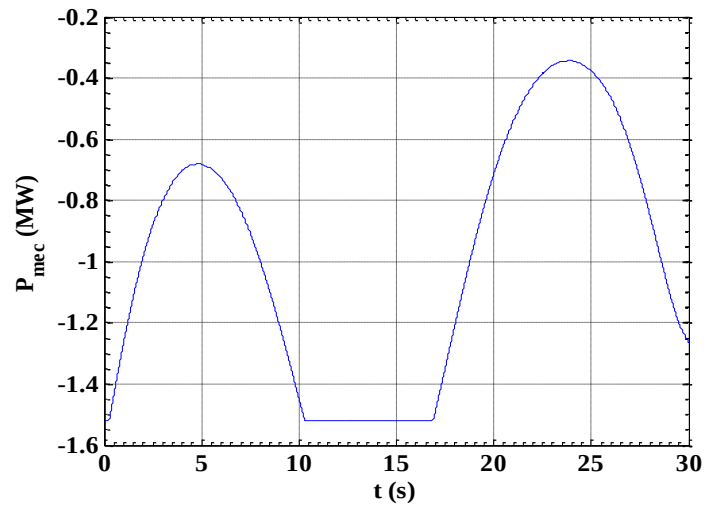


Figure 4.15. Puissance mécanique de la turbine.

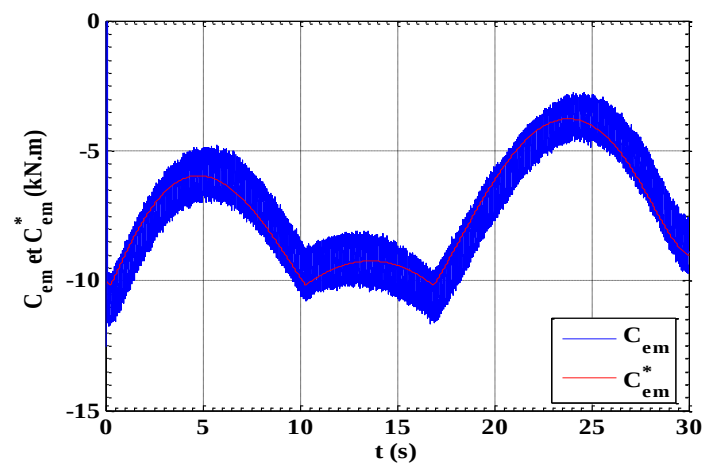


Figure 4.16. Couple électromagnétique.

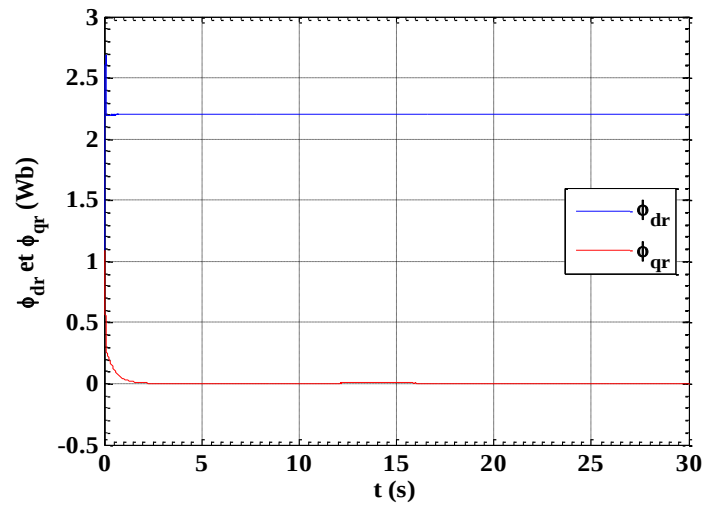


Figure 4.17. Flux direct et quadratique rotoriques.

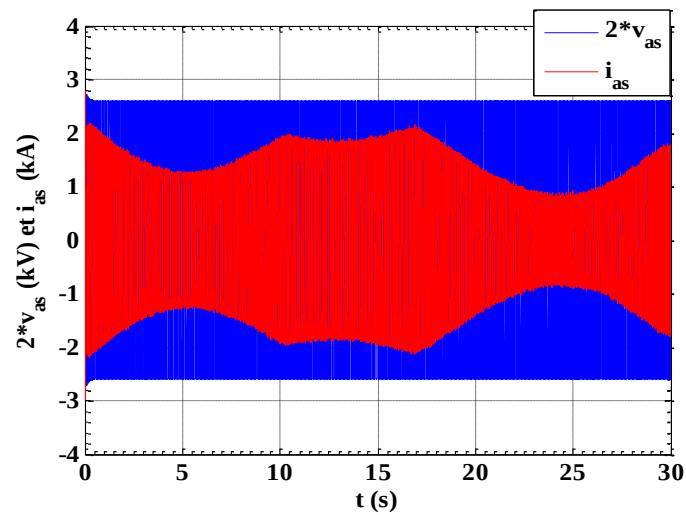


Figure 4.18. Tension et courant statoriques.

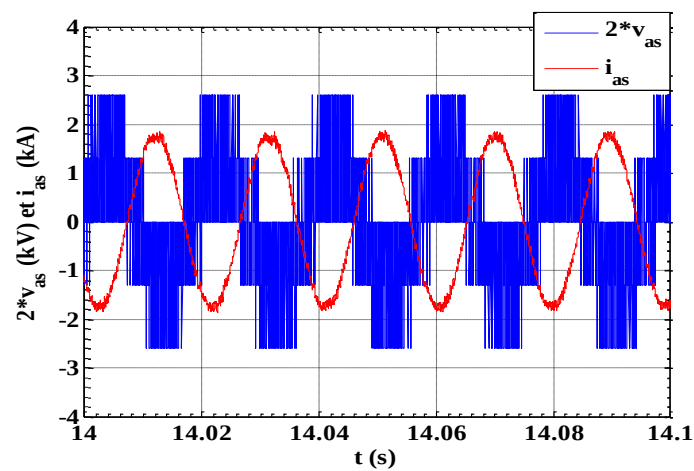


Figure 4.19. Zoom de la tension et du courant statoriques.

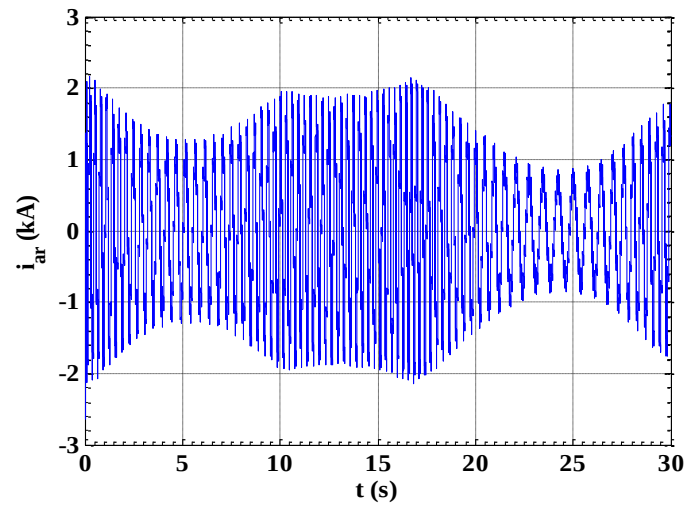


Figure 4.20. Courant rotorique.

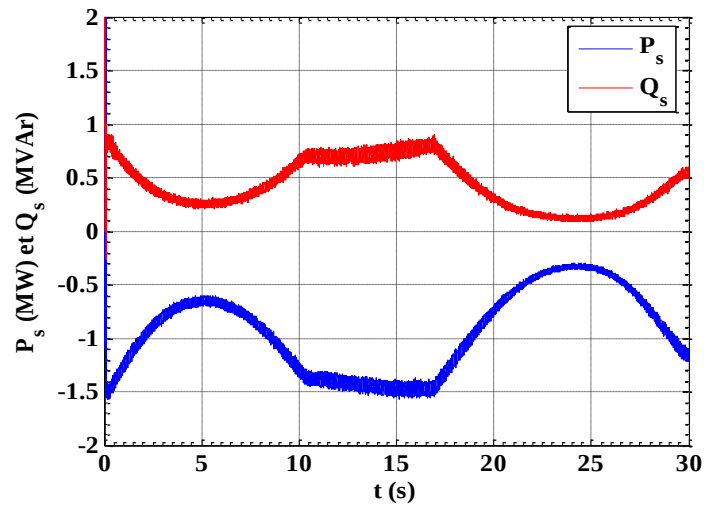


Figure 4.21. Puissances active et réactive statoriques.

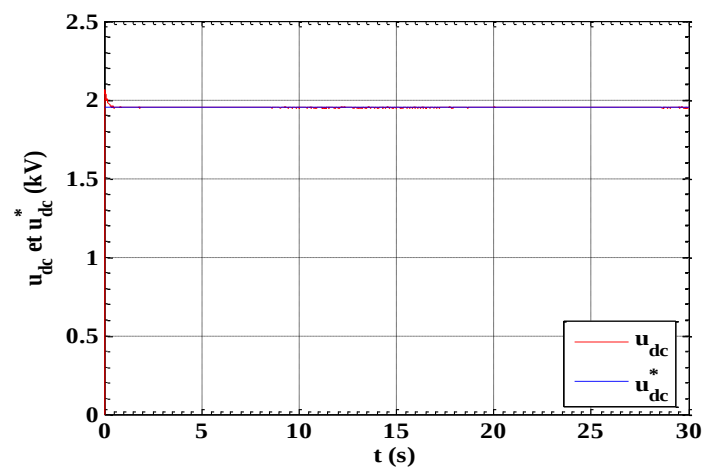


Figure 4.22. Tension du bus continu.

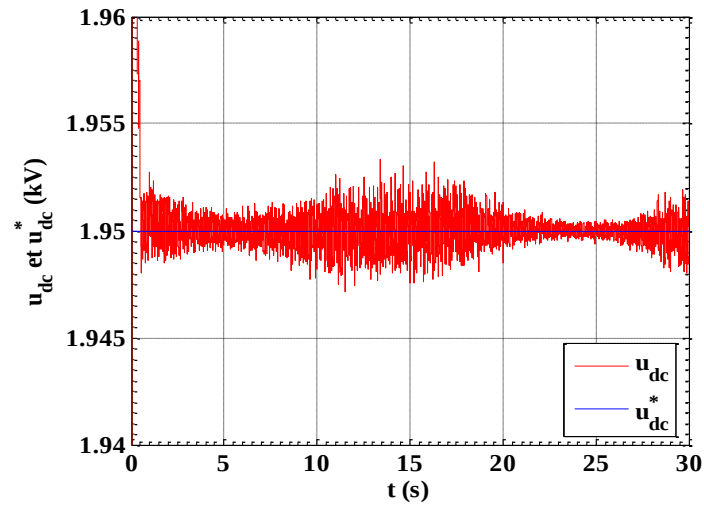


Figure 4.23. Zoom de la tension du bus continu.

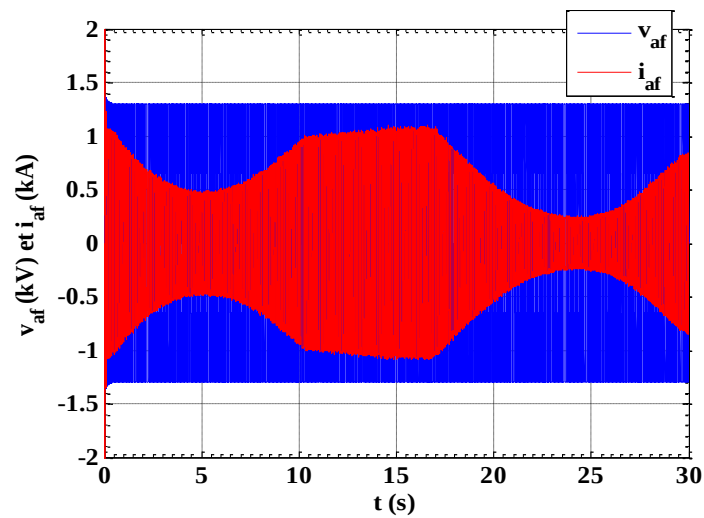


Figure 4.24. Tension et courant avant le filtre.

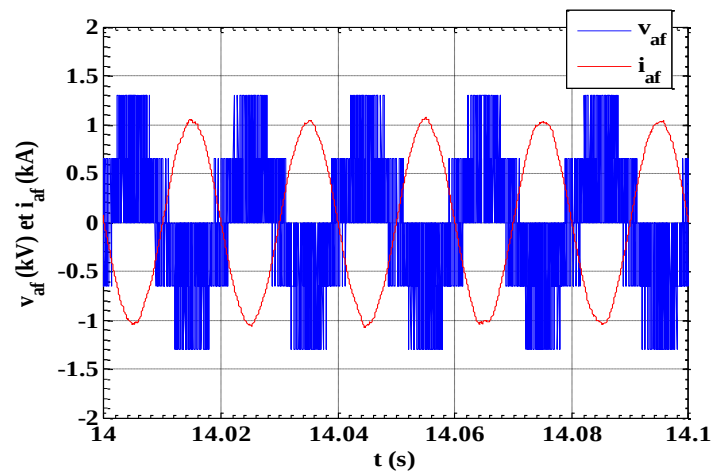


Figure 4.25. Zoom de la tension et du courant avant le filtre.

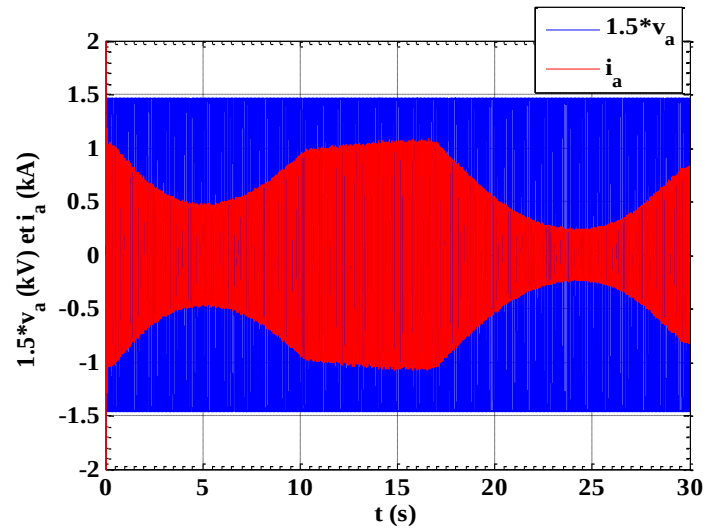


Figure 4.26. Tension et courant côté réseau.

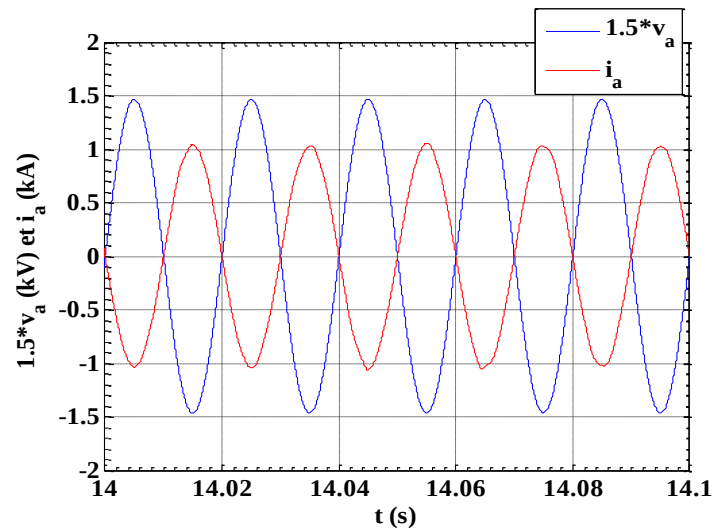


Figure 4.27. Zoom de la tension et du courant côté réseau.

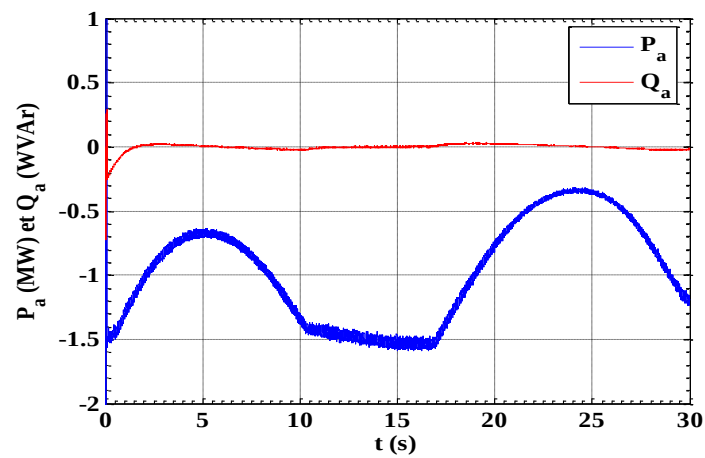


Figure 4.28. Puissances active et réactive côté réseau.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle de la chaîne de conversion de l'éolienne constituée d'une génératrice asynchrone à cage pilotée par le stator par des convertisseurs contrôlés en MLI et reliés au réseau via un bus continu, un filtre et un transformateur.

A partir de ce modèle on a construit un dispositif de commande de l'ensemble afin de faire fonctionner l'éolienne de façon à extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent. Ce dernier se compose de plusieurs blocs de commande. On a principalement décrit la commande par mode de glissement associé à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la GAS, le contrôle de la liaison au réseau avec la régulation du bus continu. Ce dernier est relié au réseau alternatif via un second convertisseur MLI qui a permis de contrôler les échanges de puissance active et réactive avec le réseau. Les résultats de simulation ont été présentés et commentés.

Conclusion Générale

Peut-on vivre sans énergie ? Bien sûr que non, répondront en chœur le physicien, le chimiste et le médecin : sans énergie, plus de liaisons nucléaires, plus de liaisons Chimiques, plus de molécules, plus de mouvement, plus de chaleur, plus de digestion, Donc certainement plus de vie !

L'impérieuse nécessité de disposer de sources d'énergie ne fait donc aucun doute l'énergie est incontournable.

Mais au-delà de ce qui lui est nécessaire pour entretenir son propre corps, l'homme moderne a aujourd'hui réussi à domestiquer, pour d'autres usages, à peu près toutes les formes d'énergie connues : l'énergie chimique (toutes les formes de combustion), l'énergie mécanique, l'énergie nucléaire, l'énergie électromagnétique, l'énergie thermique... Cette profusion énergétique est allée avec une explosion de la taille de l'humanité, passée de 400 millions d'habitants en 1800 à 6 milliards aujourd'hui, une multiplication de l'espérance de vie par 2 en deux siècles. Avec l'équivalent de 4 tonnes de pétrole par an, l'homme moderne dispose de l'équivalent de 25 à 50 esclaves à sa disposition, qui s'appellent réfrigérateur, lave-linge, automobile, avion, chauffage central, robots industriels, bétonneuse.....etc.

Mais en consommant à une vitesse accélérée des ressources qui ont mis des centaines de millions d'années à se constituer, en rendant le fonctionnement de notre monde moderne dépendant d'une abondance énergétique qui pourrait bien n'être que transitoire, en prenant le risque d'engendrer des perturbations climatiques, n'avons-nous pas pris des risques majeures. La question qui se pose aujourd'hui est clairement celle des quantités, des moyens d'en disposer, et des inconvénients ou des risques que nous sommes prêts à courir pour cela.

Comment évaluer les effets différés mais probables de l'usage des énergies fossiles, comme la rupture d'approvisionnement, le changement climatique ou, le devenir des déchets nucléaires ? Il apparaît désormais aux yeux de plus en plus de physiciens et d'ingénieurs de l'énergie que la prolongation des tendances actuelles nous amènera, après la poursuite d'une phase de croissance pendant une durée inconnue mais probablement courte au regard des temps historiques, à une décroissance structurelle inéluctable dans un monde fini. Pouvons-nous retarder cette issue ultime ?

C'est autour de ces questions que se focalise le thème de notre thèse, qui a pour objectifs de mettre en valeur l'intérêt de l'utilisation des énergies renouvelables pour un développement durable respectueux de l'environnement.

Le développement de énergies renouvelables est en continuelle progression, grâce aux différentes recherches et études effectuées de part le monde.

Le domaine pluridisciplinaire des aérogénérateurs fait appel à de nombreuses compétences, allant de la mécanique des fluides, à la résistance des matériaux, en passant par le génie électrique. Et les recherches dans ce domaine, seront d'autant plus fructueuses, qu'elles seront suffisamment pluridisciplinaires, ainsi que l'exigent ces systèmes complexes.

Vu le potentiel énergétique assez important dont dispose l'Algérie, il serait judicieux et opportun de s'investir dans l'étude, l'installation et le suivi de projet d'énergies renouvelables, solaire en premier lieu, hybride et éolien dans un deuxième temps.

La première partie de cette thèse, constituée par le chapitre un et deux, a contribué à l'évaluation des impacts des énergies renouvelables sur l'environnement et le développement durable, et cela grâce à l'étude comparative de la centrale hybride de Hassi R'mel avec la centrale conventionnelle de Tilghemt.

L'approche utilisée dans le cadre de ce travail a permis d'intégrer dans le processus de décision les avantages environnementaux et économiques pour des objectifs donnés de taux d'accès à l'électricité dans le pays. Elle a consisté dans la pratique à en évaluer les impacts sur les réductions d'émissions de gaz à effet de serre, ainsi que sur le bilan financier du secteur électrique Algérien.

La seconde partie est l'étude et la commande d'une éolienne de 1.5MW, couplé au réseau, le modèle mathématique des différents constituants de l'aérogénérateur, ainsi que sa commande ont été développés et les résultats de simulation sont représentés.

Enfin, cette thèse peut être une nouvelle base de départ pour des futures contributions. Une suite de ce travail pourrait se focaliser sur l'intégration du modèle de l'éolienne dans le modèle du réseau. En effet les éoliennes, se trouvant en cogénération avec d'autres sources traditionnelles dans le même réseau mettent en question sa stabilité transitoire et dynamique. L'éolienne, comme une source fluctuante, sera présentée, comme une source de perturbation qui influence la stabilité dynamique du réseau.

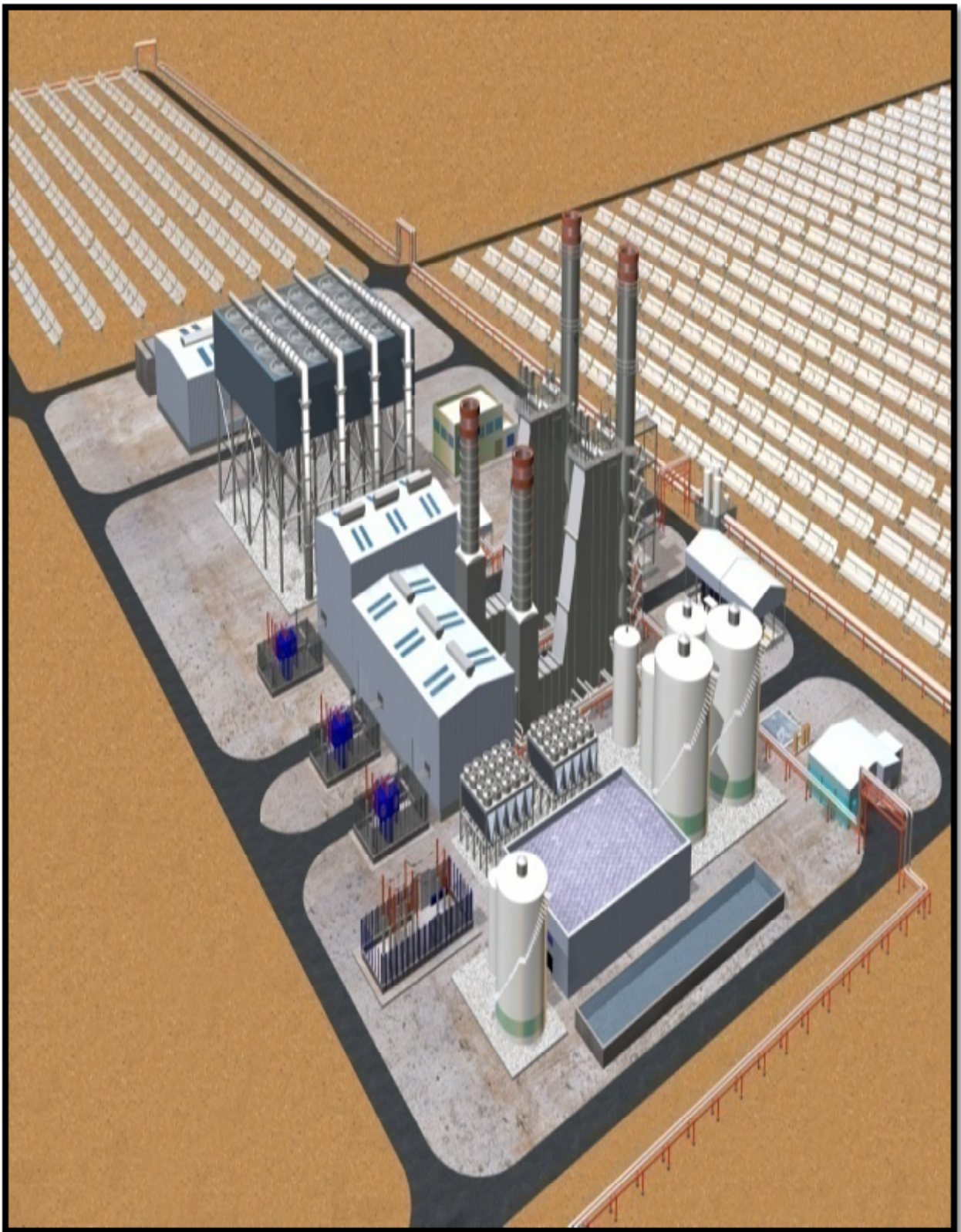


PHOTO CENTRALE HYBRIDE
DE HASSI-R'MEL

Annexes

Annexe A

Régulateur proportionnel intégral (PI) à avance de phase

Le schéma représentatif du bloc du régulateur PI à avance de phase est donné par la figure A.1.

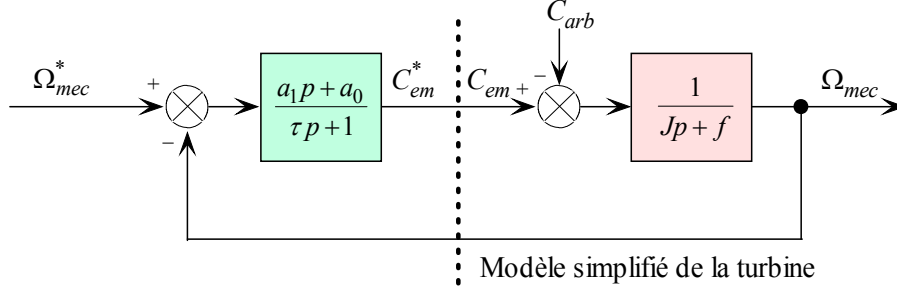


Figure A.1. Schéma bloc du régulateur PI à avance de phase.

L'expression du régulateur est :

$$C_{em}^* = \frac{a_1 p + a_0}{\tau p + 1} (\Omega_{mec}^* - \Omega_{mec}) \quad (A.1)$$

Où : a_0 , a_1 et τ sont les paramètres du régulateur à déterminer.

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$\Omega_{mec} = F(p) \Omega_{mec}^* + H(p) C_{arb} \quad (A.2)$$

Avec $F(p)$ est la fonction de transfert de la référence sur la vitesse :

$$F(p) = \frac{a_1 p + a_0}{J \tau p^2 + (f \tau + J + a_1) p + a_0 + f} \quad (A.3)$$

et $H(p)$ est la fonction de transfert de la perturbation C_{arb} :

$$H(p) = \frac{\tau p + 1}{J \tau p^2 + (f \tau + J + a_1) p + a_0 + f} \quad (A.4)$$

Afin d'atteindre l'objectif d'atténuer l'action de la perturbation (couple éolien C_{arb}), il faudra que le paramètre a_0 soit élevé, et on détermine les paramètres (a_1 et τ), de manière à avoir une fonction de transfert du 2^{ème} ordre, ayant une pulsation naturelle ω_n et un coefficient d'amortissement ξ , définis comme suit :

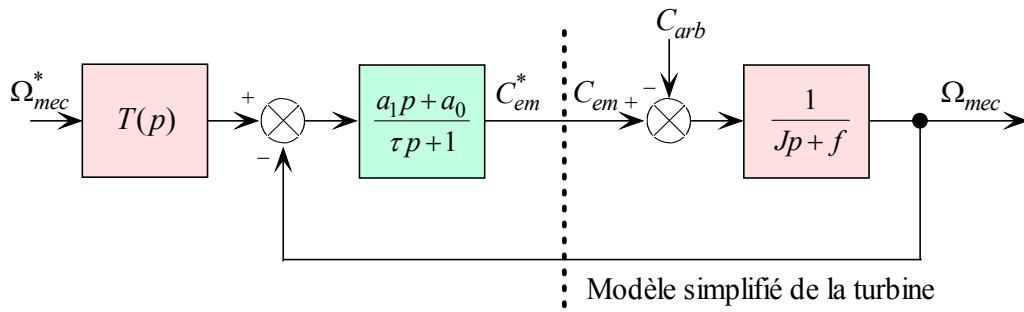
$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_0 + f}{J \tau}} \quad \text{et} \quad \xi = \frac{\tau + J + a_1}{a_0 + f} \cdot \frac{\omega_n}{2}$$

La constante de temps τ permet de régler la pulsation naturelle et donc le temps de réponse de l'asservissement de vitesse mécanique, l'amortissement étant unitaire afin d'atténuer les dépassements des puissances [Ghe08].

$$a_0 = \omega_n^2 J \tau \quad \text{et} \quad a_1 = \frac{2\xi}{\omega_n} (a_0 + f) - \tau - J$$

Le temps de réponse en boucle fermée affecte la valeur de la variation de puissance au moment de l'accrochage au réseau. En effet plus ce dernier est réduit plus la puissance électrique produite est importante en régime transitoire, autrement dit au démarrage de la génératrice, et réciproquement [Aim04].

Le régulateur PI à avance de phase avec anticipation est choisi pour limiter la génération de puissance au démarrage, dont le schéma bloc représentatif est représenté par la figure A.2.



A.2. Schéma bloc du régulateur PI à avance de phase avec anticipation.

La fonction de transfert anticipatrice est considérée tel que :

$$T(p) = \frac{J\tau p^2 + (f\tau + J + a_1)p + a_0 + f}{(a_1p + a_0) \left(\frac{0.05}{3} p + 1 \right)} \quad (A.5)$$

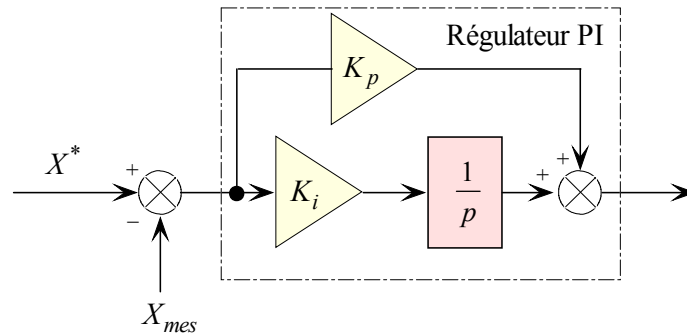
La constante du temps en boucle fermée est prise égale à 100ms.

Les paramètres du régulateur de la tension du bus continu sont déterminés de la même manière que ceux de la vitesse mécanique, en prenant la même constante de temps.

Annexe B

Régulateur proportionnel intégral (PI) avec compensation

Le schéma bloc représentatif du régulateur PI basé sur la compensation de la constante de temps de celui-ci avec celle du processus de la variable à régulée est illustré sur la figure B.1.



B.1. Schéma bloc du régulateur PI avec compensation.

Le régulateur est caractérisé par la forme mathématique suivante :

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (B.1)$$

Où :

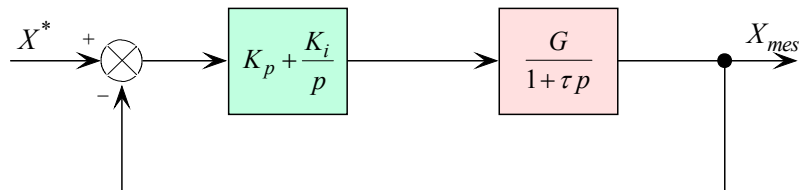
K_p est le gain proportionnel du régulateur ;

K_i est le gain intégral du régulateur.

La fonction de transfert des processus associés à ce genre de régulateur est de la forme mathématique suivante :

$$H(p) = \frac{G}{1 + \tau p} \quad (B.2)$$

Le schéma du processus à réguler est donné par la figure B.2.



B.2. Schéma bloc du processus à réguler.

La fonction de transfert en boucle ouverte du processus s'écrit :

$$T(p) = H(p)C(p) = \frac{G \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right)}{1 + \tau p} = GK_i \frac{1 + \frac{K_p p}{K_i}}{p(1 + \tau p)} \quad (B.3)$$

En posant $K_p/K_i = \tau$, on aura :

$$T(p) = \frac{GK_i}{p} \quad (B.4)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F(p) = \frac{GK_i}{GK_i p} = \frac{1}{1 + \frac{1}{GK_i} p} \quad (B.5)$$

Le temps de réponse t_r en boucle fermée afin d'atteindre 95% de la référence est :

$$t_r = 3 \frac{1}{GK_i} \quad (B.6)$$

Sachant que,

$$K_i = \frac{K_p}{\tau} \quad (B.7)$$

Donc :

$$t_r = 3 \frac{\tau}{GK_p} \quad (B.8)$$

D'où on tire les relations des paramètres du régulateur :

$$K_p = \frac{3\tau}{Gt_r} \quad (B.9)$$

$$K_i = \frac{3}{Gt_r} \quad (B.10)$$

Dans notre cas, les variables à réguler sont les courants i_{fd} et i_{fq} . Les constantes de temps en boucle fermée sont prises égales à 10ms.

Annexe C

Paramètres

C.1 Paramètres de la machine asynchrone [Ghe08]

Tension simple nominale	$690V$
Puissance nominale	$1.5MW$
Fréquence	$50Hz$
Résistance statorique	0.012Ω
Résistance rotorique	0.021Ω
Inductance cyclique statorique	$0.0137H$
Inductance cyclique rotorique	$0.0137H$
Inductance mutuelle	$0.0135H$
Moment d'inertie de l'aérogénérateur ramène sur l'arbre de la GAS	$50kg.m^2$
Coefficient de frottement visqueux de la GAS	$0.0071N.m.s / rd$
Nombre de paires de pôles	2

C.2 Paramètres de la turbine

Rayon des pales	$36m$
Nombre de pales	3
Hauteur de mat	$95m$
Gain du multiplicateur	90

Bibliographie

[Abd07]	L. Abdelhamid, R. Abdessemed, H. Amimeur, E. Merabet, <i>Etude des performances des génératrices utilisées dans les systèmes éoliens</i> , International Conference on Renewable Energy ICRE'07, University of Bejaia, pp. 1-6 (CDROM), 25-27 November 2007.
[Abd08]	L. Abdelhamid , “Contribution à l’étude des performances des générateurs électromagnétiques utilisés dans les systèmes éoliens”, Mémoire de Magister de l’Université de Batna, Juin 2008.
[Abd10]	L. Abdelhamid , H. Amimeur, L. Bahmed, <i>Analysis and simulation of the various generators used in wind systems</i> , Journal of Electric Engineering JEE, Article 10.1.4, Edition 1, Vol. 10, 2010.
[Abd97]	R. Abdessemed, M. Kadjoudj, “Modélisation des machines électriques,” Presses de l’Université de Batna, Algérie, 1997.
[Ada07]	M. Adamowicz, R. Strzelecki, D. Wojciechowski, <i>Steady state analysis of twin stator cascaded doubly fed induction generator</i> , in IEEE 5 th International Conference-Workshop-CPE 2007.
[Ame05]	A. Ameer, “Commande sans capteur de vitesse par DTC d’une machine synchrone à aimants permanents dotée d’un observateur d’ordre complet à modes glissants,” Thèse de Magister de l’Université de Batna, Algérie, Octobre 2005.
[Bel96]	A. Belamoudi, “Etude et simulation d’un système de conversion d’énergie électrique à base d’une machine asynchrone,” Thèse de Magister de l’Université de Batna, Algérie, Décembre 1996.
[Cim05]	G. Cimuca, “Système inertiel de stockage d’énergie associé à des générateurs éoliens,” Thèse de Doctorat de l’Ecole Nationale d’Arts et Métiers de Lille, France, 2005
[Col94]	C. P. Coleman, D. Grodble, <i>A comparaison of robustness fuzzy logic, PID, sliding mode control</i> , IEEE, pp. 1654-1659, 1994.

[Dav07]	A. Davigny, “Participation aux services système de ferme d’éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d’énergie,” Thèse de Doctorat de l’Université des Sciences et Technologies de Lille, Décembre 2007.
[Ela04]	S. El Aimani, “Modélisation de différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension,” Thèse de Doctorat de l’Ecole Centrale de Lille et l’Université des Sciences et Technologies de Lille conjointement, Décembre 2004.
[Fna06]	M. A. Fnaiech, F. Betin, F. Fnaiech, G. A. Capolino, <i>Sliding mode control for dual three-phase induction motor drives</i> , IEEE ISIE, Montréal, Québec, Canada, pp. 2281-2285, July 9-12 2006.
[Ger02]	O. Gergaud, “Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau,” Thèse de Doctorat de l’Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, Décembre 2002.
[Ghe08]	K. Ghedamsi, “Contribution à la modélisation et la commande d’un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone,” Thèse de Doctorat de l’Ecole Nationale Polytechnique, Décembre 2008.
[Ham08]	N. Hamrouni, M. Jraidi and A. Chérif, <i>New control strategy for 2-stage grid connected photovoltaic power system</i> , Renewable Energy Journal, 33, pp. 2212-2221, 2008.
[Hal91]	K. E. Hallenius, P. Vas, J. E. Brown, <i>The analysis of a saturated self-excited asynchronous generator</i> , IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6, no. 2, pp. 336–341, June 1991.
[Khe07]	L. Khettache, “Etude et commande d’un système éolien à base d’une machine électrique double alimentée,” Mémoire de Magister de l’Université de Batna, Algérie, 2007.
[Mir05]	A. Mirecki, “Etude comparative des chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,” Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Avril 2005.

[Mul02]	B. Multon, O. Gergaud, H. Benahmed, Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques, pp.1–12, Mai 2002.
[Nem02]	A. L. Nemmour, “Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation,” Mémoire de Magister de l'Université de Batna, Avril 2002.
[Ouh98]	M. A. Ouhrouche, X. D. Do, Q. M. Lê, R. Chaine, <i>EMTP based simulation of a self-excited induction generator after its disconnection from the grid</i> , IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 13, no. 1, pp. 7–13, March 1998.
[Pal05]	B. Palle, M. G. Simes, F. A. Farret, <i>Dynamic simulation and analysis of parallel self-excited induction generator for islanded wind farm systems</i> , IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 4, pp. 1099–1106, July/August 2005.
[Poi03]	F. Poitiers, “Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne,” Thèse de Docteur de l'Université de Nantes, France, Décembre 2003.
[Sin06a]	B. Singh, M. V. Verma, A. K. Tandon, <i>Rating reduction of static compensator for voltage control of three-phase self-excited induction generator</i> , in IEEE ISIE, Montréal, Québec, Canada, pp. 1194–1199, July 9–12, 2006.
[Tch03]	P.Tchouate, “Contribution des énergies renouvelables au développement durable du secteur électrique : le cas Camerounais,” Thèse de Docteur de l'Université Catholique de Louvain, Belgique, Décembre 2003.
[Wit00]	C. C. D. Wit, “Commande des moteurs asynchrones. 2 – optimisation, discrétisation et observateurs”, Hermès Science Publications, Paris, 2000.