



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA-BEJAIA  
Faculté... Technologie ...  
Département ... Génie électrique .....  
Laboratoire de Technologie Industrielle et de l'Information

# THÈSE

Présentée par

**ADJATI Arezki**

Pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR EN SCIENCES**

Filière : Electrotechnique

Option : ... Systèmes Electro – Energétiques ...

Thème

**Etude des machines asynchrones à double étoile  
en pompage hybride à énergies renouvelables**

Soutenue le : 09 octobre 2022

Devant le Jury composé de :

**Nom et Prénom**

**Grade**

<b>Mr TAMALOUZT Salah</b>	<b>MCA</b>	Univ. de Bejaia	Président
<b>Mr REKIOUA Toufik</b>	<b>Professeur</b>	Univ. de Bejaia	Rapporteur
<b>Mr BOUDJERDA Nasserline</b>	<b>Professeur</b>	Univ.de Jijel	Examinateur
<b>Mr KRIM Fateh</b>	<b>Professeur</b>	Univ. de Setif 1	Examinateur

Année Universitaire : .... 2021/2022....

## ***Avant-Propos***

***L'***homme serait-il digne héritier sur terre ?

***Préserverait-t-il sa planète de la destruction assurée et planifiée ?***

***Saurait-t-il comment parvenir à remplacer les énergies conventionnelles et nucléaires par des énergies dites propres et renouvelables ?***

***Oserait-t-il valoir une décarbonation tout en favorisant l'énergie de l'hydrogène ?***

***Aurait-il tant de cran pour puiser les fonds nécessaires pour investir sérieusement dans le photovoltaïque et l'éolien ?***

***Ferait-t-il le bon choix devant tant de compromis ?***

**T**outes ces interrogations se trouvent suspendues où ni les études poussées sur les technologies de pointe, ni l'éveil tardif des chercheurs chevronnés ne peuvent offrir des réponses convaincantes, mais tout simplement, tout se repose sur une décision politique et sur un sacrifice des banquiers et des financiers pour basculer sur une nouvelle mentalité de la conception des énergies du futur.

**D**ans cet aspect plutôt philosophique, une question s'impose d'elle-même :

*« Pourquoi attendre et ne pas entreprendre ? »*

**C'**est là une interrogation cruciale, au moment où les nations avancent et progressent perçant sur leurs passages les secrets des connaissances et la complication des sciences, voilà que nous, les pays sous-développés ou en voie de développement attendent, sans se lasser d'ailleurs, une innovation ou une technique nouvelle pour répondre aux exigences actuelles.

**L**e moment est venu pour que les états comprennent que l'eau et l'énergie sont deux éléments primordiaux pour aspirer à un niveau de vie décent afin de satisfaire les besoins continuels de l'homme et de s'apercevoir enfin que ces deux éléments sont les véritables précurseurs du réel développement.

**M**ême si l'Algérie détient des réservoirs, et pas des moindres, en gaz et en pétrole, elle est contrainte, à l'instar des autres pays industrialisés, de développer ces formes d'énergies nouvelles, pour assumer et assurer sa place au rang mondial.

**L'**homme a toujours cherché à satisfaire ses désirs et à améliorer son bien être immédiat et son confort continuels sans se soucier du sort de ses pairs, ni de la faune, ni de la flore causant une destruction assurée de son environnement et de sa planète sous le brassard du développement.

**L**e soleil, le vent, la marémotrice, ..., bref, la nature s'occupe à merveille de ses hôtes, mais ce respect doit être mutuel. Le moment est venu pour que l'homme cesse immédiatement de nuire à la nature, déjà, par une réduction des émissions excessives du dioxyde de carbone

---

qui asphyxie la planète puis en se reconvertissant aux énergies dites vertes pour assurer la pérennité de sa progéniture et préserver la nature.

**N**e croyant guère que le créateur divin a conçu des inutilités en créant l'univers, l'homme explore toujours sa planète en voulant apprivoiser tout phénomène pouvant lui procurer davantage d'avantages.

**O**utre le fait que les énergies renouvelables, sans émission de carbone, peuvent réduire considérablement les effets du réchauffement climatique, d'autres procédés ont été développés, à l'instar des biocarburants obtenus à partir de la biomasse et classés comme énergie illimitée et renouvelable, ne nécessitant point de haute technologie.

**E**n effet, quatre-vingt-huit pays ont exploité approximativement 284 TWh de chaleur géothermique en 2018, soit une économie de près de 81 millions de tonnes de pétrole qui a induit une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère d'environ 252 millions de tonnes. L'hydroélectricité, un géant énergétique oublié, a fourni en 2020 un sixième de la production mondiale d'électricité.

**L**a capacité mondiale en énergie éolienne a augmenté de 19 % en 2019, selon le rapport du Conseil Mondial de l'Energie Eolienne et en 2020 une croissance de 59 % est observée dans la production éolienne terrestre. Cette augmentation est due essentiellement aux deux grands géants, soit la chine et les Etats-Unis malgré la pandémie du coronavirus qui a freiné les objectifs tracés. L'option de l'éolienne offshore, même si elle est aussi critiquée pour motif de nuisance au paysage et à la faune marine, peut se révéler être trois fois plus puissante qu'une éolienne terrestre.

**S**ortant de l'expectatif, la technologie de la FC à hydrogène vient d'être appliquée de série sur une voiture ayant, pour un seul plein d'hydrogène, une autonomie de 1500 km environ et un temps de recharge très faible. Ne produisant pas de CO<sub>2</sub>, ni d'autres émissions polluantes contrairement au moteur traditionnel à combustion qui, pour le même trajet, émet environ 126 kg de CO<sub>2</sub>.

**A**insi il est tout à fait normal d'être optimiste quant à l'avenir et à la l'hybridation de ces ressources disponibles pour toute l'humanité et à l'éventuelle généralisation de leur emploi, pour mettre fin à la famine et aux épidémies causées par la rareté de l'or bleu.

**P**our que l'homme puisse vivre dans un milieu hostile soit-il, il est nécessaire d'avoir en sa possession l'eau, considérée comme une source vitale et l'énergie pour pouvoir puiser ce liquide précieux s'il n'est pas accessible au cours de l'histoire, l'homme a toujours combattu son frère pour s'accaparer des sources d'eau, pour les utiliser pour l'irrigation et le bétail.

**U**n jour, l'humanité va sans doute « rire » de la stupidité de leurs aïeux pour avoir osé utiliser les énergies fossiles au lieu de puiser les diverses énergies renouvelables et peut être, elle va les blâmer de ne pas être assez mures et évolués.

---



## Remerciements

*J'adresse mes remerciements les plus sincères,  
A mon promoteur, Mr Toufik REKIOUA,  
Professeur à l'université A.MIRA de Bejaïa,  
pour son aide et sa patience,*

*A Mme REKIOUA,  
Professeur à l'université de Bejaïa,  
pour sa disponibilité, sa bonté et ses recommandations,*

*A mon père ADJATI Hachemi, qui ne m'a pas quitté  
une seconde lors de chaque correction du manuscrit,  
même s'il nous a quitté depuis le 26 juillet 2016.*

*Aux membres du jury,  
Mr TAMALOUZT Salah, MCA à l'université de Bejaïa,  
Mr BOUDJERDA Nasserdine, Professeur à l'université de Jijel  
et Mr KRIM Fateh, Professeur à l'université de Sétif,  
pour avoir accepté de juger ce modeste travail,*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin  
à la concrétisation de cette thèse.*

*Arezki ADJATI*







## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail:*

*A la mémoire de mon père Hachemi, Lanterne de ma vie,*

*A la mémoire de ma sœur Nadia qui m'avait soutenu  
le long de ma formation et qui était à l'origine de ma  
carrière d'enseignant, que la nonchalance des hôpitaux  
avait emporté.*

*A la mémoire de mes tantes Malika, Taous et Hafsa.*

*A ma mère Sassa,  
La merveilleuse, La précieuse, L'irremplaçable,*

*A mes sœurs, mes fiertés, Dalila, Naïma, Bahia et Ouarda,  
A mes frères, ma force, Samir et Faouzi,  
A mes belles-sœurs et mes beaux-frères,  
A mes nièces et mes neveux,  
A Sonya, ma compagne de toujours,  
qui est devenue ma femme  
A tous mes amis(es) et collègues de travail.*

*Arezki ADJATI*



# **S**OMMAIRE

# SOMMAIRE

---

<b>NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS</b>	i
<b>LISTE DES FIGURES</b>	vi
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	xii

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Introduction générale	01
-----------------------	----

## **CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES MULTI-SOURCES À ÉNERGIES RENOUVELABLES EN POMPAGE**

I.1	Introduction	05
I.2	Généralités sur les sources d'énergies dans le monde	05
I.2.1	Production d'énergie électrique dans le monde	06
I.2.2	Consommation d'énergie électrique dans le monde	06
I.3	Générateur photovoltaïque	07
I.3.1	L'énergie du soleil	07
I.3.2	Cellule photovoltaïque	08
I.3.2.1	Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque	09
I.3.2.1.1	Courant de court-circuit	09
I.3.2.1.2	Tension de circuit ouvert	09
I.3.2.1.3	Facteur de forme	10
I.3.2.1.4	Le rendement	10
I.3.3	Générateur photovoltaïque	11
I.3.4	Cas de défaillance d'une ou plusieurs cellules	11
I.3.5	Avantages et inconvénients du GPV	12
I.4	Energie éolienne	13
I.4.1	Energie du vent	13
I.4.2	Gisement éolien en Algérie	13
I.4.3	Notions sur les éoliennes	14
I.4.4	Zones de fonctionnement de l'éolienne	15
I.4.5	Principe de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique	16
I.4.6	Inconvénients, avantages	17
I.4.6.1	Avantages	17
I.4.6.2	Inconvénients	17
I.4.6.3	Avantages et inconvénients selon le fonctionnement des éoliennes	18
I.5	L'Hydrogène	19
I.5.1	L'Hydrogène et l'énergie	19
I.5.2	L'Hydrogène et l'économie	19
I.5.3	Production de l'hydrogène	20
I.5.4	Stockage de l'hydrogène	21
I.5.5	Hydrogène et sécurité	21

---

I.5.6	Production et répartition mondiale de la production de l'hydrogène	22
I.6	Pile à combustible	23
I.6.1	Généralités	23
I.6.2	Constitution d'une pile à combustible	24
I.6.2.1	Les électrodes	24
I.6.2.2	Electrolyte	25
I.6.2.3	Catalyseur	25
I.6.2.4	Plaque bipolaire	25
I.6.3	Principe de fonctionnement de la PAC	26
I.6.4	Différents types de PAC	26
I.6.4.1	Proton Exchange Membranes Fuel Cell	26
I.6.4.2	Phosphoric Acid Fuel Cells	27
I.6.4.3	Alkaline Fuel Cells	27
I.6.4.4	Direct Methanol Fuel Cells	27
I.6.4.5	Solid Oxid Fuell Cells	27
I.6.4.6	Molten Carbonate Fuel Cells	28
I.6.5	Avantages et inconvénients des PEMFC	28
I.6.5.1	Avantages	28
I.6.5.2	Inconvénients	28
I.7	Notions sur les machines multiphasées	28
I.7.1	Caractéristiques des machines multiphasées	29
I.7.1.1	Machines multiphasées de Type 1	29
I.7.1.2	Machines multiphasées de Type 2	30
I.7.2	Avantages de la machine multiphasée	30
I.7.2.1	La segmentation de puissance	30
I.7.2.2	La fiabilité	30
I.7.2.3	Elimination d'harmonique d'espace	31
I.7.2.4	Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques	31
I.7.2.5	Amélioration du facteur de puissance	31
I.7.3	Inconvénients de la machine multiphasée	31
I.8	Généralités sur les pompes	31
I.8.1	Pompe centrifuge	32
I.8.1.1	Constitution d'une pompe centrifuge	32
I.8.1.2	Fonctionnement	32
I.8.2	Différents types de pompes centrifuges	33
I.8.3	Autres types de pompes	33
I.8.3.1	Machines élévatoires simples – vis d'Archimède	33
I.8.3.2	Pompe à piston	34
I.8.3.3	Aéro-éjecteurs	34
I.8.4	Cavitation	35
I.9	Système d'énergie hybride	35
I.9.1	Définition de l'hybridation	35
I.9.2	Importance de l'hybridation	35
I.9.3	Classification des systèmes électriques hybrides	36
I.9.4	Performances d'un système hybride	36
I.9.5	Différentes architectures des SHER	36
I.9.5.1	Configuration série à bus CC	37
I.9.5.2	Architecture mixte à configuration parallèle à bus CC/AC	38
I.9.5.3	Architecture à bus AC	39
I.9.5.4	Configuration à commutation	39
I.10	Conclusion	40

---

**CHAPITRE II :  
MODÉLISATION DES SOURCES D'ÉNERGIES  
RENOUVELABLES ET DES ACTIONNEURS UTILISÉS**

II.1	Introduction	42
II.2	Présentation du schéma à étudier	42
II.3	Modélisation du générateur photovoltaïque	43
II.3.1	Modèle d'une cellule idéale	43
II.3.2	Modèle explicite	43
II.3.3	Modèle à une diode et à deux diodes	44
II.3.3.1	Détermination des paramètres du modèle à une diode	46
II.3.3.2	Détermination des paramètres du modèle à deux diodes	46
II.3.4	Association des cellules photovoltaïques	46
II.3.5	Modélisation du générateur photovoltaïque	47
II.3.6	Convertisseur à pilotage MPPT	49
II.3.7	Modélisation du hacheur Buck-Boost	50
II.3.8	Modélisation du filtre	51
II.4	Modélisation de la turbine de l'éolienne	52
II.4.1	Puissance moyenne disponible du vent théoriquement récupérable	52
II.4.2	Énergie du vent réellement récupérable	52
II.4.3	Coefficient de puissance $C_p$	52
II.4.4	La puissance aérodynamique	52
II.4.5	Le couple de la turbine	52
II.4.6	Pompage éolien	53
II.4.7	Modélisation de la chaîne de conversion éolienne	53
II.5	Modélisation du générateur asynchrone à double étoiles (GASDE)	54
II.5.1	Description de la GASDE	54
II.5.2	Modèle biphasé lié au système d'axe « d,q »	54
II.5.2.1	Courant de magnétisation	55
II.5.2.2	Diverses inductances	55
II.5.2.3	Couple électromagnétique	57
II.5.2.4	Equations électriques	57
II.5.2.5	Flux rotoriques et statoriques	57
II.5.3	Auto-amorçage de la GASDE	58
II.5.3.1	Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage	59
II.5.3.2	Modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE	60
II.5.3.3	Modélisation des charges	60
II.5.3.3.1	Charge purement résistive	60
II.5.3.3.2	Charge inductive	61
II.6	Modélisation de la pile à combustible	61
II.6.1	Le choix de la pile à combustible	61
II.6.2	Modèle de tension d'une PAC	62
II.6.2.1	Circuit électrique équivalent	62
II.6.2.2	Tension de Nernst	62
II.6.2.3	Pertes d'activation	63
II.6.2.4	Pertes ohmiques	63
II.6.2.5	Pertes de concentration	63
II.6.2.6	Potentiel réel global d'une pile à combustible	64
II.7	Modélisation du moteur asynchrone à double étoile (MASDE)	65
II.7.1	Description du MASDE	65

---

II.7.2	Modèle du MASDE	65
II.7.2.1	Equations électriques de la machine	66
II.7.2.2	Equations magnétiques de la machine	66
II.7.2.3	Equation magnétique développée du MASDE	67
II.7.2.4	Energie magnétique	67
II.7.2.5	Couple électromagnétique	67
II.7.2.6	Equation mécanique	68
II.7.3	Modèle biphasé du MASDE	68
II.7.3.1	Conventions	68
II.7.3.2	Transformation de PARK directe	69
II.7.3.3	Transformation de PARK inverse	70
II.7.3.4	Modèle et choix du référentiel	70
II.7.4	Application de la transformation de PARK à la MASDE	71
II.7.4.1	Equations des tensions	72
II.7.4.2	Equations magnétiques	72
II.7.4.3	Equations mécaniques	73
II.7.4.3.1	Puissance instantanée	73
II.7.4.3.2	Couple électromagnétique	74
II.7.4.4	Mise sous forme d'équation d'état	75
II.8	Adaptation de l'alimentation par onduleur	77
II.8.1	Modélisation de l'onduleur	77
II.8.2	Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle	78
II.8.2.1	Onde modulante	78
II.8.2.2	La porteuse	78
II.8.2.3	Critères de performance	78
II.9	Modélisation des pompes	79
II.9.1	Débit de pompage « Q »	79
II.9.2	Hauteur manométrique totale (HMT)	80
II.9.2.1	Cas de pompe en aspiration	81
II.9.2.2	Cas de pompe en charge	81
II.9.2.3	Cas de pompe immergée	82
II.9.3	Hauteur d'aspiration	83
II.9.4	Pertes de charge	83
II.9.5	Hauteur totale de pompage	84
II.9.6	Puissance d'une pompe	84
II.9.7	Charge nette à l'aspiration NPSH	84
II.9.8	Caractéristiques de la pompe centrifuge	85
II.9.8.1	Caractéristique «Débit – Vitesse»	86
II.9.8.2	Caractéristique « Couple-Vitesse »	86
II.9.8.3	Caractéristique « Débit-Hauteur »	86
II.9.8.4	Caractéristique de rendement de la pompe	87
II.9.9	Utilisation des lois de similitude	87
II.9.9.1	Débit	87
II.9.9.2	Puissance du moteur	88
II.9.9.3	Hauteur manométrique totale	88
II.10	Conclusion	88

---

## **CHAPITRE III :**

### **DIMENSIONNEMENT ET APPLICATION DE LA MASDE EN POMPAGE HYBRIDE À ÉNERGIES RENOUVELABLES**

III.1	Introduction	90
III.2	Présentation du site	90
III.3	Dimensionnement de la pompe	93
III.3.1	Evaluation des besoins en eau	93
III.3.2	Durée de pompage	93
III.3.3	Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire	93
III.3.4	Puissance mécanique	93
III.3.5	Puissance électrique	94
III.3.6	Puissance délivrée nécessaire	94
III.3.7	Energie électrique nécessaire	94
III.4	Dimensionnement du générateur photovoltaïque	95
III.4.1	Puissance du générateur photovoltaïque	95
III.4.2	Dimensionnement des panneaux photovoltaïques	95
III.4.3	Détermination du nombre de panneaux photovoltaïques	96
III.5	Dimensionnement de la turbine	97
III.6	Dimensionnement de la pile à combustible	98
III.7	Essais sur le GPV	99
III.7.1	Influence de l'ensoleillement sur les performances du GPV	99
III.7.2	Influence de la température sur les performances du GPV	103
III.7.3	Influence de la résistance série et shunt sur la caractéristique PV du module	103
III.8	Simulation numérique de la MASDE alimentée par le réseau électrique	104
III.8.1	Sources de tension alimentant les deux étoiles de la machine	104
III.8.2	Vitesse de rotation	104
III.8.3	Couple électromagnétique	104
III.8.4	Flux rotorique	106
III.8.5	Courants direct et en quadrature	107
III.8.6	Courants statoriques	107
III.9	Simulation numérique de la MASDE alimentée par des onduleurs de tension	108
III.9.1	Performances de l'onduleur	108
III.9.2	Vitesse de rotation	108
III.9.3	Couple électromagnétique	108
III.9.4	Flux rotorique & Courants directs et en quadrature	111
III.9.5	Courants statoriques	111
III.10	Simulation numérique de la GASDE	111
III.10.1	Fonctionnement de la GASDE à vide	111
III.10.2	Fonctionnement de la GASDE avec une charge purement résistive	114
III.10.3	Fonctionnement de la GASDE avec une charge inductive	117
III.10.4	Influence de la capacité d'auto-amorçage	120
III.10.5	Influence de la valeur de la résistance	120
III.10.6	Influence de la vitesse de rotation	121
III.11	Performances de la pompe	124
III.11.1	Couple du moteur – Couple résistant	124

---

III.11.2	Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation	124
III.11.3	Caractéristique « Couple – Vitesse de rotation »	124
III.11.4	Caractéristique « Débit – Vitesse de rotation »	124
III.11.5	Evolution du débit & caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »	127
III.11.6	Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation	127
III.12	Conclusion	127

**CHAPITRE IV :**  
**GESTION DU SYSTÈME DE POMPAGE HYBRIDE**  
**À ÉNERGIES RENOUVELABLES**

IV.1	Introduction	129
IV.2	Alimentation de la station de pompage	129
IV.3	Stratégies de gestion du système hybride	130
IV.4	Scénario probable de gestion du système hybride proposé	131
IV.4.1	Nomenclature utilisée	131
IV.4.2	Organigramme de gestion du système hybride	132
IV.4.3	Principe de fonctionnement de l'hybridation des sources	133
IV.4.4	Différents modes et scénarios probables de fonctionnement	133
IV.4.4.1	Mode A « $H < H_{max}$ & $FC < FC_{max}$ »	133
IV.4.4.2	Mode B « $H < H_{max}$ & $FC > FC_{max}$ »	136
IV.4.4.3	Mode C « $H > H_{max}$ & $FC < FC_{max}$ »	138
IV.4.4.4	Mode D « $H > H_{max}$ & $FC > FC_{max}$ »	139
IV.5	Système GPV-FC	141
IV.5.1	Composants du système hybride GPV-FC	141
IV.5.2	Dimensionnement du système hybride GPV-FC	142
IV.5.3	Résultats & commentaires	142
IV.5.4	Synthèse d'une combinaison GPV-FC	144
IV.6	Système Photovoltaïque-Eolienne	145
IV.6.1	Composants du système hybride GPV – Turbine éolienne	145
IV.6.2	Redressement des tensions générées par la GASDE	146
IV.6.3	Résultats & commentaires	147
IV.6.4	Synthèse d'une combinaison « Photovoltaïque-Eolienne »	149
IV.7	Système Eolienne – Pile à combustible	149
IV.7.1	Composants du système hybride « Turbine éolienne – Pile à combustible »	150
IV.7.2	Résultats et commentaires	151
IV.7.3	Synthèse d'une combinaison « Eolienne – Pile combustible »	152
IV.8	Système « Photovoltaïque – Eolienne – Pile à combustible »	152
IV.8.1	Composants du système « GPV – Eolienne – Pile à combustible »	153
IV.8.2	Combinaison « Photovoltaïque – Eolienne – Pile à combustible »	153
IV.8.3	Synthèse d'une combinaison « GPV – Eolienne – Pile combustible »	156
IV.9	Conclusion	156

---



**CHAPITRE V :  
ÉTUDE DU POMPAGE HYBRIDE EN MODE DÉGRADÉ**

V.1	Introduction	158
V.2	Description du fonctionnement en mode « dégradé »	158
V.3	Causes de fonctionnement en mode « dégradé »	159
V.3.1	Dégradation au niveau des connectiques	160
V.3.2	Dégradation au niveau de la MASDE et de la GASDE	160
V.3.3	Dégradation au niveau des sources d'énergies	160
V.3.3.1	Dégradation au niveau du générateur photovoltaïque	160
V.3.3.2	Dégradation au niveau de l'éolienne	160
V.3.3.3	Dégradation au niveau de la pile à combustible	161
V.4	Dégradation au niveau de l'alimentation de la machine	161
V.4.1	Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance	161
V.4.2	Défaut de fermeture d'un transistor de puissance ou fusion d'un fusible	162
V.4.3	Stratégies d'isolation du défaut	163
V.4.4	Stratégie de commande en mode dégradé	164
V.4.4.1	Action sur le courant d'une seule phase encore saine par chaque phase ouverte.	164
V.4.4.2	Action sur chacun des courants dans les phases encore saines	164
V.4.5	Réduction des oscillations du couple	165
V.4.5.1	Première méthode	165
V.4.5.2	Deuxième méthode	165
V.5	Modèle de la MASDE dans le repère « $\alpha$ - $\beta$ »	165
V.5.1	Equations électriques de la MASDE	166
V.5.2	Matrice de transformation	166
V.5.3	Equations dans le repère « $\alpha$ - $\beta$ »	168
V.5.3.1	Equations électriques	168
V.5.3.2	Equations des flux	168
V.5.3.3	Equations dans l'espace « Z »	168
V.5.3.4	Equations mécanique	169
V.6	Simulation de la MASDE dans le repère [ $\alpha$ - $\beta$ ]	169
V.6.1	Fonctionnement en mode sain	169
V.6.2	Défaillance d'une phase	171
V.6.3	Défaillance de deux phases	173
V.6.4	Défaillance de trois phases	176
V.6.5	Récapitulation des diverses simulations	179
V.7	Conclusion	180

**CONCLUSION GÉNÉRALE**

Conclusion générale	182
---------------------	-----

**BIBLIOGRAPHIE**

Bibliographie	188
---------------	-----

**ANNEXES**

Annexes	198
---------	-----

---

**NOTATIONS**

**ET**

**ABRÉVIATIONS**

# PRINCIPALES NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

## ABRÉVIATIONS

FC : Fuel cell  
 GASDE : Génératrice asynchrone à double étoile.  
 GPV : Générateur photovoltaïque.  
 mce : mètre colonne d'eau  
 MASDE : Moteur asynchrone à double étoile.  
 MLI : Modulation de largeurs d'impulsions.  
 MPPT : Maximum Power Point Tracking  
 PAC : Pile à combustible.  
 PV : Photovoltaïque.  
 P & O : Perturb and Observe  
 SEH : Système d'Energie Hybride.

### A

A : Facteur d'idéalité (GPV)  
 A : Pente de Tafel (FC)  
 A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub> : Indices correspondants aux trois phases du premier stator  
 A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>2</sub> : Indices correspondants aux trois phases du deuxième stator  
 A<sub>r</sub>, B<sub>r</sub>, C<sub>r</sub> : Indices correspondants aux trois phases du rotor

### B

B : Constante de transport ou de transfert de masse

### C

C : Capacité d'excitation  
 C<sub>em</sub> : Couple électromagnétique  
 C<sub>n</sub> : Couple avec n phases saines  
 C<sub>r</sub> : Couple résistant

### D

d : Indice de l'axe direct  
 D : Diamètre intérieur d'une conduite.

### E

E : Charge élémentaire d'un électron  
 E<sub>c</sub> : Energie cinétique [J]  
 E<sub>g</sub> : Energie de Gap  
 E : Tension du bus continu alimentant l'onduleur

### F

F: Constante de faraday  
 f<sub>p</sub> : Fréquence de la modulante.  
 f<sub>ref</sub> : Fréquence de la tension de référence.  
 FC<sub>max</sub> : Bouteilles d'hydrogène pleines.  
 FF: Facteur de forme.  
 f.m.m : Force magnétomotrice  
 F<sub>r</sub>: Coefficient de frottement.  
 f(θ), s(θ) : Fonctions de forme des fems et des courants

**G**

$g_t$  : Pesanteur terrestre  
 GTO : Gate turn-off  
 $G_s$  : Ensoleillement  
 $G_{sref}$  : Ensoleillement de référence  
 $G_{min}$  : Faible ensoleillement

**H**

H: Hauteur  
 $H_a$ : Hauteur d'aspiration  
 $H_{max}$  Réservoir plein  
 HMT: Hauteur manométrique totale  
 $H_r$ : Hauteur de refoulement.

**I**

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit  
 IGBT : Insulated-gate bipolar transistor  
 $I_{ph}$  : Photon courant  
 $I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode  
 $I_{ai}, I_{bi}, I_{ci}$  : Courants instantanées des phases de l'étoile  $i$  ( $i=1,2$ ).  
 $I_{ar}, I_{br}, I_{cr}$  : courants instantanées rotoriques  
 $i_{0i}, i_{di}, i_{qi}$  : Courants homopolaire, directe et en quadrature de l'étoile  $i$  ( $i=1,2$ ).  
 $i_{0r}, i_{dr}, i_{qr}$  : Courants homopolaire, directe et en quadrature du rotor  
 $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  : Courants statoriques suivants l'axe  $\alpha$  et l'axe  $\beta$   
 $i_{r\alpha}, i_{r\beta}$  : Courants rotoriques suivants l'axe  $\alpha$  et l'axe  $\beta$   
 $i_{z1}, i_{z2}, i_{z3}$  : Courants fictifs dans l'espace Z  
 $I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode D  
 $I_{mref}$  : Courant au point de puissance maximale en condition standard  
 I : Courant du montage  
 $I_i$  : Courant de la cellule  $i$   
 $I_{FC}$  : Courant délivré par la PAC  
 $I_n$  : Courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte  
 $i_0$  : Courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte.  
 $I_L$  : Courant limite pour lequel tout le combustible est utilisé.

**J**

J : Moment d'inertie.  
 $J_a$  : Pertes de charge à l'aspiration  
 $J_c$  : Perte de charge.  
 $J_r$  : Pertes de pression à l'écoulement

**K**

K : Constante de Boltzmann  
 $K_1$  et  $K_2$  : Paramètres constants.  
 $K_{fr}$  : Constante de canalisation  
 $K_r$  : Coefficient de proportionnalité  
 $K_0, K_1, K_2$  : Constantes propres de la pompe.  
 $K_{FC}$  : Contacteur de la pile à combustible.  
 $K_{lyz}$  : Contacteur de l'électrolyseur.

$K_{pmp}$  : Le contacteur de la pompe.  
 $K_{PV}$  : Contacteur du générateur photovoltaïque.  
 $K_W$  : Contacteur de l'éolienne.

**L**

$L$  : longueur de la conduite  
 $L_{ms}$  : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique  
 $L_{mr}$  : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique  
 $L_r$  : Inductance propre du rotor  
 $L_{s1}$  : Inductance propre du 1er stator  
 $L_{s2}$  : Inductance propre du 2eme stator  
 $L_{sr}$  : Valeur maximale des inductances mutuelles entre l'une des étoiles et le rotor.  
 $L_{sd}$ ,  $L_{sq}$  : Valeurs maximales des inductances statoriques directe et en quadrature.

**M**

$m$  : Masse du volume d'air [kg]  
 $M_d$ ,  $M_q$  : Valeurs maximales des mutuelles directes, en quadrature.

**N**

$n_p$  : Nombre de cellules en parallèle  
 $n_s$  : Nombre de cellules en série  
 $N$  : Vitesse de rotation  
 $Noct$  : Condition de température nominale  
 $N_p$  : Nombre de branche en parallèle  
 $NPSH$  : Charge nette à l'aspiration.

**P**

$p$  : Nombre de paires de pôles  
 $P$  : Puissance instantanée absorbée  
 $P_{ab}$  : Puissance absorbée par le moteur  
 $P_{em}$  : Puissance électromagnétique emmagasinée  
 $P_h$  : Puissance hydraulique fournie par la pompe  
 $P_j$  : Pertes joules  
 $P_r$  : Pression résiduelle  
 $P_{mec}$  : Puissance mécanique  
 $P_{SEH}$  : Puissance du système hybride  
 $P_{FC}$  : Puissance de la pile à combustible  
 $P_{lyz}$  : Puissance de l'électrolyseur  
 $P_{pmp}$  : Puissance de la pompe.  
 $P_{PV}$  : Puissance du panneau photovoltaïque.  
 $P_W$  : Puissance de l'éolienne.  
 $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  : Constantes  
 $[p(\theta_{s1})]$ ,  $[p(\theta_{s2})]$ ,  $[p(\theta_r)]$  : Matrice de Park  
 $[p(\theta_{s1})]^{-1}$ ,  $[p(\theta_{s2})]^{-1}$ ,  $[p(\theta_r)]^{-1}$  : Matrice inverse de Park  
 $PH_2$ ,  $PO_2$  : Pressions partielles respectivement de l'hydrogène et de l'oxygène

**Q**

$q$  : Indice de l'axe en quadrature.  
 $Q$  : Débit.

**R**

$r$  : Indice du rotor  
 $R_{ch}$  : Résistance de charge  
 $R$  : Constante universelle des gaz  
 $R_m$  : Résistance totale de la PAC  
 $R_s, R_p$  : Résistance série et résistance parallèle  
 $\ll R_{ai}=R_{bi}=R_{ci}=R_i$  : Résistance des enroulements de l'étoile  $i$  ( $i=1,2$ ).  
 $R_{ar}=R_{br}=R_{cr}=R_r$  : Résistance des enroulements du rotor

**T**

$T$  : Température de fonctionnement  
 $T_c$  : Température de la cellule en Kelvin  
 $T_{jref}$  : Température jonction de référence  
 $T_{ref}$  : Température de référence.  
 $T_j$  : Température de jonction de la cellule

**U**

$U_{dc}$  : Valeur moyenne de la tension redressée  
 $U_{eff}$  : Valeur efficace de la tension redressée  
 $U_{fc}$  : Potentiel réel global de la pile à combustible.

**V**

$V$  : Tension de sortie  
 $V_{act}$  : Pertes d'activation.  
 $V_{mref}$  : Tension au point de puissance maximale en conditions standards  
 $V_i$  : Tension de la cellule  $i$   
 $v$  : Vitesse instantanée du vent [m/s] au niveau du moyeu.  
 $v_{max}$  : Vitesse de décrochage de l'éolienne.  
 $v_{min}$  : Vitesse pour laquelle l'éolienne ne produit pas.  
 $v_f$  : vitesse moyenne du fluide  
 $V_{co}$  : Tension de circuit ouvert  
 $V_{con}$  : Pertes de concentration  
 $V_{ohm}$  : Pertes ohmiques.  
 $V_p(t)$  : Equation de la tension de la porteuse  
 $V_{ref}$  : Tension de référence  
 $V_{ai}, V_{bi}, V_{ci}$  : Tensions instantanées des phases de l'étoile  $i$  ( $i=1,2$ ).  
 $V_{0i}, V_{di}, V_{qi}$  : Tensions homopolaire, directe et en quadrature de l'étoile  $i$  ( $i=1,2$ ).  
 $V_{z1}, V_{z2}, V_{z3}$  : Tensions fictives dans l'espace  $Z$   
 $V_\alpha, V_\beta$  : Tensions suivants l'axe  $\alpha$  et l'axe  $\beta$ .  
 $V_{mref}$  : Amplitude de la tension de référence.  
 $V_{mp}$  : Valeur crête de l'onde de modulation

**ALPHABET GREC**

$\alpha$  : déphasage entre les deux étoiles statoriques.

$\Delta H1$  : Pertes de charge linéaires.

$\Delta H2$  : Pertes de charge singulières.

$\Delta V_m$  : Coefficient de température de la tension au point de puissance maximale

$\Delta I_m$  : Coefficient de température du courant au point de puissance maximale

$\Delta G$  : Changement d'énergie libre [J/k.mol]

$\Delta S$  : Changement d'entropie [J/k.mol]

$\varepsilon$  : coefficient de perte de charges locales.

$\eta$  : Rendement.

$\theta_r$  : déphasage entre le rotor et la première étoile du stator.

$\theta_m$  : Angle mécanique.

$\theta_e$  : Angle électrique.

$\lambda$  : Coefficient de perte de charge.

$\rho_{air}$  : Masse volumique de l'air.

$\rho_m$  : Masse d'air déplacée par unité de temps

$\rho$  : Masse volumique du fluide.

$\varphi_{ai}, \varphi_{bi}, \varphi_{ci}$  : Flux statoriques de l'étoile i.

$\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$  : Flux rotoriques.

$\varphi_{0i}, \varphi_{di}, \varphi_{qi}$  : Flux homopolaire, directe et en quadrature de l'étoile i.

$\varphi_{0r}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}$  : Flux homopolaire, directe et en quadrature du rotor.

$\varphi_m, \varphi_{md}, \varphi_{mq}$  : Flux magnétisant, magnétisant direct et magnétisant en quadrature.

$\varphi_{\alpha}, \varphi_{\beta}$  : Flux statoriques selon les axes  $\alpha$  et  $\beta$ .

$\varphi_{r\alpha}, \varphi_{r\beta}$  : Flux rotoriques selon les axes  $\alpha$  et  $\beta$ .

$\Omega$  : Vitesse angulaire de rotation.

***LISTE***  
***DES***  
***FIGURES***



## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES MULTI-SOURCES À ÉNERGIES RENOUVELABLES EN POMPAGE

<i>N° de la Figure</i>	<i>Titre de la Figure</i>	<i>N° de Page</i>
I.01	Illustration de quelques sources d'énergies renouvelables	05
I.02	Production d'électricité dans le monde	06
I.03	Composantes du rayonnement solaire au sol	07
I.04	Description d'une cellule photovoltaïque	08
I.05	Cellule, module et champ de modules photovoltaïque	11
I.06	Schéma électrique équivalent du Montage de cellules 'série – parallèle' avec protection « diode by-pass » et « diode anti retour »	12
I.07	Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol	14
I.08	Zone de fonctionnement d'une éolienne	15
I.09	Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	16
I.10	Evaluation de la production mondiale d'hydrogène en 2018	22
I.11	Schéma Electrolyse-Electrolyse inverse	23
I.12	Principe d'assemblage de cellules élémentaire CEA	24
I.13	Machines multiphasées de type «1»	29
I.14	Machines Multiphasées de type «2»	30
I.15	Pompes centrifuges	32
I.16	Vis d'Archimède	34
I.17	Structure des SEH à bus CC	37
I.18	Structure des SEH à bus AC/CC	38
I.19	Structure des SEH à bus AC	39
I.20	Système hybride à commutation	39

**CHAPITRE II :**  
**MODÉLISATION DES SOURCES D'ÉNERGIES**  
**RENOUVELABLES ET DES ACTIONNEURS UTILISÉS**

<i>N° de la Figure</i>	<i>Titre de la Figure</i>	<i>N° de Page</i>
II.01	Système de pompage à énergie hybride pour le pompage de l'eau	42
II.02	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale	43
II.03	Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode	45
II.04	Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes	45
II.05	Caractéristique résultante d'un groupement de cellules identiques	47
II.06	Schéma électrique du « modèle à deux diodes » pour un groupe de panneaux	48
II.07	Schéma Bloc du Générateur Photovoltaïque	48
II.08	Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation	49
II.09	Schéma du Hacheur Buck – Boost	50
II.10	Schéma du filtre passe-bas	51
II.11	Schéma du pompage électrique et mécanique	53
II.12	Système de conversion éolienne basé sur la GASDE	54
II.13	Représentation des enroulements de la GASDE selon les axes « d,q »	55
II.14	Variation de l'inductance de magnétisation en fonction du module du courant de magnétisation	55
II.15	Schéma d'un système de conversion d'énergie à base de la GASDE	58
II.16	Auto-amorçage de la génératrice asynchrone à double étoiles	59
II.17	Connexion de la charge résistive selon les axes fictifs (j=d,q - k=1,2)	60
II.18	Connexion de la charge inductive selon les axes fictifs (j=d,q- k=1,2)	60
II.19	Phosphoric acid and PEM fuel cells	61
II.20	Schéma électrique dynamique équivalent d'une pile	62
II.21	Polarisation d'une cellule PEM fuel cells	64
II.22	Représentation des enroulements de la MASDE	65
II.23	Représentation angulaire des systèmes d'axe dans l'espace électrique	68
II.24	Représentation du modèle de PARK de la MASDE dans le repère dq	71
II.25	Alimentation du stator par onduleurs de tension	77
II.26	Données de base d'une pompe	80
II.27	Cas de pompe de surface	81
II.28	Cas de pompe en charge	82
II.29	Cas de pompe immergée	82
II.30	Représentation d'une pompe centrifuge horizontale	85
II.31	Caractéristiques « débits – vitesses » d'une pompe centrifuge	85
II.32	Caractéristiques « Couple – Vitesse » d'une pompe centrifuge	85
II.33	Caractéristiques « HMT – Débit » d'une pompe centrifuge	86
II.34	Caractéristiques de rendement d'une pompe centrifuge	86

**CHAPITRE III :**  
**DIMENSIONNEMENT ET APPLICATION DE LA MASDE**  
**EN POMPAGE HYBRIDE À ÉNERGIES RENOUVELABLES**

<i>N° de la Figure</i>	<i>Titre de la Figure</i>	<i>N° de Page</i>
III.01	Heures d'ensoleillement par jour de la région de Timimoune	91
III.02	Vitesses du vent mensuelles de la région de Timimoune	91
III.03	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I = f(V)$	100
III.04	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P = f(V)$	100
III.05	Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$	100
III.06	Influence de la température sur la caractéristique $P = f(V)$	101
III.07	Influence de la résistance série sur les caractéristiques du GPV	101
III.08	Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques du GPV	101
III.09	Caractéristique $IGPV = f(V_{GPV})$ du champ photovoltaïque	102
III.10	Caractéristique $PGPV = f(V_{GPV})$ du champ photovoltaïque	102
III.11	Tension générée du champ photovoltaïque	102
III.12	Allure des deux sources de tensions triphasées décalées de $30^\circ$	105
III.13	Tension statorique et courant statorique $V_{a1} - i_{a1}$	105
III.14	Vitesse de rotation $N$ et Vitesse synchronisme de $N_s$ [rd/s]	105
III.15	Couple électromagnétique [Nm] et Couple résistant [Nm]	105
III.16	Flux direct rotorique [Wb]	105
III.17	Flux en quadrature rotorique [Wb]	105
III.18	Composante directe du courant $I_{d1} / I_{d2}$	106
III.19	Composante en quadrature du courant $I_{q1} / I_{q2}$	106
III.20	Allure du courant et de la tension en fonctionnement 'Moteur'	106
III.21	Allure du courant et de la tension en fonctionnement 'Générateur'	106
III.22	Fonction sinus- Fonction triangle	109
III.23	Intersection tensions de référence et de la porteuse	109
III.24	Vitesse de rotation $N$ [rad/s] & Vitesse de synchronisme $N_s$ [rad/s]	109
III.25	Couple électromagnétique [Nm] & Couple résistant [Nm]	109
III.26	Flux direct rotorique [Wb]	109
III.27	Flux en quadrature rotorique [Wb]	109
III.28	Courants directs	110
III.29	Courants en quadratures	110
III.30	Tension simple $V_{a1}$	110
III.31	Courant statorique $i_{a1}$	110
III.32	Courant statorique $i_{a1}$ 'à vide'	110
III.33	Courant statorique $i_{a1}$ 'en charge'	110
III.34	Tension débitée $V_{a1}$ à vide	112
III.35	Zoom Tension débitée $V_{a1}$ à vide	112
III.36	Allure des tensions débitées à vide	112
III.37	Zoom des tensions débitées à vide	112
III.38	Allure du courant de l'étoile 1 à vide	112
III.39	Zoom du courant $i_{a1}$ de l'étoile 1 à vide	112
III.40	Allure des six courants débités à vide	113
III.41	Zoom des six courants débités à vide	113

III.42	Courant magnétisant « im » à vide	113
III.43	Inductance magnétisante « Lm » à vide	113
III.44	Courbe de Lissajous à vide	113
III.45	Courant rotorique iar à vide	113
III.46	Allure des courants rotoriques à vide	114
III.47	Zoom des courants rotoriques à vide	114
III.48	Tension débitée « Va1 » en charge résistive	115
III.49	Zoom de la tension débitée « Va1 » en charge résistive	115
III.50	Allure du courant débité « ia1 » en charge résistive	115
III.51	Zoom du courant débité « ia1 » en charge résistive	115
III.52	Courant magnétisant « im » en charge résistive	115
III.53	Inductance magnétisante Lm en charge résistive	115
III.54	Courant rotorique en charge résistive	116
III.55	Allure des courants rotoriques en charge résistive	116
III.56	Allure du courant parcourant la charge résistive	116
III.57	Zoom du courant parcourant la charge résistive	116
III.58	Courant parcourant et tension aux bornes de la charge résistive	116
III.59	Courbe de Lissajous lors d'une charge résistive	116
III.60	Tension débitée « Va1 » en charge inductive	118
III.61	Zoom de la tension débitée « Va1 » en charge inductive	118
III.62	Allure du courant débité ia1 en charge inductive	118
III.63	Zoom du courant débité ia1 en charge inductive	118
III.64	Courant magnétisant « im » en charge inductive	118
III.65	Inductance magnétisante Lm en charge inductive	118
III.66	Courant rotorique en charge inductive	119
III.67	Allure des courants rotoriques en charge inductive	119
III.68	Allure du courant de charge IL « charge inductive »	119
III.69	Zoom du courant de charge IL « charge inductive »	119
III.70	Courant parcourant et tension aux bornes de la charge inductive	119
III.71	Courbe de Lissajous lors d'une charge inductive	119
III.72	Influence des capacités d'auto-amorçage sur le courant magnétisant	122
III.73	Influence des capacités d'autoamorçage sur l'inductance magnétisante	122
III.74	Influence de la valeur de la résistance sur le courant magnétisant	122
III.75	Influence de la valeur de la résistance sur l'inductance magnétisante	122
III.76	Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant magnétisant	122
III.77	Influence de la vitesse d'entraînement sur l'inductance magnétisante	122
III.78	Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant rotorique	123
III.79	Variation de la fréquence	123
III.80	Influence de la vitesse d'entraînement sur les tensions débitées	123
III.81	Influence de la vitesse d'entraînement sur les courants débités	123
III.82	Couple moteur – couple pompe (résistant)	125
III.83	Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation [rad/s]	125
III.84	Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation [tr/mn]	125
III.85	Caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »	126
III.86	Caractéristique « Couple-Vitesse de rotation »	126
III.87	Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »	126
III.88	Caractéristique « Débit-Vitesse de rotation »	126
III.89	Caractéristique du Débit	126

**CHAPITRE IV :  
GESTION D'UN SYSTÈME DE POMPAGE HYBRIDE À ÉNERGIES RENOUVELABLES**

<i>N° de la Figure</i>	<i>Titre de la Figure</i>	<i>N° de Page</i>
IV.01	Hybridation des sources renouvelables présentes dans la station de pompage	130
IV.02	Schéma synoptique du mode « A »	134
IV.03	Chronogramme de fonctionnement du mode « A »	135
IV.04	Schéma synoptique du mode « B »	136
IV.05	Chronogramme de fonctionnement du mode « B »	137
IV.06	Schéma synoptique du mode « C »	138
IV.07	Chronogramme de fonctionnement du mode « C »	139
IV.08	Schéma synoptique de la gestion de la station de pompage	140
IV.09	Installation hybride Photovoltaïque – Pile à combustible	141
IV.10	Tension « val » de l'onduleur	143
IV.11	Couple électromagnétique & couple résistant de la pompe	143
IV.12	Vitesse de rotation du moteur	143
IV.13	Vitesse de rotation (Zoom)	143
IV.14	Caractéristique de la hauteur manométrique totale TDH et du débit	143
IV.15	Caractéristique du couple résistant et de la vitesse de rotation du moteur	143
IV.16	Caractéristique de la TDH en fonction de la vitesse du moteur	143
IV.17	Caractéristique débit en fonction de la vitesse de rotation du moteur	143
IV.18	Installation hybride photovoltaïque – turbine éolienne	145
IV.19	Redressement double PD3 de la tension générée par la GASDE	146
IV.20	Allure des tensions à l'entrée et à la sortie du redresseur (PSIM)	147
IV.21	Allure des tensions redressées (PSIM)	147
IV.22	Evolution du couple électromagnétique et du couple résistant	148
IV.23	Caractéristique HMT - vitesse	148
IV.24	Vitesse de rotation et de synchronisme	148
IV.25	Caractéristique couple-vitesse	148
IV.26	Caractéristique TDH & du débit	148
IV.27	Caractéristique du débit en fonction de la vitesse de rotation	148
IV.28	Système hybride éolien-FC	150
IV.29	Caractéristique de la Vitesse de Rotation	151
IV.30	Couple électromagnétique - Couple résistant	151
IV.31	Hauteur manométrique totale – Débit	151
IV.32	Caractéristique Couple résistant -Vitesse de rotation	151
IV.33	Hauteur manométrique totale - Vitesse de rotation	151
IV.34	Caractéristique Débit - Vitesse de rotation	151
IV.35	Installation de la station de pompage	153
IV.36	Puissance de quelques modes de fonctionnement	155

**CHAPITRE V :**  
**ÉTUDE DU POMPAGE HYBRIDE EN MODE DÉGRADÉ**

<i>N° de la Figure</i>	<i>Titre de la Figure</i>	<i>N° de Page</i>
V.01	Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance	162
V.02	Fusion d'un fusible ultra rapide	162
V.03	Déconnexion des phases en défaut par utilisation de triac	163
V.04	Transformation de la base « A1A2B1B2C1C2 » à la base « $\alpha\beta$ »	166
V.05	Couple électromagnétique & Couple résistant (Zoom)	170
V.06	Vitesse de rotation & vitesse de synchronisme (Zoom)	170
V.07	Courants statoriques (Zoom)	170
V.08	Tensions d'alimentation avec la première phase défectueuse	172
V.09	Vitesse de rotation & Vitesse de synchronisme (Zoom)	172
V.10	Couple électromagnétique & Couple résistant	172
V.11	Couple électromagnétique & Couple résistant (Zoom)	172
V.12	Courant statorique	172
V.13	Courant statorique (Zoom)	172
V.14	Tensions d'alimentation. Même étoile (Sa2 et Sb2 défectueuses)	174
V.15	Tensions d'alimentation. Différentes étoiles (Sa1 et Sc2 défectueuses)	174
V.16	Vitesses de rotation & de synchronisme (Zoom). Même étoile	174
V.17	Vitesses de rotation & de synchronisme (Zoom). Différentes étoiles	174
V.18	Couple électromagnétique & Couple résistant. Même étoile	174
V.19	Couple électromagnétique & Couple résistant. Différentes étoiles	174
V.20	Couple électromagnétique & Couple résistant (Zoom). Même étoile	175
V.21	Couple électromagnétique & résistant (Zoom). Différentes étoiles	175
V.22	Courant statorique. Même étoile	175
V.23	Courant statorique. Différentes étoiles	175
V.24	Courant statorique. (Zoom). Même étoile	175
V.25	Courant statorique. (Zoom). Différentes étoiles	175
V.26	Tensions d'alimentation. Perte d'une étoile	177
V.27	Tensions d'alimentation. Trois phases différentes étoiles	177
V.28	Vitesses de rotation & de synchronisme (Zoom). Perte d'une étoile	177
V.29	Vitesses de rotation & de synchronisme (Zoom). Trois phases différentes étoiles	177
V.30	Vitesses de rotation & de synchronisme (Zoom). Perte d'une étoile	177
V.31	Vitesses de rotation & de synchronisme (Zoom). Trois phases différentes étoiles	177
V.32	Couple de la machine & Couple de la pompe. Perte d'une étoile	178
V.33	Couple de la machine & Couple de la pompe. Trois phases différentes étoiles	178
V.34	Couple de la machine & Couple de la pompe (Zoom). Perte d'une étoile	178
V.35	Couple électromagnétique & Résistant (Zoom). Trois phases différentes étoiles	178
V.36	Courant statorique. Perte d'une étoile	178
V.37	Courant statorique. Trois phases différentes étoiles	178
V.38	Courant statorique (Zoom). Perte d'une étoile	179
V.39	Courant statorique (Zoom). 3 phases différentes étoiles	179

**LISTE  
DES  
TABLEAUX**



## **LISTE DES TABLEAUX**

### *Chapitre I :*

#### *Généralités sur les systèmes multi-sources à énergies renouvelables en pompage*

<i>N°</i>	<i>Titre du tableau</i>	<i>Page</i>
I.1	Comparatif des avantages et des inconvénients	18
I.2	Les différents types de pile à combustible	27

### **CHAPITRE II :**

#### *Modélisation des sources d'énergies renouvelables et des actionneurs utilisés*

<i>N°</i>	<i>Titre du tableau</i>	<i>Page</i>
II.1	Diverses inductances	55
II.2	Etats de la fonction logique f <sub>i</sub>	77

### **CHAPITRE III :**

#### *Dimensionnement et application de la MASDE en pompage à énergies renouvelables*

<i>N°</i>	<i>Titre du tableau</i>	<i>Page</i>
III.1	Durée journalière d'insolation et vitesse du vent de Timimoune	91
III.2	Vitesses du vent disponible au niveau de Timimoune	92
III.3	Paramètres du module photovoltaïque SIEMENS SM 110-24	96
III.4	Récapitulation des dimensionnement des diverses sources	99
III.5	Diverses valeurs des composantes du flux rotorique	106
III.6	<i>Valeurs des composantes du Courant selon l'axe « d – q »</i>	107
III.7	<i>Influence du condensateur d'auto-amorçage</i>	120
III.8	<i>Influence de la résistance de charge</i>	121
III.9	<i>Influence de la vitesse d'entraînement</i>	121

### **CHAPITRE IV :**

#### *Gestion d'un système de pompage hybride à énergies renouvelables*

<i>N°</i>	<i>Titre du tableau</i>	<i>Page</i>
IV.1	<i>Contacteurs du choix des sources et des charges</i>	131
IV.2	<i>Présentation des entrées, des sorties et des capteurs</i>	131
IV.3	<i>Etats des contacteurs K<sub>i</sub> lors des différents modes de fonctionnement</i>	140
IV.4	<i>Quelques caractéristiques en fonction de la vitesse du vent</i>	154
IV.5	<i>Production combinée « Photovoltaïque – éolienne »</i>	154

### **CHAPITRE V :**

#### *Étude du pompage hybride en mode dégradé*

<i>N°</i>	<i>Titre du tableau</i>	<i>Page</i>
V.1	Comparaison des diverses grandeurs pour les éventuels défauts	180



# **I**NTRODUCTION

# **G**ENERALE

## INTRODUCTION GENERALE

Dans un pays vaste et riche comme l'Algérie, le potentiel techniquement exploitable en énergies du soleil et du vent est considérable et la qualité des gisements est telle que des investissements rentables peuvent être envisagés pour leur développement.

La Loi sur la maîtrise de l'énergie de juillet 1999 ne peut traduire que la volonté et l'engagement des pouvoirs publics Algériens en faveur du développement des énergies nouvelles et renouvelables, notamment, en accordant un soutien direct au profit des populations défavorisées et des régions déshéritées [01].

Du fait de leur caractère inépuisable, les énergies renouvelables permettent un développement durable et constituent une solution économique viable pour les régions isolées et éloignées où le coût de l'électrification est prohibitif.

Le recours aux systèmes d'énergies hybrides s'avère être une opportunité qui doit avoir un impact profitable en termes de coût et de disponibilité pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées, notamment, dans les régions du Grand Sud.

Le terme, « Système d'Energie Hybride (SEH) », signifie une génération d'énergie utilisant plusieurs sources de technologie différente et le fait d'ajouter le mot « renouvelable », cela signifie que les sources utilisées sont à énergies renouvelables, telle que l'éolienne, le photovoltaïque, les petites centrales hydroélectriques ou bien encore les piles à combustible avec des capacités de production aléatoires et souvent fluctuantes.

La configuration du SEH en question, consiste à dimensionner selon les contraintes d'utilisation, les ressources énergétiques obtenues à partir de la conversion éolienne et photovoltaïque et ne pas prévoir, au préalable, de système de stockage au niveau des sites isolés, serait un handicap certain de cette hybridation où son objectif principal consiste à assurer à la charge une continuité dans l'offre de l'énergie en dépit des fluctuations des énergies renouvelables.

Les systèmes de commande auront pour objectifs la récupération au maximum de l'énergie du vent et du rayonnement solaire et une gestion du système de stockage.

Le manque flagrant de l'eau dans les pays sous-développés cause des épidémies ravageuses aux populations et une famine dans le monde. Une situation qui s'est considérablement aggravée en 2020 probablement à cause des répercussions de la pandémie de la COVID 19, qui avait chamboulé toute l'humanité.

L'urgence actuelle est d'assurer un approvisionnement en eau potable, à partir des puits et des nappes phréatiques, pour permettre aux populations asséchées d'avoir cette goutte d'eau qui rafraichira leur quotidien et permettra une survie avec un minimum d'hygiène de vie.

Pour ce modeste travail, une feuille de route est établie afin de répondre aux objectifs fixés lors de la proposition de ce sujet de recherche, ainsi, il est important d'étaler le contenu de chaque chapitre pour que le lecteur puisse s'y référer.

L'ouverture de cette thèse se fera par un premier chapitre, consacré aux généralités sur les systèmes multi-sources à énergies renouvelables, notamment, le photovoltaïque (PV), l'éolienne, l'hydrogène et la pile à combustible (FC).

Un aperçu furtif sera donné sur ces énergies, sur leur principe de fonctionnement et leur répartition au niveau mondiale, tout en invoquant les avantages et les inconvénients et l'impact sur l'environnement de chaque source.

Les pompes, qui permettent le déplacement des fluides quand la gravité ne le permet pas seront exposées. Un intérêt particulier sera porté sur les pompes centrifuges où leur choix n'est pas fortuit compte tenu des multiples avantages qu'elles offrent. Ces pompes seront dédiées au pompage de l'eau, une source vitale pour la survie de l'homme, de la faune et de la flore, sans omettre le rôle important que ce fluide joue lors des processus industriels.

Les actionneurs les plus convoités, à savoir les machines multiphasées, seront arborés dans ce premier chapitre, afin de permettre au lecteur de se situer par rapport aux machines classiques connues, à savoir les machines triphasées.

L'innovation actuelle, à savoir l'hybridation, qui n'est qu'une combinaison de ces sources disponibles, demeure une étape essentielle pour bien gérer les flux énergétiques de différente nature. Les multiples architectures seront présentées à la fin de ce chapitre pour permettre le choix en fonction des avantages et des inconvénients de chaque procédé.

Le second chapitre sera réservé exclusivement à la modélisation de la chaîne de pompage. Les sources d'énergies renouvelables utilisées pour la réalisation de cet ouvrage sont le photovoltaïque, l'éolienne et les piles à combustibles. Ainsi, en vue de leur contrôle, il sera commode de suivre l'évolution des réponses de ces générateurs lors des variations des conditions climatiques.

La modélisation des actionneurs, constituant le système de pompage, sera effectuée, à savoir, la génératrice asynchrone à double étoile (GASDE) avec un choix judicieux des capacités d'auto amorçage et la machine asynchrone à double étoile (MASDE) en fonctionnement moteur.

La modélisation des onduleurs de tensions commandés par la technique de modulation de largeurs d'impulsions « MLI » sera aussi abordé dans ce chapitre, ainsi que la modélisation de la pompe centrifuge utilisée.

Le troisième chapitre sera spécialement conçu pour le dimensionnement des éléments constituant la chaîne de pompage en tenant compte du site d'implantation de la station.

Ainsi, le dimensionnement du générateur photovoltaïque, de l'éolienne et de la pile à combustible sera opéré en fonction des données climatiques de la région de Timimoune.

Grace au logiciel Matlab Simulink, des simulations sur le comportement de chaque élément seront effectuées tout en révélant des résultats précieux sur l'attitude de chaque source et de chaque actionneur.

La pompe centrifuge couplée à la MASDE sera d'abord alimentée directement par le réseau pour suivre et comprendre son comportement et ensuite alimentée via des onduleurs de tensions qui relateront le fonctionnement réel de la machine sur le site. La génération de l'électricité à travers la GASDE fera l'objet d'une simulation pour pouvoir suivre l'évolution de sa réponse pour un fonctionnement à vide puis en charge.

Tous les résultats de la simulation seront représentés par des courbes significatives où une discussion et des commentaires seront donnés pour chaque cas.

Le noyau de cette recherche se retrouve concentré dans le quatrième chapitre, qui illustre les différents scénarios probables établis, en vue d'une meilleure gestion de ces sources d'énergies assemblées sous forme d'une hybridation bénéfique, afin d'améliorer le rendement de l'installation tout en améliorant les débits des quantités pompées afin d'assurer une continuité de service.

Des organigrammes et des schémas synoptiques seront transcrits pour décrire les divers scénarios. Les différentes combinaisons, à savoir « GPV-éolienne », « GPV-FC », « Eolienne-FC » et « GPV-Eolienne-FC » seront abordées par une simulation du comportement probable de l'ensemble des éléments constituant la station de pompage.

Le cinquième chapitre résumera le fonctionnement en mode dégradé où les différents modes de fonctionnement en présence d'une défaillance seront arborés afin de mettre en œuvre l'avantage lié à la marche de la machine à double étoile lors d'une perte de phase(s), connue sous le nom du « mode dégradé » où l'actionneur devra toujours fournir un couple moteur, en éliminant les possibles ondulations.

Lors d'une défaillance, la machine asynchrone à double étoile (MASDE) devra continuer à tourner, permettant un fonctionnement en mode dégradé [02, 03].

Sa structure dynamique non linéaire et l'existence d'un fort couplage entre le flux et le couple compliqueront davantage sa commande [04].

En effet, l'urgence actuelle sera de développer les techniques de commande en présence d'une défaillance, surtout en cette période de Covid 19 [5] où il est difficile ou impossible de s'offrir le luxe d'un approvisionnement immédiat des pièces de rechange. Les systèmes embarqués feront aussi objet de l'utilité d'un fonctionnement en ce mode exceptionnel.

Une conclusion générale viendra couronner l'ensemble des chapitres présentés dans cette étude, où un rapport sur les objectifs atteints sera dressé et les perspectives envisagées seront révélées et confiées.

# **CHAPITRE I**

## **GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES MULTI-SOURCES À ÉNERGIES RENOUVELABLES EN POMPAGE**

## CHAPITRE I

# **GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES MULTI-SOURCES À ÉNERGIES RENOUVELABLES EN POMPAGE**

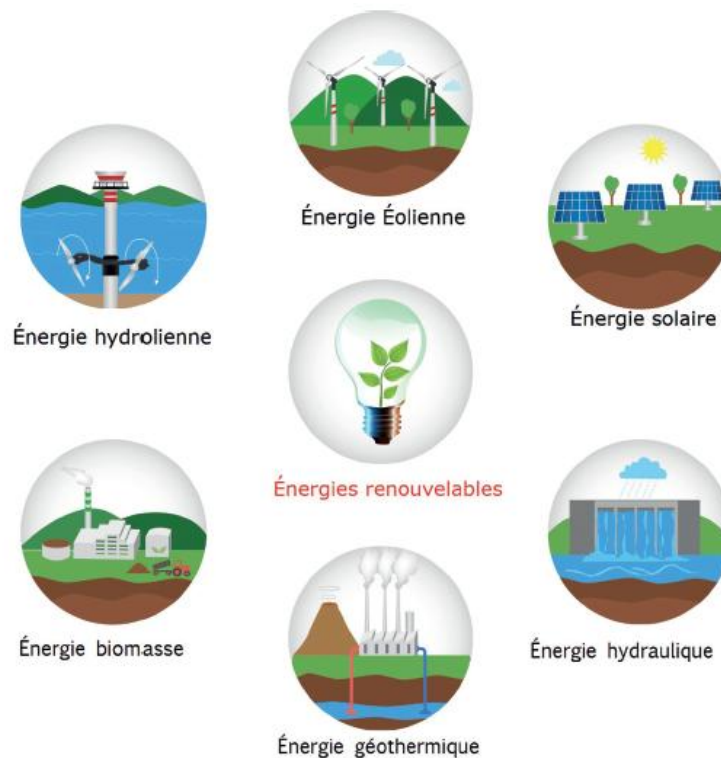
### I.1 Introduction

Le besoin continu de l'humanité à assurer sa survie sur la planète bleue, la pousse sans relâche à redoubler d'efforts dans la recherche de nouvelles sources d'énergies.

Même si l'utilisation des combustibles fossiles, du pétrole, du gaz et du nucléaire dans la production d'énergie est encore assurée pour bien des années, l'homme est constamment à la recherche de nouveaux procédés, de préférence propres et inépuisables. Ainsi, de nouvelles sources d'énergie ont vu le jour par l'adoption de l'énergie thermique, la géothermie, la marémotrice, la biomasse, la cogénération, l'éolienne et le solaire [6, 7].

### I.2 Généralités sur les sources d'énergies dans le monde

La population mondiale augmente sans cesse, elle est estimée en 2011 à 7 milliards d'habitants et selon les prévisions de l'ONU, 9 milliards en 2050, ce qui entraîne une augmentation de la consommation en énergie aussi [8].

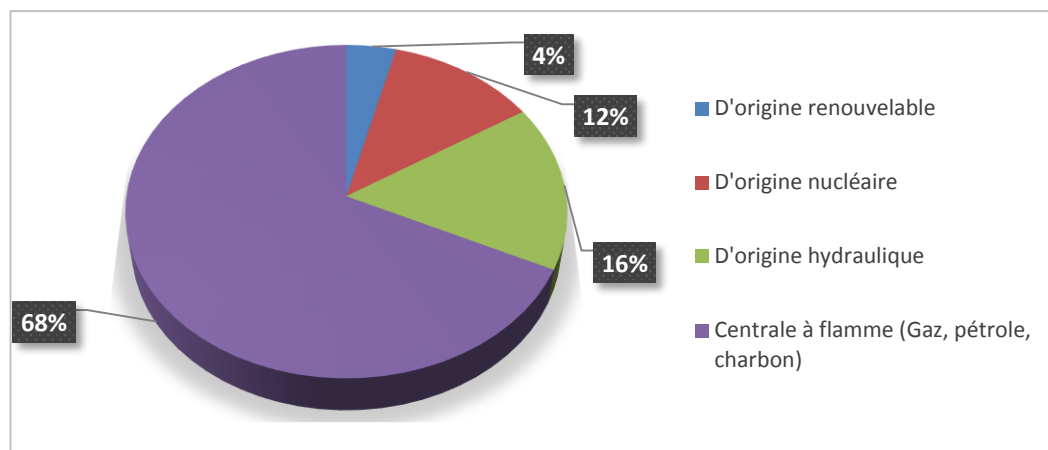


*Figure (I.1) : Illustration de quelques sources d'énergies renouvelables [8].*

L'accroissement d'activité des pays industrialisés et des pays en voie de développement a entraîné une très forte demande en énergie, notamment en ces dix dernières années, ce qui rend urgent pour les dirigeants de cette planète d'entreprendre des dispositifs astreignants pour [8] :

- Assurer un approvisionnement suffisant et sûr en sources d'énergie ;
- Réduire la dépendance envers les importations d'énergie ;
- Réaliser des investissements dans les nouvelles technologies : (Eolienne, Solaire, Géothermie, Développement des centrales nucléaires de quatrième génération, ...)
- Réaliser des économies d'énergie et réduire les gaz à effets de serre ;
- Limiter, récupérer, traiter et valoriser les déchets ;
- Développer de nouvelles ressources énergétiques.

### I.2.1 Production d'énergie électrique dans le monde



*Figure (I.2) : Production d'électricité dans le monde (2021) [8].*

Les centrales à flammes représentent 68% de la production totale et tant qu'il y a des énergies fossiles disponibles, elles seront utilisées jusqu'à épuisement des stocks [8].

### I.2.2 Consommation d'énergie électrique dans le monde

La consommation d'électricité a augmenté d'une manière continue d'environ 350 % en l'espace de 40 ans. Les États-Unis, l'Union européenne, la Chine et la Russie, qui comptent parmi les régions du monde les plus vastes et les plus peuplées, consomment plus de 61 % de l'électricité mondiale. Entre 2001 et 2015, la consommation de certains pays en développement a considérablement augmenté, elle a été multipliée par 3,3 pour la Chine, par 2,2 pour l'Inde et par 1,6 pour le Brésil [8].



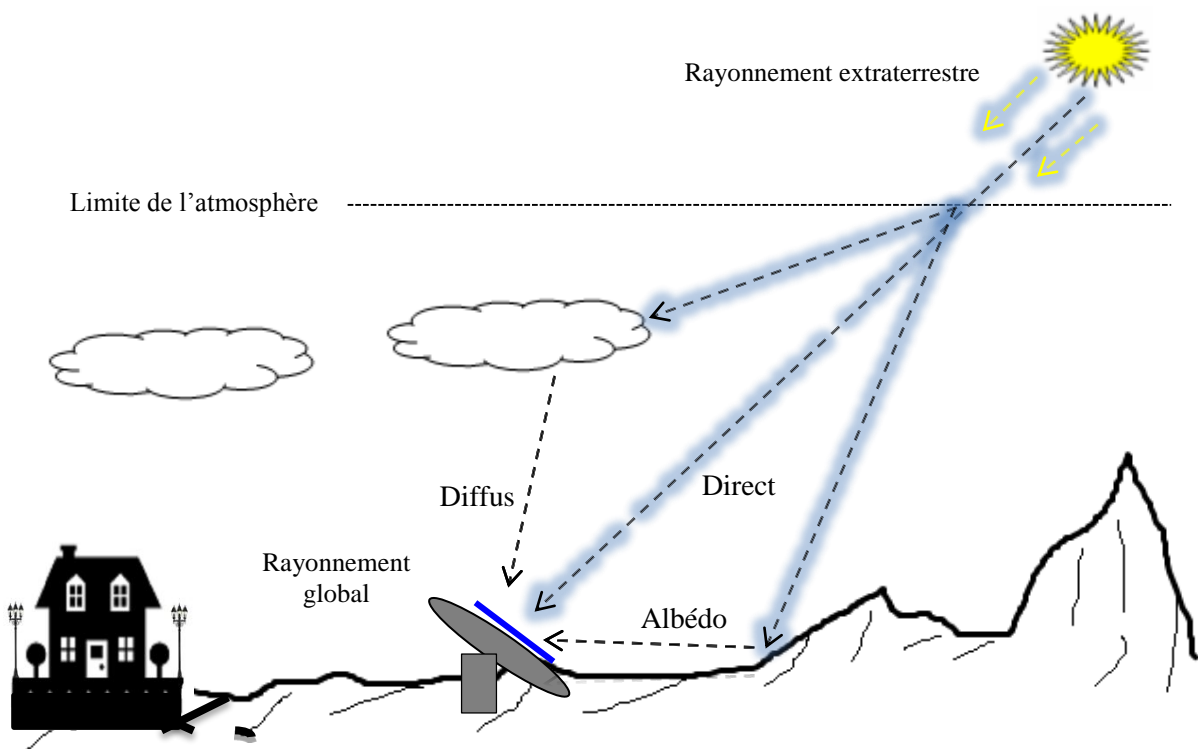
### I.3 Générateur photovoltaïque

Avec l'avantage d'être d'origine naturelle et inépuisable, l'énergie du soleil, pour sa facilité de maintenance, s'avère être l'énergie de remplacement, par excellence, la mieux placée pour électrifier les sites isolés des réseaux électriques.

Silencieuse et discrète, avec une facilité remarquable de se fonder aux façades et aux toitures des bâtisses, le photovoltaïque est généralisé dans les applications spatiales, l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage [7, 9].

#### I.3.1 L'énergie du soleil

L'atmosphère terrestre reçoit un rayonnement électromagnétique émis par le soleil d'une puissance moyenne de «  $1.37 \pm 3\% \text{ kW/m}^2$  » et en absorbe une partie, de manière que la quantité d'énergie arrivant sur terre dépasse rarement  $1,2 \text{ kW/m}^2$ . Comme la forme de la Terre est arrondie, la quantité du rayonnement solaire incident n'est pas la même partout, les tropiques reçoivent plus de chaleur que les régions polaires [7, 9].



*Figure (I.3) : Composantes du rayonnement solaire au sol [3].*

Grâce à une énergie émise d'environ 386 millions de mégawatts par seconde, le soleil demeure d'une importance vitale à la vie sur terre par son apport d'énergie thermique et de lumière, permettant une présence d'eau à l'état liquide et une photosynthèse des végétaux.

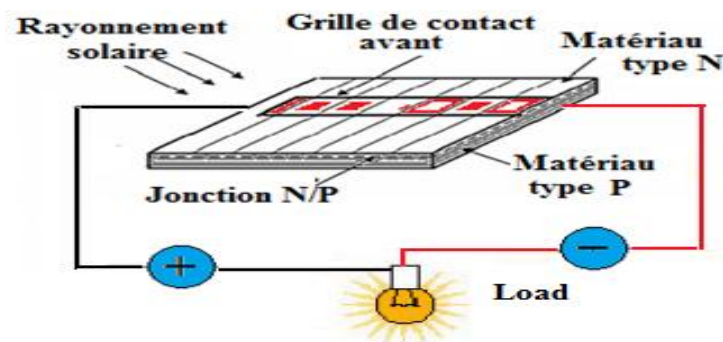
Le rayonnement global est la somme du rayonnement reçu, directement, du Soleil, de celui, diffus, provenant de la voute céleste et du rayonnement réfléchi par le sol [3, 7, 10].

Le plus souvent, l'ensoleillement est exprimé en « heures de soleil maximum », équivalent au nombre d'heures par jour où l'éclairement est en moyenne de  $1000\text{W/m}^2$ , il représente l'intensité du rayonnement solaire reçue sur un plan à un moment donné et il varie selon la latitude, l'heure, la saison, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et les divers autres phénomènes météorologiques [3, 7, 10, 11].

### I.3.2 Cellule photovoltaïque

Les BECQUERELS furent les premiers à observer en 1839, la capacité des semi-conducteurs à transformer la lumière du soleil en électricité. Les premières cellules PV à oxyde cuivreux ( $\text{CuO}$ ) sont apparues en 1930, puis en sélénium ( $\text{Se}$ ) et il a fallu attendre 1950 pour fabriquer la première photopile en silicium ( $\text{Si}$ ) par la compagnie Bell téléphone [3, 7].

Une cellule solaire comprend une base de silicium de type P couverte d'une mince couche de type N. Au voisinage de la jonction, apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et des charges négatives. Des contacts métalliques, en forme de grille, sont déposés sur chaque face de la cellule et constituent les électrodes de sortie de la photopile [3, 7].



*Figure (I.4) : Description d'une cellule photovoltaïque [3].*

La cellule photovoltaïque peut être représentée comme une diode plate sensible à la lumière [12]. Lorsque la cellule est éclairée par une radiation lumineuse d'énergie «  $h \times \mu$  » supérieure ou égale à l'énergie de Gap de la bande interdite «  $E_g$  » du semi-conducteur, les photons sont captés et sont absorbés tout en transmettant leurs énergies à des électrons, un couple électron-trou est créé, c'est l'effet photovoltaïque. Ces charges sont refoulées par le champ électrique interne de la jonction PN vers ses extrémités, ce qui va créer une différence de potentiel appelée tension photovoltaïque. Si une charge est appliquée aux bornes de la cellule, cette tension génère un courant appelé courant photovoltaïque [3, 7].

Pour des raisons économiques, le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques reste le silicium avec ses nombreuses formes, cristalline, multi cristalline, amorphe, en couche mince,...etc. Par contre, pour les applications spatiales exigeant un rendement plus élevé, les cellules multicouches présentent une meilleure fiabilité ainsi qu'une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps [7].

### I.3.2.1 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivants :

#### I.3.2.1.1 Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension « V » aux bornes de la cellule ou du GPV est nulle. Dans le cas idéal où la résistance série «  $r_s$  » est nulle et la résistance en parallèle «  $r_p$  » est de l'ordre de l'infini, ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$ , par contre dans le cas contraire, il en résulte [3, 7, 13] :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \times \left( \exp \left( \frac{e \times r_s \times I_{cc}}{A \times K \times T_c} \right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} \times r_s}{r_p} \quad (I.1)$$

Pour la plupart des photopiles, la résistance série est faible, d'où le terme  $I_{sat} \times \left( \exp \left( \frac{e \times r_s \times I_{cc}}{A \times K \times T_c} \right) - 1 \right)$  peut être négligé devant  $I_{ph}$ .

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left( 1 + \frac{r_s}{r_p} \right)} \quad (I.2)$$

#### I.3.2.1.2 Tension de circuit ouvert

C'est la tension maximale «  $V_{oc}$  » pour laquelle le courant débité par la photopile ou le GPV est nul. Elle reflète la tension de seuil de la jonction PN en absence de la lumière.

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{oc} = \left( \frac{A \times K \times T_c}{e} \right) \times \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right) \quad (I.3)$$

En définissant la tension thermique comme étant :  $V_t = \frac{A \times K \times T_c}{e}$  et en négligeant le courant qui passe dans la résistance parallèle  $r_p$  et avec  $I_{cc}$  très grand devant  $I_{sat}$ , la tension de circuit ouvert est exprimée comme suit [7, 13] :

$$V_{oc} = V_t \times \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right) \quad (I.4)$$

Une autre formule donne cette tension de circuit ouvert, en fonction de l'ensoleillement et de la température, comme suit :

$$V_{oc} = V_{ocref} + \beta \times \Delta T + \alpha \times (G_s - G_{sref}) \quad (I.5)$$

Avec :

$\alpha$  [A/°C] : Coefficient de variation de courant à circuit ouvert en fonction de la température,

$\beta$  [V/°C] : Coefficient de variation de la tension de court-circuit en fonction de la température,

$\Delta T$  [°C] : Variation de la température,  $G_s$  et  $G_{sref}$  [W/m<sup>2</sup>] : Ensoleillement et celui de référence.

### I.3.2.1.3 Facteur de forme

Le facteur de forme FF reflète la qualité de la cellule par rapport à une cellule idéale où « FF = 1 ». Il est défini comme étant le rapport entre la valeur maximale de la puissance de la photopile pouvant être extraite «  $V_m \times I_m$  » sous les conditions standards de mesures et le produit entre le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert «  $I_{cc} \times V_{oc}$  » [7, 13].

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (I.6)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

### I.3.2.1.4 Le rendement

Le rendement ( $\eta$ ) des cellules photovoltaïques de surface effective  $S$  est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale de sortie délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente «  $P_{in}$  ».

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m \times I_m}{P_{in}} = \frac{P_m}{S \times G_s} = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{cc}}{S \times G_s} \quad (I.7)$$

Il est, évidemment, possible d'agir sur le facteur de forme, le courant de court-circuit et ou la tension à circuit ouvert pour améliorer le rendement des cellules photovoltaïques [7, 14].

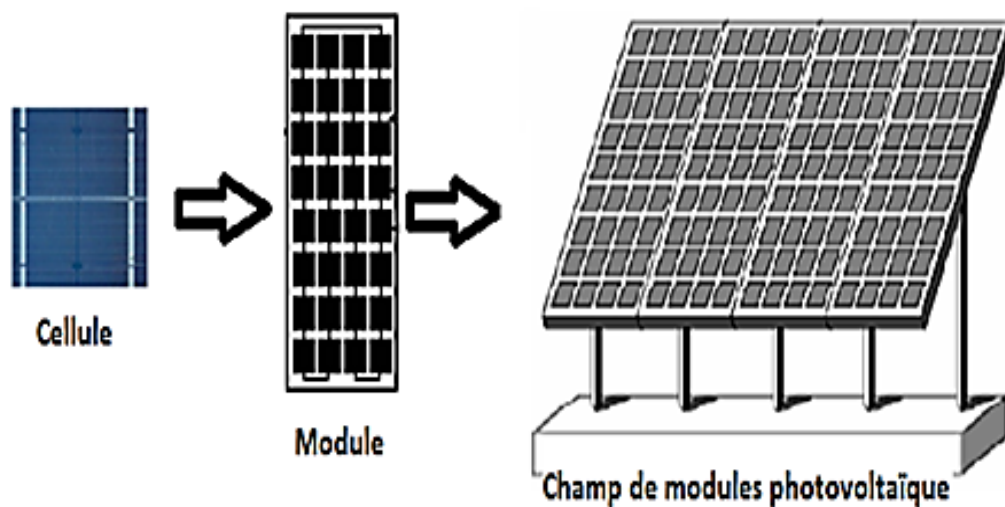
L'énergie incidente du flux lumineux offre une énergie électrique disponible aux bornes de la cellule photovoltaïque ajoutée aux pertes thermiques par convection, par rayonnement et par conduction.

$$\eta = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{lumineuse}}} = \frac{E_{\text{lumineuse}} - E_{\text{thermique}}}{E_{\text{lumineuse}}} \quad (I.8)$$

### I.3.3 Générateur photovoltaïque

Selon les technologies, une cellule solaire élémentaire ne génère qu'une puissance inférieure à 2 W sous une tension comprise entre 0.5 et 1.5V. Pour que ce genre de générateur soit exploitable, il est nécessaire de connecter plusieurs cellules en série, pour augmenter la tension d'utilisation, et en parallèle, pour satisfaire le besoin en courant [15].

Les modules photovoltaïques peuvent, en conséquence, être assemblés en série et ou en parallèle, composant ainsi, le GPV, appelé aussi « champ de modules photovoltaïques » [16].



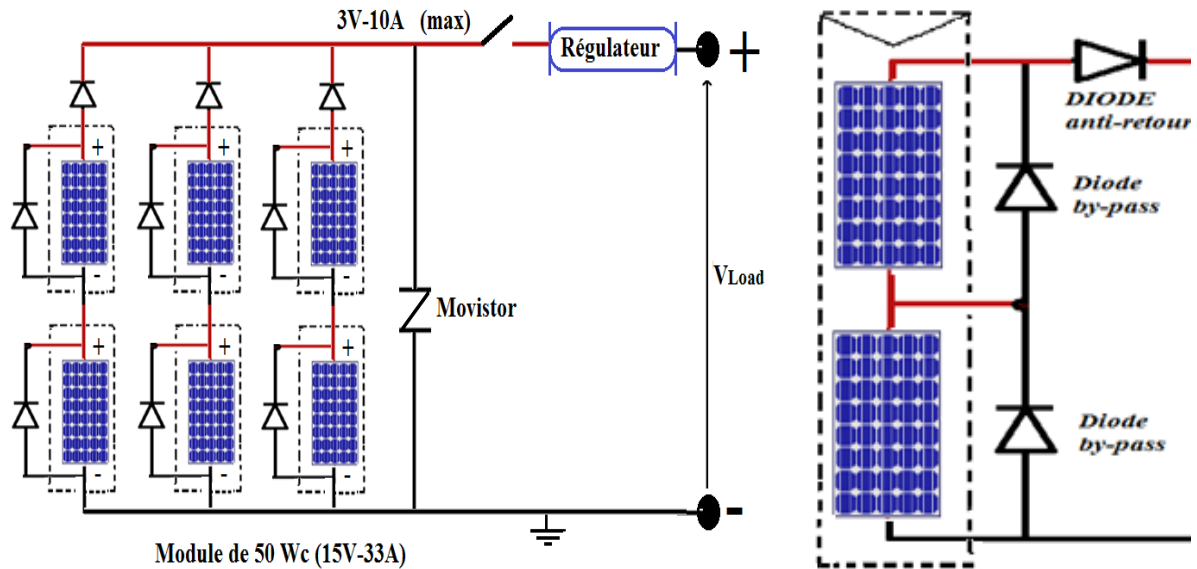
*Figure (I.5) : Cellule, module et champ de modules photovoltaïque [3].*

### I.3.4 Cas de défaillance d'une ou de plusieurs cellules

Dans le cas où une cellule, couplée en série ou en parallèle, ne reçoit qu'une faible partie de l'énergie solaire par rapport à celle recueillie par les autres cellules, elle est dite « cellule occultée », ce qui affecte, sérieusement, la marche normale de l'ensemble. Selon la manière où les cellules sont connectées, des mesures sont prises afin d'éviter des désagréments à l'équipement.

Si l'une des cellules reliées en série se retrouve ombragée, le courant, alors, ne peut plus circuler et la cellule se comporte comme un récepteur et accumule le courant produit en amont, ce qui engendre une dissipation de puissance sous forme de chaleur dépassant les 100°C en provoquant son claquage, un phénomène connu sous le nom de « hot spot » [3].

Pour limiter la tension inverse maximum susceptible de se développer aux bornes de la cellule, il est nécessaire de placer une diode en parallèle, appelée « diode by-pass » [17] et pour protéger l'installation contre les surtensions causées par les foudres, un varistor à oxyde métallique (Movistor) est installé à l'entrée du conditionneur [3, 6, 7].



**Figure (I.6)** : Schéma électrique équivalent du montage de cellules 'série-parallèle' avec protection « diode by-pass » et « diode anti retour » [3].

Dans le cas de couplage en parallèle, si une ou plusieurs cellules sont occultées, les autres deviennent réceptrices, de fait que la tension de fonctionnement est supérieure à la tension de circuit ouvert [3].

Bien qu'une cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode en série dite « diode anti-retour », laquelle empêche, également, de gaspiller dans une autre cellule occultée une partie de la puissance produite par les cellules fonctionnant normalement [3].

### I.3.5 Avantages et inconvénients du GPV

L'énergie solaire présente davantage d'avantages par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables, avec un coût de fonctionnement très faible, ne nécessitant, ni surveillance permanente, ni personnel hautement spécialisé, ce qui lui procure le caractère de système autonome, fonctionnant sans approvisionnement en combustible.

La technologie photovoltaïque offre un produit fini, non polluant, silencieux, n'entraînant aucune perturbation du milieu avec une possibilité de combinaison avec d'autres sources d'énergies offrant une meilleure fiabilité du système et une haute résistance aux conditions atmosphériques hostiles, ce qui lui procure une longévité assurée [18, 19, 20] .

Quelques contrariétés sont à dénombrer, dont le manque de compétitivité par rapport aux générateurs Diesel, le faible rendement de conversion du GPV et le surplus du cout dans le cas d'utilisation des batteries de stockage et des régulateurs [18, 19, 20, 21].

## **I.4 Energie éolienne**

Depuis la conquête de la planète, la nature a toujours fasciné l'homme où il ne passe pas une journée sans qu'il essaye d'asservir davantage son environnement et d'en profiter au maximum. Outre les applications des colères d'Eole dans la navigation antique, l'homme a su comment amadouer les souffles périodiques des vents pour les convertir en sources motrices des moulins et à puiser l'eau des profondeurs.

Même si auparavant, l'augmentation de vitesse des pâles se traduisait par une augmentation de la quantité du blé moulu ou une élévation du niveau d'eau pompée, aujourd'hui, l'association de cette énergie motrice à des générateurs électriques oblige l'utilisateur à prévoir des algorithmes de commande contrôlant la vitesse de rotation de ces pales en vue d'une éventuelle augmentation de rendement ou d'une baisse de charge mécanique.

### **I.4.1 Energie du vent**

A voir la conception des terres et des cieux, le créateur divin a voulu obtenir la perfection absolue dans ses œuvres. L'astre scintillant vénéré par bien de civilisations et la forme ronde aplatie de la planète bleue laissent perplexe tout individu ayant une curiosité accrue de l'univers et de ses indénombrables secrets.

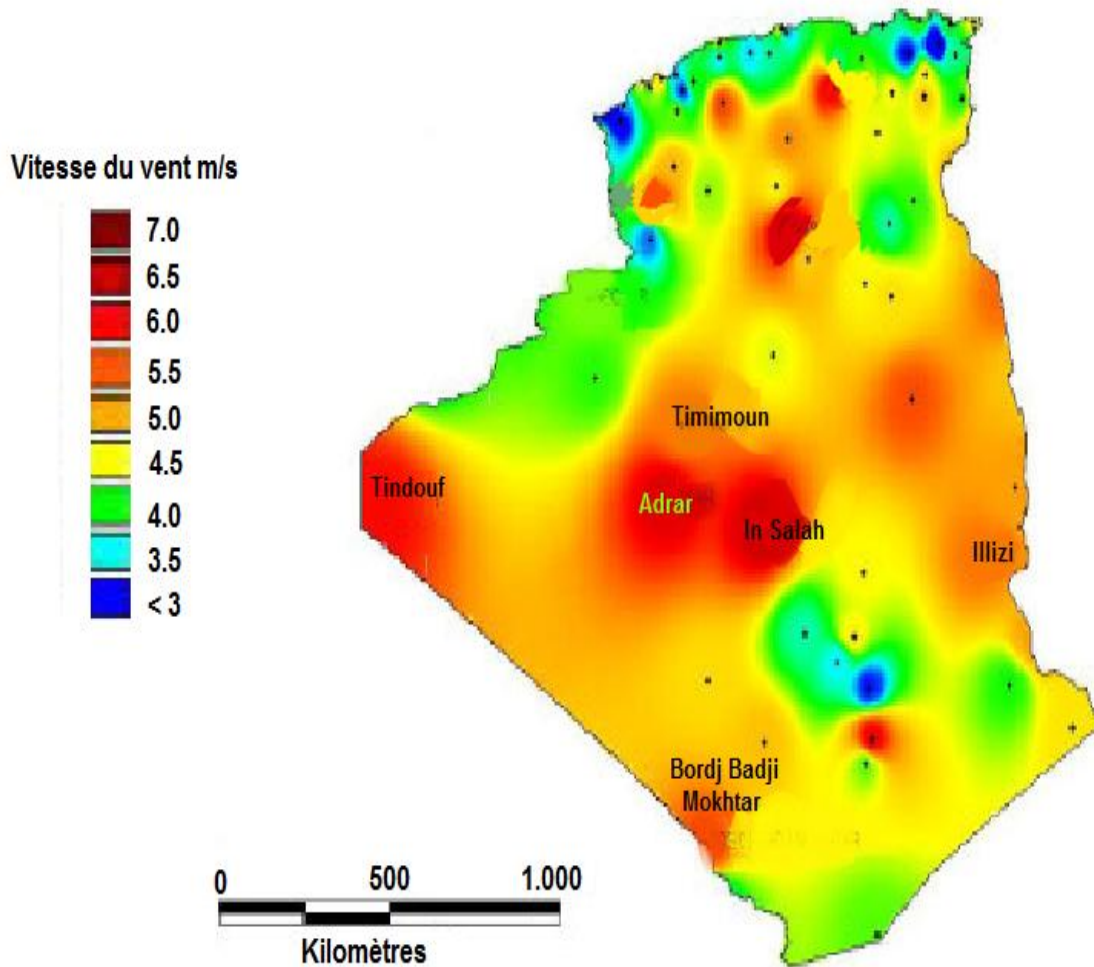
En effet, le rayonnement solaire absorbé à l'équateur diffère de celui absorbé aux deux pôles et la rotation de la terre qui entraîne une irradiation solaire d'un hémisphère et une occultation de l'autre hémisphère sont à l'origine des écarts de température et de pression atmosphérique entre ces deux points et engendre une variation de densité de masse d'air provoquant son déplacement [22, 23].

Ces masses d'air, appelés vents, véhiculent une énergie cinétique proportionnelle à la masse volumique de l'air et aux volumes échangés. Ces déplacements d'air sont influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud.

### **I.4.2 Gisement éolien en Algérie**

La matière première dans ce processus de production d'énergie électrique n'est que le vent, une grandeur naturelle qui peut être modélisée expérimentalement, donc par des mesures périodiques propres au site. En Algérie, le premier Atlas était établi à base de seulement 36 stations météorologiques alors qu'actuellement, le nombre de points de mesures est passé à 80, un chiffre plutôt faible vue l'immensité du territoire algérien. Le gisement éolien en Algérie est donc toujours en cours d'évaluation [24].





*Figure (I.7) : Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol [25].*

Pour une éventuelle implantation d'éolienne, une cartographie du site s'avère nécessaire pour connaître le potentiel du vent de la région. Les timides cartographies, établies par quelques organismes, montrent que la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre, en raison de l'étendue du territoire algérien où une diversité de topographie et de climat est observée. Généralement, l'Algérie possède un régime de vent modéré de 2 à 6 m/s, une vitesse qui convient parfaitement pour le pompage de l'eau [24, 25].

Une modélisation analytique est envisageable avec les différents types de profils dans le cas d'absence de cartographie du site.

### **I.4.3 Notions sur les éoliennes**

Ayant un caractère stochastique, l'énergie produite par les éoliennes ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Dans le souci de produire davantage d'énergie et de même éviter les nuisances sonores, des fermes éoliennes offshores sont implantées en plein mer où la présence du vent est plus régulière [26].



Les aérogénérateurs fournissent de quelques dizaines de watts jusqu'à quelques Mégawatts, ils peuvent être à axe vertical ou à axe horizontal et possédant, généralement, de deux à trois pales.

Dans le souci d'alléger les factures d'électricité, les puissances fournies par ces aérogénérateurs ne cessent d'augmenter au cours des années, passant de quelques kilowatts en 1990 jusqu'à atteindre quelques térawatts ces dernières années [27].

Même si le fonctionnement à vitesse variable nécessite un circuit électrique moins simple et un système de commande électronique, il en demeure que le rendement est amélioré et que les oscillations du couple et les efforts subis par le train de puissance se trouvent réduits offrant une meilleure qualité de la puissance électrique [26, 27].

Cette puissance générée peut être consommée localement pour les cas de sites isolés ou bien dispatchée à travers un réseau conventionnel dans le cas d'un système connecté.

#### I.4.4 Zones de fonctionnement de l'éolienne

L'étude va se restreindre sur la vitesse et la direction du vent seulement. Les stations météorologiques enregistrent la moyenne des vitesses et la direction pendant un intervalle de 10 minutes et elles sont résumées sous forme de rose des vents.

Au sein de chaque secteur/direction d'une rose des vents, on peut créer un histogramme représentant la fréquence des vents dans une direction en fonction de leurs vitesses [26, 27].

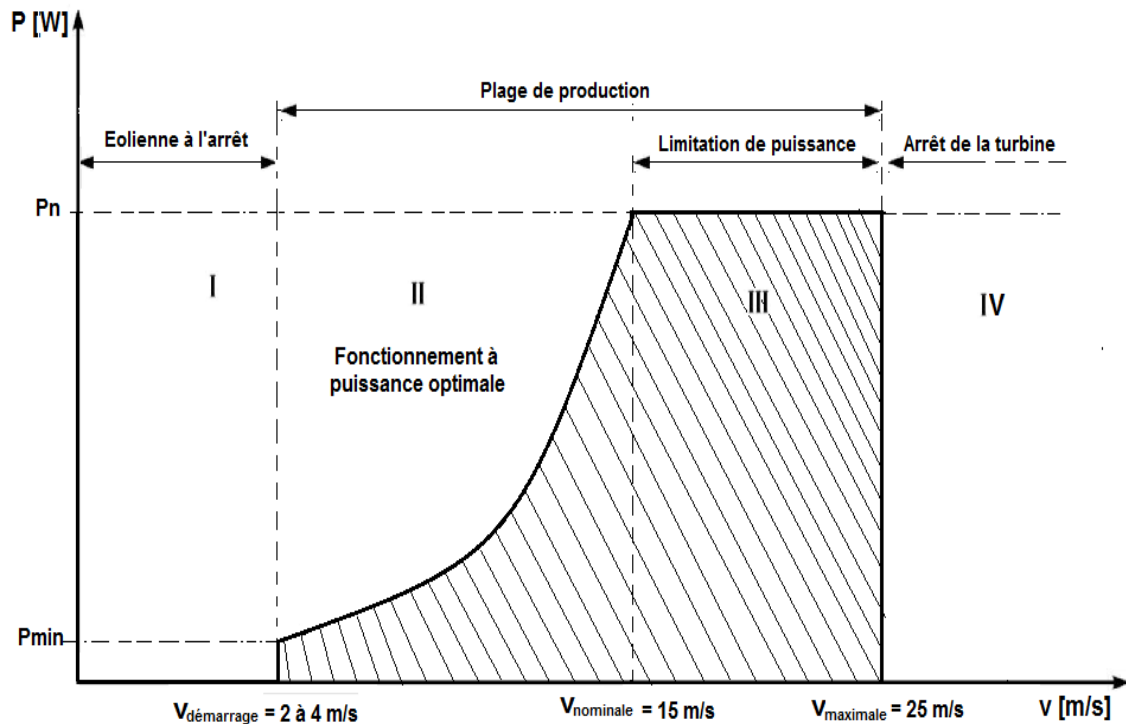


Figure (I.8) : Zone de fonctionnement d'une éolienne [26,27].

La relation entre la puissance fournie par une turbine et la vitesse du vent est décrite par une courbe de puissance théorique propre à l'éolienne. Son fonctionnement est distingué par quatre zones (figure I.8) dont la première n'est que lorsque la vitesse du vent est trop faible autour de 2 à 4 m/s nommée « Cut-in » où la turbine peut tourner sans fournir d'énergie.

Dans la deuxième zone, la puissance fournie est proportionnelle à la vitesse du vent. La proportionnalité entre la puissance et le cube de la vitesse du vent attribue sa forme à cette partie de la courbe. Ensuite elle augmente brusquement jusqu'à une certaine valeur de la vitesse, dite nominale, entre 12 et 16 m/s.

Lors des vents élevés, la vitesse de la turbine est bornée dans cette troisième zone à une valeur maximale pour pouvoir limiter la puissance fournie. La quatrième zone est atteinte lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible, ce qui entraîne l'arrêt systématique de la turbine dans le but de la protéger [28].

#### I.4.5 Principe de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique

Le principe de production de l'énergie éolienne consiste à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui entraîne le rotor d'une génératrice, qui va, à son tour, produire une énergie électrique.

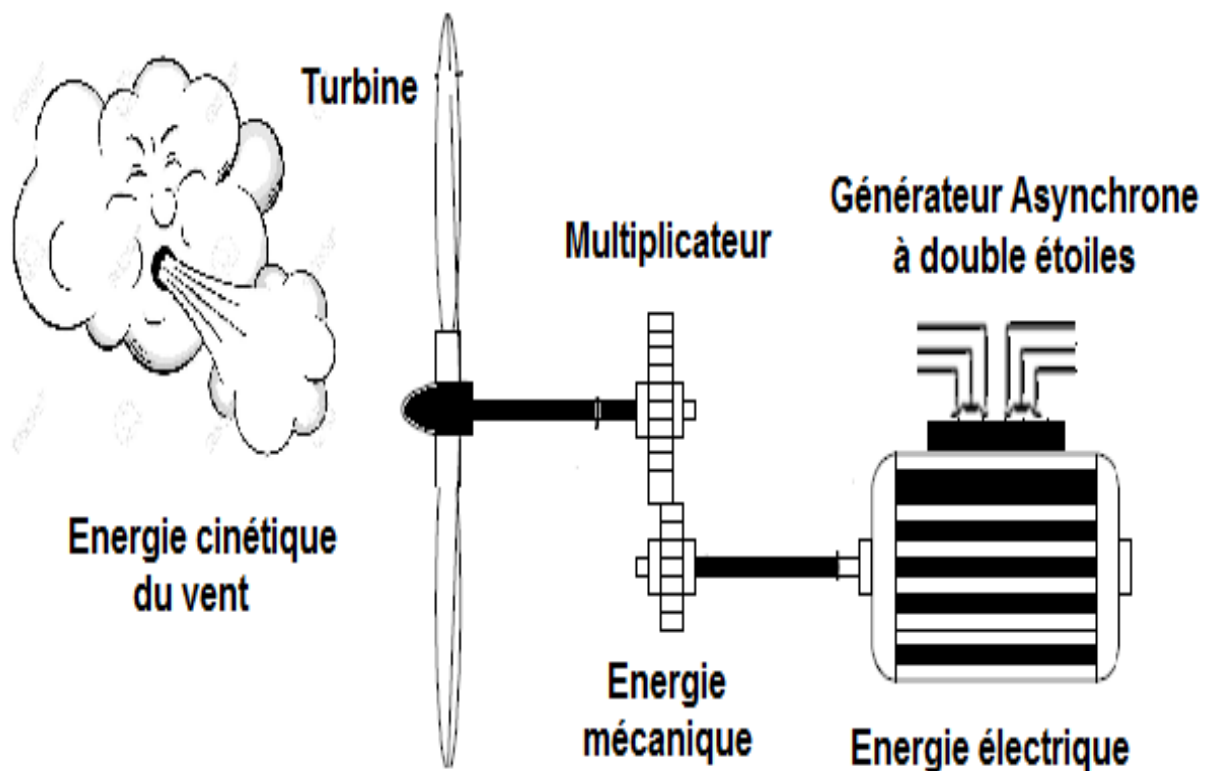


Figure (I.9) : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [29].

Pour des besoins d'adaptation, un multiplicateur de vitesse à engrenages est intercalé entre la turbine et la GASDE.

Ces boîtes de vitesses nécessitent une maintenance continuelle et défavorisent la fiabilité du dispositif, notamment pour les grandes puissances, raison pour laquelle l'entraînement direct de la machine synchrone à très grand nombre de pôles est favorisé [29].

Pour exploiter l'énergie du vent récoltée par les pales d'une éolienne, un dispositif constitué d'une partie tournante transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et une partie fixe assure à travers ses bobinages la conversion en énergie électrique [29].

### **I.4.6 Inconvénients, avantages**

#### **I.4.6.1 Avantages**

La majorité des éoliennes installées au niveau mondial sont à axe horizontal ayant une structure stable et un bon rendement. Un dispositif d'électronique de puissance permet un fonctionnement à vitesse variable, ce qui engendre un surcroît de production avec un excellent rendement.

L'éolienne de type « Savonius » démarre avec des vents modérés et présente un couple élevé. Elle est peu bruyante et ne possède pas de dispositifs d'orientation, elle est moins encombrante, dont une facilité de maintenance.

Cette énergie étant la moins chère des énergies renouvelables, propre, ne produit pas de déchet toxique ou radioactif, fiable, économique et écologique. Elle s'inscrit dans l'optique de réduction des émissions de dioxyde de carbone où chaque MW produit par l'énergie du vent réduit annuellement entre 800 kg et 900 kg d'émissions de CO<sub>2</sub> [30, 31].

L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple et son démantèlement est facile ne laissant aucune trace et sa durée de vie est de 20 à 25 ans, ce qui vient concurrencer les autres sources renouvelables [32].

#### **I.4.6.2 Inconvénients**

Les éoliennes à axe horizontal nécessitent un système de guidage face au vent pour faire pivoter le dispositif de génération qui tourne à des vitesses assez faible d'où la nécessité d'insérer un multiplicateur de vitesse qui est généralement lourd, encombrant et parfois bruyant.

L'éolienne de type « Savonius » avec son importante masse possède un rendement faible, un couple variable et le type « Darrieus », par contre, nécessite un dispositif de lancement qui implique un bruit supplémentaire.

Les puissances récoltées par ces souffles ne sont pas fixes et parfois elles sont de mauvaises qualités en raison de la nature stochastique du vent. Les bruits mécaniques ou aérodynamiques engendrés par la rotation des pales ne sont plus une gêne maintenant. Des modifications pour exténuer les bruits ont permis d'avoir entre 50 et 60 dB aux alentours de la machine et de presque éliminer les bruits pour des distances supérieures à huit fois le diamètre des pales [31, 32].

L'impact visuel est à prendre d'une manière subjective car les avis diffèrent d'une personne à une autre et d'une région à une autre, de même, quelques scientifiques, ne se reposant que sur des suppositions non pas sur des études sérieuses, affirment que les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux [32].

#### I.4.6.3 Avantages et inconvénients selon le fonctionnement des éoliennes

Le fonctionnement de l'éolienne peut être à vitesse fixe ou à vitesse variable avec un pas variable ou constant.

**Tableau (I.1) :** Comparatif des avantages et des inconvénients [30, 31, 32]

<b>Eoliennes</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>A</b> <b>Vitesse</b> <b>fixe</b>	Construction robuste	Impossibilité d'extraire un maximum d'énergie.
	Construction simple	Génération de plus de stress mécanique sur le multiplicateur au changement de vitesses.
	A moindre coût	Incapacité d'un contrôle indépendant de la puissance active et réactive.
<b>A</b> <b>Vitesse</b> <b>variable</b>	Captation d'un maximum d'énergie.	Génération de la machine d'un courant et d'une tension à fréquence variable nécessitant un convertisseur de puissance.
	Fonctionnement efficace	
	Capacité de fournir la puissance à une tension et fréquence constante	
	Contrôle de la puissance active et réactive fournies au réseau	

## **I.5 L'Hydrogène**

L'hydrogène est découvert par Lavoisier en 1766, c'est un élément chimique dont la présence est quasi abondante dans l'univers, sauf qu'il est généralement lié à d'autres composants et son extraction nécessite l'utilisation d'autres sources d'énergie telles que l'électricité ou la chaleur [33].

Même si la densité énergétique de l'hydrogène est importante, soit 120 MJ/kg, huit tiers plus élevée que celle de l'essence, la densité volumique par contre devient moins intéressante, vue qu'un litre d'essence fournit la même énergie que 4,6 litres d'hydrogène comprimé à 700 bars [33, 34].

### **I.5.1 L'Hydrogène et l'énergie**

Le besoin planétaire ascendant en énergie laisse prétendre que l'hydrogène sera le vecteur énergétique polyvalent par excellence du XXI<sup>e</sup> siècle, grâce à sa disponibilité, sa durabilité et sa sécurité énergétique.

L'un des précurseurs de ce choix judicieux et sans doute une vision énergétique se reposant sur la réduction des émissions de dioxyde de carbone et sur la diversité énergétique selon les travaux de Johnston et al [35] et Solomon & Banerjee [36]. L'avancée technologique spectaculaire des piles à combustibles a placé l'hydrogène sur la rampe de lancement des ressources énergétiques futures.

*Mais pourquoi le dioxyde de carbone est-il aussi indésirable ?*

Le rejet puis l'accumulation dans l'atmosphère du dioxyde de carbone et d'autres gaz ont pour effet la modification du climat, notamment l'augmentation de la température causée par l'effet de serre.

Jacobson et al [37] ont mis en exergue la possibilité que l'hydrogène remplace les combustibles fossiles, néanmoins dans le secteur des transports, compte tenu des désagréments causés par les émissions de gaz d'échappement des automobiles.

Ce combustible n'est pas une source d'énergie primaire parce qu'il faut toujours utiliser une autre source d'énergie pour obtenir l'hydrogène qui peut être stocké comme combustible. L'hydrogène, s'il est obtenu à partir des ressources renouvelables, il sera considéré comme un carburant propre [33].

### **I.5.2 L'Hydrogène et l'économie**

Muradov & Veziroglu [38] ont introduit le concept de « l'économie de l'hydrogène » dans lequel le stockage de l'hydrogène se conjugue avec le stockage de l'électricité.

Les transitions, en général, sont plutôt lentes et craintives par défaut d'études approfondies du sujet en question. Au détriment des avantages environnementaux et économiques avec une sécurité absolue d'approvisionnement énergétiques, la migration du carbone à l'hydrogène se fait timidement et prudemment, en suivant intuitivement les activités scientifiques, technologiques et socioéconomiques [33].

Quelques obstacles freinent l'ascension de l'économie de l'hydrogène où actuellement, il est urgent d'y remédier pour espérer un avenir prospère à ce nouveau-né que l'humanité s'impatiente de voir grandir.

En les développant et en améliorant leurs rendements, les piles à combustibles doivent avoir un intérêt particulier d'une manière qu'elles soient rentables, sûres et respectueuses de la nature. La réduction des coûts de production d'hydrogène devient une nécessité et l'amélioration des systèmes de stockage de ce combustible sera un propulseur certain pour l'adoption de ce nouveau procédé de production d'électricité [33].

### **I.5.3 Production de l'hydrogène**

Le dilemme est que cet hydrogène est extrait à partir des combustibles fossiles ou à travers le reformage du gaz naturel et l'oxydation partielle du charbon et des hydrocarbures lourds [33].

Dans l'attente d'autres découvertes, 95 % de l'hydrogène est produit par le reformage d'hydrocarbures à la vapeur d'eau qui demeure la technique d'extraction la moins coûteuse et la plus répandue actuellement. En effet, la réaction du méthane ou du bio-méthane avec de l'eau produit un mélange contenant de l'hydrogène et du CO<sub>2</sub> qui pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire un hydrogène dé-carboné [39].

Evidemment à court terme, cette technologie s'avère être la plus adaptée en cette période d'essai et de recherche, mais il est aberrant et absurde d'accepter, à long terme, que le nouveau vecteur énergétique soit dérivé des hydrocarbures [33].

Des propositions de décentralisation de la production de l'hydrogène sont en cours d'étude même si la séquestration de CO<sub>2</sub> pourrait ne pas être aussi efficace comme pour la production centralisée à grande échelle [33].

Le recours à la pyrolyse s'avère être une solution future pour une séquestration facile, même si, actuellement le coût de ce processus est beaucoup plus élevé que celui du reformage à la vapeur du gaz naturel qui est déjà énergivore, coûteux et induisant toujours du dioxyde de carbone, élément nocif à la pérennité de la vie sur terre [33]. Juste pour rappel, la pyrolyse est une décomposition chimique d'un composé organique par une augmentation importante de

sa température en absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en oxygène pour éviter l'oxydation et la combustion.

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau atteint un rendement de 75%, mais avec un coût beaucoup plus élevé que celui produit par des combustibles fossiles. L'utilisation des énergies renouvelables ne pourra satisfaire les besoins en hydrogène nécessaire à l'échelle mondiale pour l'utiliser comme nouvelle source d'énergie [40].

Proche de l'utopie, les chercheurs envisagent de produire l'hydrogène efficacement et directement de la lumière du soleil par un processus photo catalytique en divisant l'eau des océans en hydrogène et en oxygène sans utiliser de l'électricité. Un procédé qui nécessite le développement de matériaux innovants, la maîtrise des phénomènes physiques émergents et l'évolution de nouvelles techniques de synthèse [33].

Malgré la dangerosité de la technologie nucléaire, la fission peut produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau ou bien encore par des procédés thermochimiques, que grâce à la chaleur, l'eau est dissociée [40, 41]. Si jamais la fusion est développée, elle pourrait être à l'origine d'une ressources propres, abondantes et sans carbone pour produire de d'hydrogène [40, 41].

### **I.5.4 Stockage de l'hydrogène**

Cet hydrogène, une fois produit doit être stocké dans des réservoirs cylindriques en aciers à 200 bars de pression et pour l'acheminer, les mêmes conditions de sécurité doivent être réunies du moment de production jusqu'à l'utilisateur du combustible. Le stockage de l'hydrogène diffère selon, s'il est destiné au transport, qui demande des exigences strictes ou s'il est affecté pour des applications stationnaires [33].

Pour percer dans ce nouveau contexte énergétique, les Etats, soucieux du devenir de la planète, devront s'investir davantage dans l'approvisionnement et la distribution de l'hydrogène en installant un réseau de distribution et d'approvisionnement fiable [33].

### **I.5.5 Hydrogène et sécurité**

L'hydrogène est actuellement utilisé, majoritairement, en industrie chimique dans la production d'ammoniaque et du méthanol et dans la pétrochimie lors du raffinage du pétrole, ainsi rarement dans la fabrication de graisses végétales [42].

L'hydrogène présente des risques de sécurité comme c'est le cas de l'essence ou du gaz naturel et tous autres combustibles. Outre l'inflammabilité de l'hydrogène, des préoccupations associées à des hautes pressions ou à des basses températures exigent une manipulation

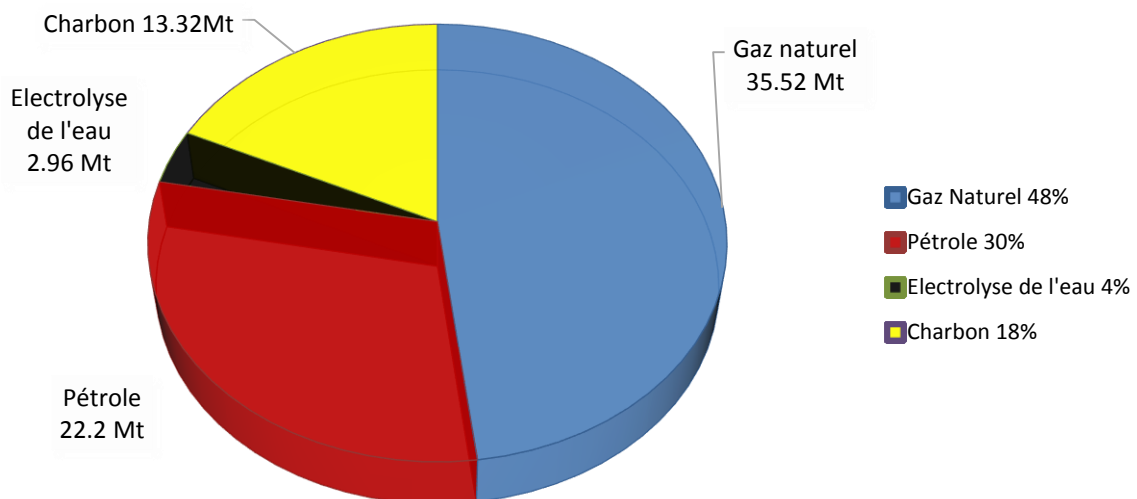
particulière. L'utilisateur doit adopter l'hydrogène tout en acceptant les risques et périls si jamais il ne respecte pas strictement les consignes de sécurité [42].

### I.5.6 Production et répartition mondiales de la production de l'hydrogène

En invoquant la troisième révolution énergétique, l'économie de l'hydrogène s'appuie sur le stockage des excédents des énergies renouvelables, notamment l'éolien, le solaire, la marémotrice pour ne citer que ceux-là. La décarbonation devient alors, l'objectif principal pour que l'hydrogène puisse remplacer les combustibles fossiles.

La perspective d'ici 2050, l'hydrogène propre va réduire d'un tiers les émissions mondiales de gaz à effet de serre [43].

La transition énergétique se fera en deux laps de temps. En premier lieu, l'hydrogène doit être adopté par les industriels puis viendra la généralisation à d'autres applications étroitement liées à la vulgarisation de la pile à hydrogène [43].



**Figure I.10** : Evaluation de la production mondiale d'hydrogène en 2018 [41].

Le vert alloué à l'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau à partir d'électricité provenant uniquement d'énergie renouvelable est aussi appelé hydrogène renouvelable et s'il est issu d'énergie nucléaire, le jaune lui est attribué. L'hydrogène gris est fabriqué par des procédés thermochimiques avec comme matières premières du charbon ou du gaz naturel, il est nommé aussi par hydrogène fossile. Le fait de stocker le CO<sub>2</sub>, le bleu lui est alloué [44].

Pour concrétiser les perspectives de la relance économique, des électrolyseurs de 1GW à 10 GW sont en cours de réalisation afin de multiplier par 100 ou voir par 1000 la production actuelle, où d'ici 2030, un pas quantitatif sera réalisé [44].



L'hydrogène représente près de 30 % des émissions d'Air liquide présent dans 78 pays, soit quelques 9 millions de tonnes par an. La capacité d'électrolyse passera à 3 000 MW en 2030, de quoi assurer 120 millions de tonnes d'hydrogène vert par jour. Elle compte aussi produire de l'hydrogène à partir de bio-méthane. Presque la moitié de l'hydrogène sera produite loin des hydrocarbures sans émission de carbone entre 2030 et 2035 [44].

## I.6 Pile à combustible

### I.6.1 Généralités

Humphry Daw en 1801 démontre le principe de l'électrolyse inverse de l'eau. Le premier moteur à combustion qui utilise de l'hydrogène et de l'oxygène fût inventé en 1806 et Sir William Grove en 1839, invente le principe de la batterie alimentée par des réactifs gazeux  $H_2$  et  $O_2$ . En 1889, Charles Langer et Ludwig Mond développent l'invention de William Grove où une combustion électrochimique contrôlée de l'hydrogène et de l'oxygène produit de l'eau et de l'électricité sans aucun processus thermique ou mécanique, la pile à combustible (PAC) ou en Anglais, Fuel Cell (FC) est, alors, née [45, 46].

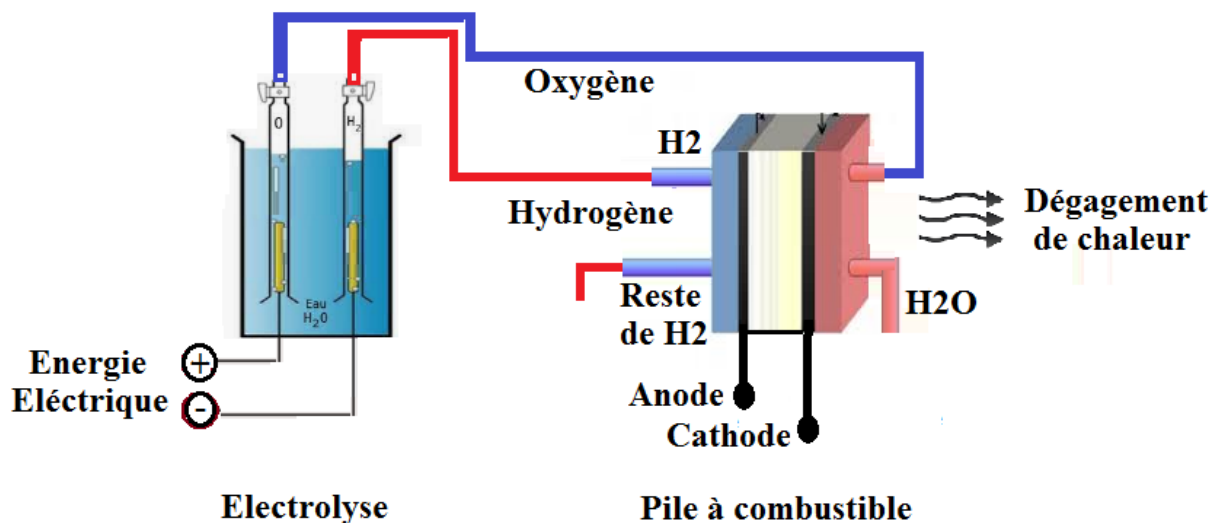


Figure I.11 : Schéma Electrolyse-Electrolyse inverse [47].

Une PAC transforme l'énergie d'une réaction chimique en énergie électrique, elle comprend une anode et une cathode séparées par un électrolyte, qui permet la migration des ions d'une électrode à une autre sous l'effet du champ électrique créé [45].

En théorie, une PAC est indéfiniment fonctionnelle tant que l'anode et la cathode sont continuellement approvisionnées en combustible et en comburant. L'hydrogène est le plus efficace des carburants grâce à sa haute réactivité électrochimique et l'oxygène est le meilleur des oxydants grâce à sa haute réactivité et son abondance dans l'air.

Il est nécessaire de rappeler que le terme pile à combustible peut désigner soit une cellule électrochimique, soit un empilement de cellules, soit un système composé d'auxiliaires permettant le fonctionnement d'un empilement de cellules [48].

### I.6.2 Constitution d'une pile à combustible

La PAC est constituée d'un assemblage d'éléments composés d'Anode-Electrolyte-Cathode (AEC), connectés entre eux par des plaques bipolaires séparatrices d'épaisseur de 1mm à 5mm, formant une cellule élémentaire et l'assemblage de plusieurs cellules forme un module nommé « stack » [49].

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température et d'autres à basse température mais nécessitent des catalyseurs en métal noble, notamment du platine, destinés à améliorer les réactions aux électrodes. Les électrodes sont réunies puis collées aux deux côtés de la membrane par pression à chaud [49].

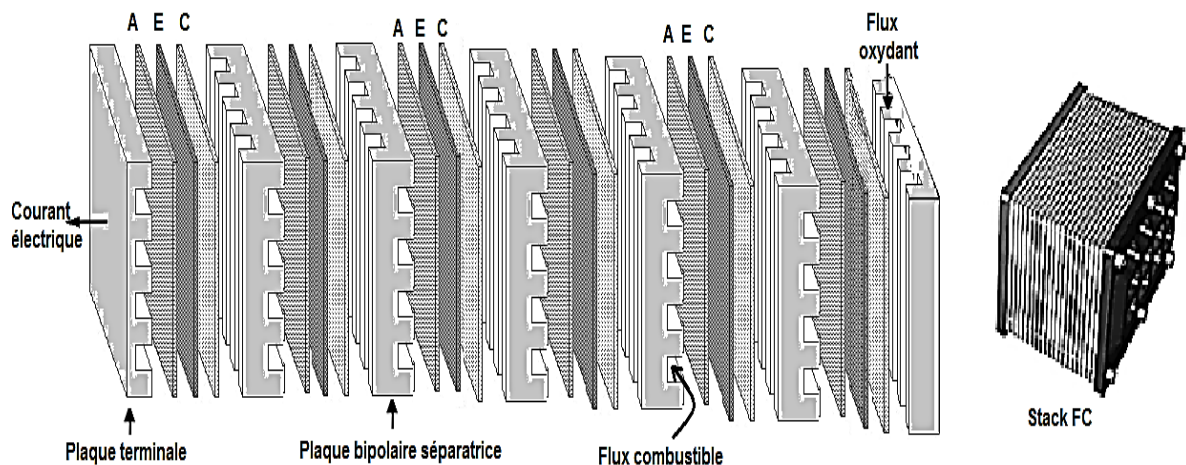


Figure I.12 : Principe d'assemblage de cellules élémentaire CEA [50].

#### I.6.2.1 Les électrodes

L'électrode supporte le catalyseur et permet le contact avec les gaz et elle est le siège de réactions chimiques mettant en jeu des réactifs tel que l'hydrogène ou l'oxygène.

En outre, elle permet aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique et elle évacue les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribue ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques [49].

Ces électrodes sont très sensibles au CO et au soufre, raison pour laquelle l'hydrogène issu du reformage n'est pas utilisé sinon une diminution de la densité de courant surfacique et

donc une diminution de puissance sera observée. Afin d'éviter le phénomène d'empoisonnement au CO, la recherche se penche sur le remplacement ou la diminution du platine par l'utilisation d'alliages de platine (Pt/Ru, Pt/Mb, Pt/Sn) et l'utilisation du fer, du nickel ou du cobalt pour les piles de haute température [49, 50].

### **I.6.2.2 Electrolyte**

La fonction de l'électrolyte est de séparer les deux gaz mis en jeu en se dressant comme un isolant d'électrons. L'électrolyte permet la migration entre les deux électrodes d'ions  $H^+$  pour les PEMFC et d'ions  $O^{2-}$  pour les SOFC.

L'électrolyte utilisé pour les PEMFC, qui fonctionne efficacement à des températures inférieures à  $100^{\circ}C$ , est une membrane épaisse constituée de polymère perfluoré. Par contre pour les SOFC, qui fonctionne à haute température, supérieure à  $800^{\circ}C$ , l'électrolyte est une céramique solide à base d'oxyde de zirconium dopée avec de l'oxyde d'yttrium.

Tous les électrolytes acides en polymère solide exigent, pour obtenir une conductivité efficace, la présence d'une proportion d'eau pour conduire les ions d'hydrogène. Les membranes doivent être conductrices pour les protons, isolantes pour les électrons et imperméables aux gaz [50].

### **I.6.2.3 Catalyseur**

La présence du catalyseur assure une anticorrosion dans un environnement acide et accélère la réaction électrochimique au niveau des électrodes. Un compromis obligatoire est d'utiliser le platine comme catalyseur même s'il est un métal noble, donc onéreux [49].

Les catalyseurs du côté anode sont des métaux précieux, tels que le platine Pt, le rhodium Rh, le ruthénium Ru ou le palladium Pd et sont répartis sur les électrodes en charbon actif à très grande surface spécifique.

Les catalyseurs du côté cathode peuvent être des métaux précieux, certains métaux de transition, du charbon actif avec de l'or ou de l'argent pour les températures basses et moyennes et du nickel fritté ou des oxydes mixtes pour les piles de haute température.

### **I.6.2.4 Plaque bipolaire**

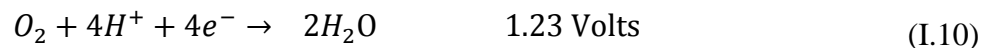
Les plaques bipolaires canalisent les gaz venant de l'extérieur, collectent les électrons, donc le courant, et gèrent les flux d'eau, raisons pour lesquelles, elles doivent avoir une conductivité électrique supérieure à 10 siemens/cm, une imperméabilité au gaz supérieure à celle de la membrane échangeuse de protons et une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides utilisés [49].

### I.6.3 Principe de fonctionnement de la PAC

L'anode alimentée en combustible, donc source d'hydrogène ( $H_2$ ,  $CH_3OH$ ,...), est le siège d'une réaction d'oxydation tel que [51] :



La cathode alimentée en comburant, donc en oxygène ( $O_2$ , air,...), est le siège d'une réaction de réduction suivante :



La présence d'un catalyseur, généralement du platine, accélère les deux demi-réactions. Le nombre de cellules conditionne la tension  $U_{FC}$  du module et la surface des cellules conditionne l'intensité de courant  $I_{FC}$ .

Pour une PAC, un stockage, une alimentation en combustible, en comburant, éventuellement un système de reformage et de purification du combustible doivent être assurés ainsi que des conduits de circulation des fluides et de l'évacuation de la chaleur et de l'eau et de son recyclage pour un éventuel conditionnement de l'électricité produite [51].

### I.6.4 Différents types de PAC

Hormis la pile à membrane électrolyte polymère (PEMFC), légère et facile à construire, utilisée d'ailleurs, par la NASA dans les années 60 dans le programme spatial Gemini et Apollo, plusieurs types de piles à combustible, ont vu le jour, ayant des caractéristiques de fonctionnement qui diffèrent selon la nature des gaz et de l'électrolyte utilisé [52].

Selon l'électrolyte utilisé, qui détermine la température de fonctionnement, plusieurs types de PAC sont à déplorer à savoir :

#### I.6.4.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell

La pile à membrane polymère échangeuse de protons « PEMFC » fonctionne à faible température, inférieure à  $100^\circ C$ , et utilisant  $H^+$  comme catalyseur. Ayant un rendement de l'ordre de 50%, le démarrage est rapide et à pleine puissance, ce qui permet d'alimenter en énergie les véhicules et les installations de petite ou de moyenne taille.

Les piles PEMFC existent pour des gammes de puissance de quelques milliwatts à plusieurs centaines de kilowatts.

### I.6.4.2 Phosphoric Acid Fuel Cell

La « PAFC » fonctionne entre 180°C et 210°C et permet d'alimenter des installations stationnaires de plusieurs mégawatts. La forte chaleur dégagée par la pile permet son utilisation pour la cogénération.

### I.6.4.3 Alkaline Fuel Cell

La pile « AFC », connue dans les missions spatiales Apollo, utilise OH<sup>-</sup> comme catalyseur et la température de fonctionnement est limitée entre 65°C et 90°C. Elle peut monter jusqu'à 250°C sous pression avec un électrolyte très concentré. Son rendement est de l'ordre de 50%.

### I.6.4.4 Direct Methanol Fuel Cells

Les piles à combustible à méthanol direct « DMFC » sont une sous-catégorie de PEMFC dans lesquelles le méthanol CH<sub>3</sub>OH est fourni directement à la pile à combustible.

**Tableau I.2** : Les différents types de pile à combustible [51].

	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	SOFC	MCFC
	<b>Basse Température</b>				<b>Haute Température</b>	
<b>Température</b>	70°C à 100°C	70°C à 90°C	150°C à 220°C	50°C à 250°C	700°C à 1050°C	600°C à 800°C
<b>Electrolyte</b>	Membrane en Polymère solide	Membrane en Polymère solide	Acide Phosphorique liquide	Potasse liquide KOH	Céramique solide	Sel de carbonate fondu liquide
<b>Combustibles possibles</b>	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, gaz naturel	Hydrogène	Hydrogène, gaz naturel, Méthanol	Hydrogène, gaz naturel, Méthanol
<b>Gamme de puissance</b>	1W à 10MW	1W à quelque KW	200KW à 10MW	1W à 100KW	1KW à 100MW	500KW à 10MW
<b>Rendement électrique</b>	30% - 45%	30% - 45%	35% - 45% 75% en cogénération	50% - 60%	50% - 55% 70% en cogénération	50% - 60%

### I.6.4.5 Solid Oxid Fuell Cells

La « SOFC » fonctionne à très haute température, entre 800°C et 1000°C, une aubaine pour ne pas utiliser des catalyseurs à base de métaux rares. Utilisées dans la production

d'électricité stationnaire et ayant un démarrage assez lent nécessitant une isolation particulière et des composants robustes.

#### **I.6.4.6 Molten Carbonate Fuel Cells**

La «MCFC» utilise le  $CO_3^{2-}$  comme catalyseur et fonctionne avec des températures assez élevées, entre 600 et 700°C. Ayant un rendement au voisinage de 60% à 80%, elle est utilisée pour des grandes productions d'énergie stationnaire de quelques dizaines de MW.

### **I.6.5 Avantages et inconvénients des PEMFC**

#### **I.6.5.1 Avantages**

La PEMFC occupe un petit espace par rapport aux autres générateurs, étant non acoustique, elle peut fonctionner à basse température et ne nécessite que peu d'entretien.

Ayant un bon rendement de conversion et ne rejetant pratiquement pas de gaz nocifs, elle est qualifiée de générateur propre et la modularité de cette pile à combustible la rend intéressante du point de vue extension [53, 54].

#### **I.6.5.2 Inconvénients**

La durée de vie d'une FC est encore faible surtout dans les cas où le courant délivré subit des variations importantes et répétées.

L'utilisation du platine comme catalyseur pour avoir un fonctionnement à basse température et l'approvisionnement en bouteilles d'hydrogène restent un handicap certain vis-à-vis des coûts élevés de fabrications [53, 54].

### **I.7 Notions sur les machines multiphasées**

Les machines triphasées à courant alternatif assurent une rotation avec une possibilité de variation de vitesse dans les processus industriels. Le handicap de ce genre de machine réside lors des utilisations à fortes puissances, surtout, au niveau des onduleurs qui doivent commuter des courants importants d'où la nécessité d'utiliser plusieurs structures en parallèle.

Un paradoxe apparaît du fait que la réduction des courants à commuter cause l'augmentation des tensions mises en jeu, provoquant, ainsi, un vieillissement prématuré des isolants [55, 56]. Pour réduire ces gradients de tensions élevées, il est impératif d'outrepasser la machine triphasée et d'opter pour des machines de structure multi niveaux ayant un nombre de phase supérieur à trois. Ces machines sont, souvent, désignées par « machines à grand nombre de phases » ou « machines multiphasées » [55, 56, 57].

### I.7.1 Caractéristiques des machines multiphasées

Un intérêt particulier est porté sur les machines multiphasées pour de diverses raisons, notamment, celles relatives à la segmentation de puissance, la diminution des ondulations du couple électromagnétique, la possibilité de fonctionnement en mode dégradé [13, 55, 58].

La machine multiphasée est utilisée dans la traction ferroviaire et automobile, la marine, l'avionique et l'aérospatial offrant ainsi une sécurité supplémentaire du point de vue fonctionnement, couple, vibration et bruit. Dans le milieu industriel, ces machines sont présentes comme ventilateurs, compresseurs, moulins de compresseurs, moulins de ciment et comme pompes [55, 59].

Les machines multiphasées sont classées suivant le nombre de phases statoriques qui est ou non multiple de trois, ainsi, deux types de machine se distinguent [17, 55, 60].

#### I.7.1.1 Machines multiphasées de «Type 1»

Le type 1 possède un nombre de phases statoriques « q » multiple de trois.

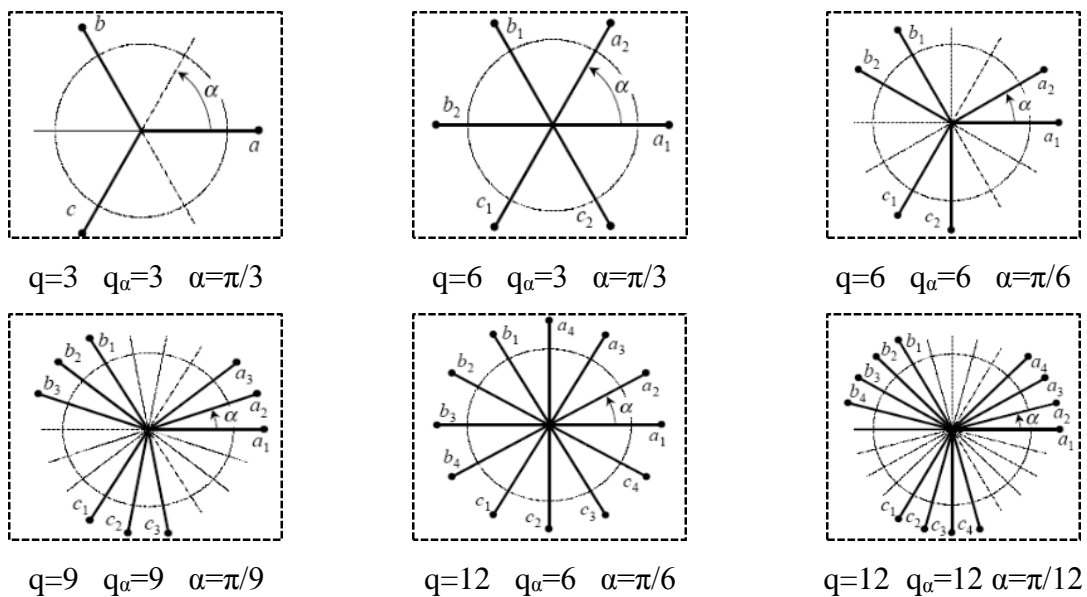


Figure (I.13) : Machines multiphasées de type «1» [3, 57].

Le nombre  $\eta$  est donc le nombre d'étoiles triphasées, d'où la nomination de « machine multi étoile ». Pour un même nombre de phases, plusieurs configurations sont possibles, suivant le décalage angulaire ( $\alpha$ ) entre deux bobines adjacentes qui n'est autre que le décalage angulaire entre deux étoiles adjacentes [55, 56, 57].

Il s'avère donc nécessaire d'introduire un coefficient nommé « nombre équivalent de phases » pour pouvoir différencier entre les configurations possibles donné par :  $q_\alpha = \pi/\alpha$



### I.7.1.2 Machines multiphasées de « Type 2 »

Le type de machine dit ‘type 2’ regroupe les machines multiphasées ayant un nombre de phases statoriques « q » impair. Les q phases sont décalées d’un angle de  $\ll \frac{2*\pi}{q} = 2 * \alpha \gg$ .

Le nombre équivalent de phases est donné par :

$$q = q_{\alpha} = \pi/\alpha \tag{I.11}$$

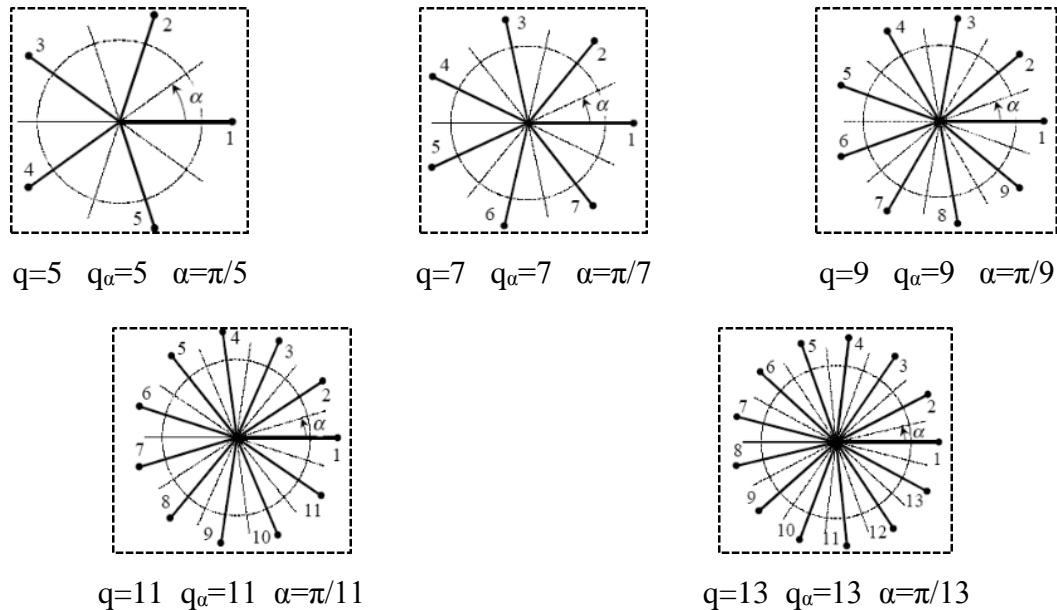


Figure (I.14) : Machines multiphasées de type «2» [3, 57]

### I.7.2 Avantages de la machine multiphasée

Un intérêt distinctif est porté sur les machines multiphasées, notamment, sur les machines asynchrones à double étoile pour leurs avantages multiples qu’elles offrent.

#### I.7.2.1 La segmentation de puissance

Le fait d’augmenter le nombre de phases du stator, le courant par phase est diminué sans que la tension par phase ne soit augmentée. La puissance totale est répartie sur les diverses phases. L’onduleur alimentant la machine aura des composants de puissance de calibre inférieur, fonctionnant à des fréquences de commutation plus élevées offrant une minimisation des ondulations de courant et de couple [15, 55]

#### I.7.2.2 La fiabilité

Lors d’une défaillance d’un des bras ou de plusieurs bras de l’onduleur alimentant la machine multiphasée, le fonctionnement en régime dégradé est assuré tant qu’au moins trois phases restent actives [16, 55, 61].



### **I.7.2.3 Elimination d'harmonique d'espace**

Les harmoniques d'espace d'un certain ordre sont éliminés dans les machines multiphasées. A noter que pour un nombre d'encoches donné, plus le nombre de phases augmente, plus le nombre d'encoches par pôle et phase diminue, cela revient à dire que le facteur de distribution du fondamental augmente [17, 62, 63].

### **I.7.2.4 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques**

Les machines multiphasées possèdent la propriété d'éliminer les harmoniques du couple du rang faible. Les ondulations du couple sont, plus rapidement, amorties dans une machine ayant plus de phases.

Du fait que certains harmoniques de courant statorique ne créent pas de force magnétomotrice (f.m.m), donc, n'induisent pas de courant au rotor, la machine multiphasée aura moins de perte rotorique [55, 57].

### **I.7.2.5 Amélioration du facteur de puissance**

A l'instar des machines à grand nombres de phases, le facteur de puissance de la machine asynchrone à double étoile est amélioré par rapport à la machine asynchrone triphasée [57].

### **I.7.3 Inconvénients de la machine multiphasée**

Alimenter la machine asynchrone à double étoile, directement, par le réseau prive l'utilisateur d'un contrôle de vitesse et du couple par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique. Un tel contrôle est réalisable par l'utilisation d'un onduleur de tension qui, malheureusement, cause des harmoniques de courant d'amplitude importante [64].

L'augmentation de nombre de phases engendre une augmentation de semi-conducteurs à utiliser, ce qui provoque un surcroît du coût de l'ensemble convertisseur-machine, un compromis qui est sûrement surmonté par la segmentation de la puissance [17].

## **I.8 Généralités sur les pompes**

Des divers récipients antédiluviens, Seghia, Delou, Foggaras, Chadouf, Noria, Vis d'Archimède, aux pompes modernes, les Chinois, les Grecs et les Romains furent les pionniers dans l'utilisation des systèmes rotatifs pour véhiculer l'eau. L'apparition de l'énergie électrique a boosté l'évolution dans la technique des pompes à principe rotatif, des turbines et des pompes

centrifuges, en vue d'obtenir de meilleurs rendements, de plus grand débits et de plus hautes pressions [3, 65].

Afin d'assurer le mouvement des organes de la pompe, il est nécessaire, au préalable, de transmettre l'énergie indispensable aux moteurs qui transforment l'énergie thermique ou électrique en une énergie mécanique retransmise au fluide, soit sous forme d'énergie cinétique appelée 'débit' ou bien sous forme d'énergie potentielle appelée 'pression' [3, 66].

### I.8.1 Pompe centrifuge

Dans le domaine du pompage d'eau brute et d'eau potable, du traitement et évacuation des eaux usées ou du pompage des eaux pluviales, les pompes les plus, fréquemment, utilisées restent les pompes centrifuges, mais ne laissent pas les autres modèles de pompes en expectative, car elles trouvent leurs applications dans des domaines bien précis [3, 67].

#### I.8.1.1 Constitution d'une pompe centrifuge

Une pompe centrifuge se compose d'un distributeur qui sert à distribuer l'eau avec une vitesse et une direction convenables dans l'axe de la pompe appelé 'ouïe' ou 'œillard', d'une roue ou turbine qui est constitué par un moyeu porté par un arbre et muni d'aubes tournant à l'intérieur de deux coquilles formant le corps de la pompe [68, 69, 70].

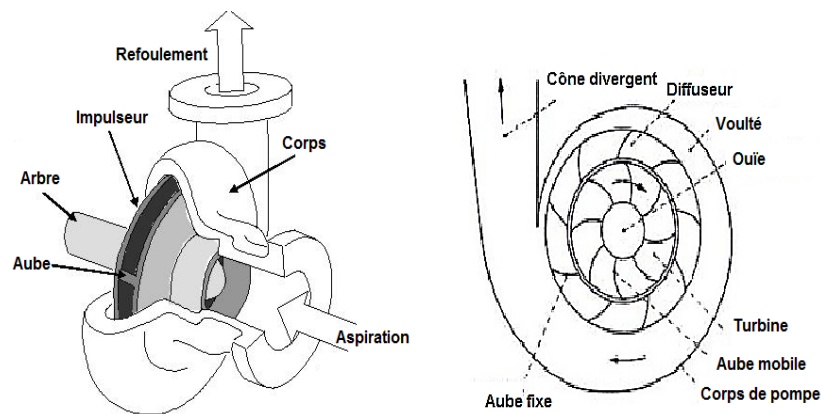


Figure (I.15) : Pompes centrifuges [68].

#### I.8.1.2 Fonctionnement

Le principe de fonctionnement des pompes centrifuges repose sur le fait de l'accroissement entre l'entrée et la sortie de la roue de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique, donc, de l'énergie mécanique.

L'énergie cinétique est transformée en énergie pression ou énergie potentielle par un ralentissement progressif obtenu dans une pièce placée à l'extérieur de la roue, qui peut être,

un diffuseur lisse, un diffuseur à ailettes, un colimaçon ou un volute qui se termine par un cône divergeant qui contribue encore à ralentir la vitesse du fluide en la récupérant sous forme de pression. L'eau entre par le centre de la roue et sort à la périphérie, décrivant une trajectoire centrifuge d'où le nom donné à ces pompes [3, 71].

### **I.8.2 Différents types de pompes centrifuges**

Le classement des types de pompes centrifuges existants se fait suivant le nombre de roues, la forme des aubes de la roue, la direction de l'axe, horizontale ou verticale, la position de la pompe par rapport au niveau de l'aspiration et selon le type d'effluent à pomper [3, 72].

Selon le nombre de roues, ils existent des pompes monocellulaires et des pompes multicellulaires et selon la forme des aubes, ils existent des pompes du type centrifuge pur, du type hélico-centrifuge et du type hélices ou hélicoïde où la vitesse de l'eau à la sortie des aubes mobiles est parallèle à l'axe sur une trajectoire hélicoïdale des filets liquides [3, 68, 70].

Selon le type d'effluent spécifique à pomper, il existe aussi des pompes conçues spécialement pour des eaux chargées d'assainissement, des eaux pluviales, des eaux industrielles,...etc. Ce groupe de pompage est dit submersible, car, pouvant travailler en immersion et en émergence partielle. L'installation immergée stationnaire est la mieux adaptée aux postes de relèvement. Le groupe immergé est relié à sa canalisation de refoulement par un accouplement rapide, permettant une mise en place et un démontage automatique à partir de la surface. L'installation en fosse sèche présente l'avantage de pouvoir accéder directement aux groupes de pompage sans relevage intermédiaire [3, 68].

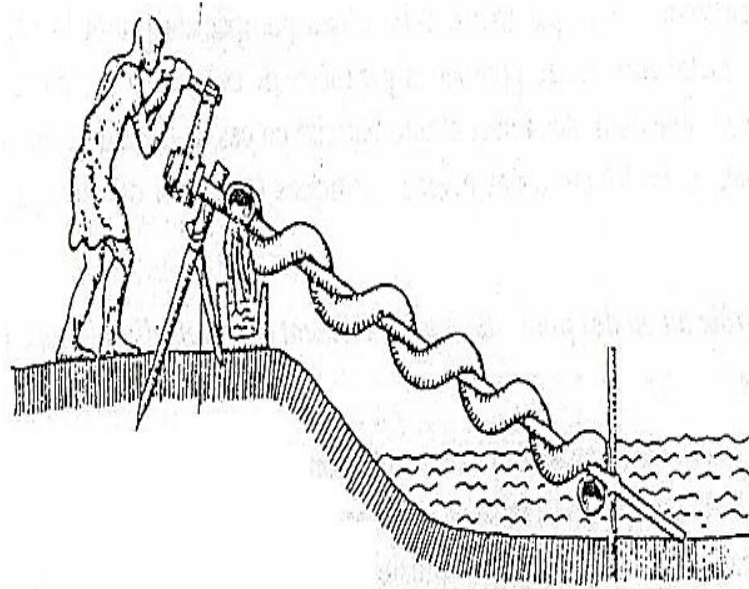
Ils existent des pompes de surface à axe horizontal où le moteur est raccordé par un accouplement, parfois par un spacer, permettant l'enlèvement de la pompe sans démontage du moteur et des pompes de surface à axe vertical qui sont adoptées lorsqu'un gain d'encombrement au sol est recherché. Dans le cas où la pompe doit être placée en zone inondable, une tringlerie d'entraînement directe ou à cardan offre la possibilité de placer le moteur à sec [3, 68].

### **I.8.3 Autres types de pompes**

#### **I.8.3.1 Machines élévatoires simples – vis d'Archimède**

Imaginé par Archimède de Syracuse au III<sup>e</sup> siècle avant Jésus christ, sans doute la plus ancienne des pompes, cette vis composée de cuir enroulé autour d'un axe équipé, à son extrémité de manivelle. Lorsque la portée inférieure du tuyau est plongée dans l'eau, le mouvement rotatif fait monter l'eau dans le tuyau [3, 68].

C'est ce même dispositif, valable aujourd'hui encore, qui est utilisé, généralement, en amont des stations d'épuration pour le relevage des effluents d'arrivée, connu sous la dénomination de 'Vis d'Archimède' [3].



*Figure (I.16) : Vis d'Archimède [3].*

Ces machines permettent l'élévation jusqu'à 2 m<sup>3</sup>/s de débit à des hauteurs d'élévation assez faible avec des rendements environnant 65 % [3, 68].

### **I.8.3.2 Pompe à piston**

Avec des rendements de l'ordre de 80 à 90 %, ils existent des pompes aspirantes et foulantes, à simple effet ou à double effet, des pompes à fourreau utilisées sur les puits profonds et forages. Pour le pompage des liquides chargés, les pompes à diaphragme sont utilisées, par contre les pompes à piston plongeur réalisent de fortes pressions à partir de 30 à 40 bars.

Ils existent aussi des pompes rotatives où la variation du volume du corps est obtenue par des organes animés par un mouvement circulaire [3, 68].

### **I.8.3.3 Aéro-éjecteurs**

Utilisés en assainissement, cette technique, apparue au début du XXe siècle, fonctionne par admission d'air dans une cuve permettant de pousser l'effluent dans le réseau de refoulement. L'appareil se compose d'une cuve équipée d'un clapet d'arrivée, d'un départ de refoulement et d'un détecteur de niveau et atteint un débit nominal d'environ 200 chasses par heure, soit 250 m<sup>3</sup>/h avec une hauteur manométrique totale pouvant atteindre les 50 mètres colonne d'eau [3, 68].

#### **I.8.4 Cavitation**

La cavitation est un terme employé pour décrire le phénomène qui se produit dans une pompe quand le NPSH est (voir chapitre III page 87), insuffisamment, disponible. La pression du liquide est réduite à une valeur égale ou inférieure à sa pression de vapeur là où les petites bulles ou des poches de vapeur commencent à se former et qui sont génératrices de chocs très violents et d'abrasions mécaniques rapides et spectaculaires pouvant détruire, très rapidement les organes de la pompe (roue et diffuseur).

Le seul moyen d'empêcher les effets indésirables de la cavitation c'est de s'assurer que le NPSH disponible dans le système est plus élevé que le NPSH requis par la pompe [68].

### **I.9 Système d'énergie hybride**

#### **I.9.1 Définition de l'hybridation**

Le terme « Système d'Energie Hybride » (SEH) signifie une génération d'énergie utilisant au moins deux sources d'énergie et le fait d'ajouter le mot « renouvelable », cela signifie que les sources utilisées sont à énergies renouvelables.

Les sources d'énergies renouvelables (SER) sont généralement utilisées dans les zones isolées où l'accès aux réseaux conventionnelles est quasiment impossible. En 2013, 20% de la consommation mondiale d'énergie est issue des énergies renouvelables [73].

Ayant comme but la satisfaction des charges, l'avantage majeur d'un système hybride réside sur le fait de la pluralité des sources et de la possibilité d'extension. L'exploitation est simple et la maintenance est réduite, ce qui entraîne le faible coût lié au cycle de vie des composants du SEH [74, 75].

L'inconvénient le plus en vue est sans doute la nécessité d'introduire un système de stockage au système qui apparaît plus complexe que les systèmes mono source, ajouté à cela le coût global élevé comparé au groupe électrogène [74, 75].

#### **I.9.2 Importance de l'hybridation**

Les lacunes liées à l'offre de l'énergie limitent leur mise en œuvre en tant que source primaire dans les zones désertiques, d'où l'importance de la combinaison de deux ou de plusieurs sources d'énergies renouvelables pour une meilleure flexibilité et une excellente fiabilité comparé à l'éolien et au GPV pris individuellement [76].

L'hybridation des sources est généralement plus adaptée que les mono sources, particulièrement dans les zones non connectées aux réseaux électriques.

Malgré la variation de la vitesse du vent et les contraintes supplémentaires liées à l'entretien des composants mécaniques de l'éolienne, le pompage de l'eau par la force des pales s'avère être moins coûteux que le pompage par les rayons du soleil [77, 78].

### **I.9.3 Classification des systèmes électriques hybrides**

Afin de satisfaire les besoins en électricité des sites éloignés, les systèmes hybrides peuvent être connectés au réseau électrique ou bien fonctionner en mode autonome. Le SEH peut être aussi classifié selon la présence ou non d'un dispositif de stockage ou selon le type de sources d'énergies renouvelables utilisées [76].

Dans bien des cas, les dispositifs à énergies renouvelables, dont le GPV, l'éolienne et les mini-centrales hydro-électriques, sont associés à des sources conventionnelles, tel qu'un groupe électrogène Diesel ou une microcentrale à gaz.

Le choix est généralement effectué en fonction de l'endroit à implanter l'installation et selon la nature de la charge à alimenter [76].

### **I.9.4 Performances d'un système hybride**

Avec une fiabilité accrue et sans pollution, les SEH sont des installations autonomes, implantées généralement dans les régions isolées loin des réseaux conventionnelles et ils sont conçus pour répondre à la demande d'énergie sur de longues périodes [74]. La flexibilité, la souplesse de fonctionnement et le prix de revient attractif des SEH permettent entre autre le lissage de la puissance délivrée et la remédiation provisoire à une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie [74].

Au préalable, une cartographie des gisements en énergies renouvelables du site d'implantation doit être établie pour pouvoir effectuer un dimensionnement laborieux des éléments afin de mettre en œuvre une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite.

La nature aléatoire du vent et du soleil a contraint l'ingénieur à introduire un système de stockage d'énergie pour pallier à la demande de la charge. Le stockage peut être électrochimique avec un banc de batteries, des supercondensateurs, un ensemble de pile à combustible et d'électrolyseur ou bien une combinaison de tous ces systèmes de stockage pour davantage d'autonomie [74].

### **I.9.5 Différentes architectures des SHER**

Un système hybride à énergies renouvelables est obtenu avec une association d'au moins deux technologies d'énergies renouvelables où, selon la nature de cette énergie obtenue, trois différentes architectures s'imposent à savoir :

### I.9.5.1 Configuration série à bus continu DC

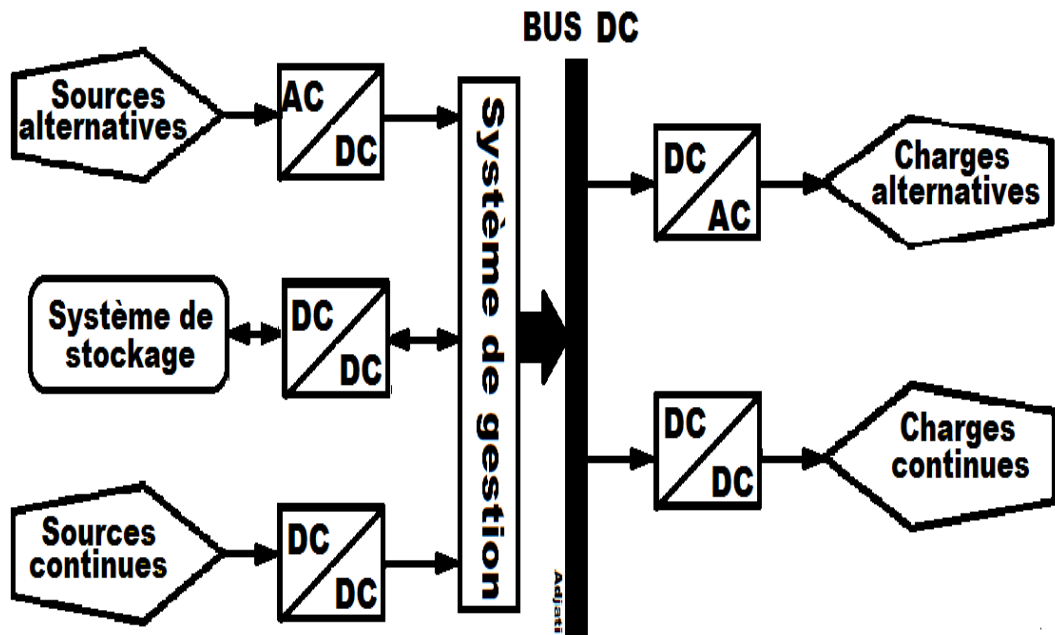


Figure I.17 : Structure des SEH à bus continu DC

Les sources d'énergie, selon leur nature, sont connectées au bus à courant continu DC à travers des convertisseurs de puissance. Pour alimenter des charges à courant alternatif, des onduleurs alimentés via ce bus DC sont utilisés et pour les charges à courant continu, un hacheur est utilisé. Les convertisseurs sont dimensionnés de telle sorte à faire face aux pics de charge [76, 79].

La simplicité de cette architecture rend simple sa commande, néanmoins, le rendement du système reste faible à cause des pertes aux niveaux des différents éléments intervenants dans la chaîne d'énergie, notamment les pertes causées par les convertisseurs.

Le générateur à courant alternatif est facile à dimensionner dans la configuration série et possède un schéma électrique simplifié grâce à l'absence de commutation des sources et sa mise en marche n'entraîne pas de coupure de l'alimentation électrique.

L'alimentation via des onduleurs offre un signal dont la forme, la valeur efficace et la fréquence sont facilement réglables mais il doit être dimensionné pour pouvoir couvrir la charge maximale et dans le cas d'une avarie de l'onduleur, une coupure totale de l'alimentation électrique est provoquée [76].

Le rendement est relativement faible dans le cas d'un générateur à courant alternatif à cause de la double conversion de la puissance fournie.



### I.9.5.2 Architecture mixte à configuration parallèle à bus DC/AC

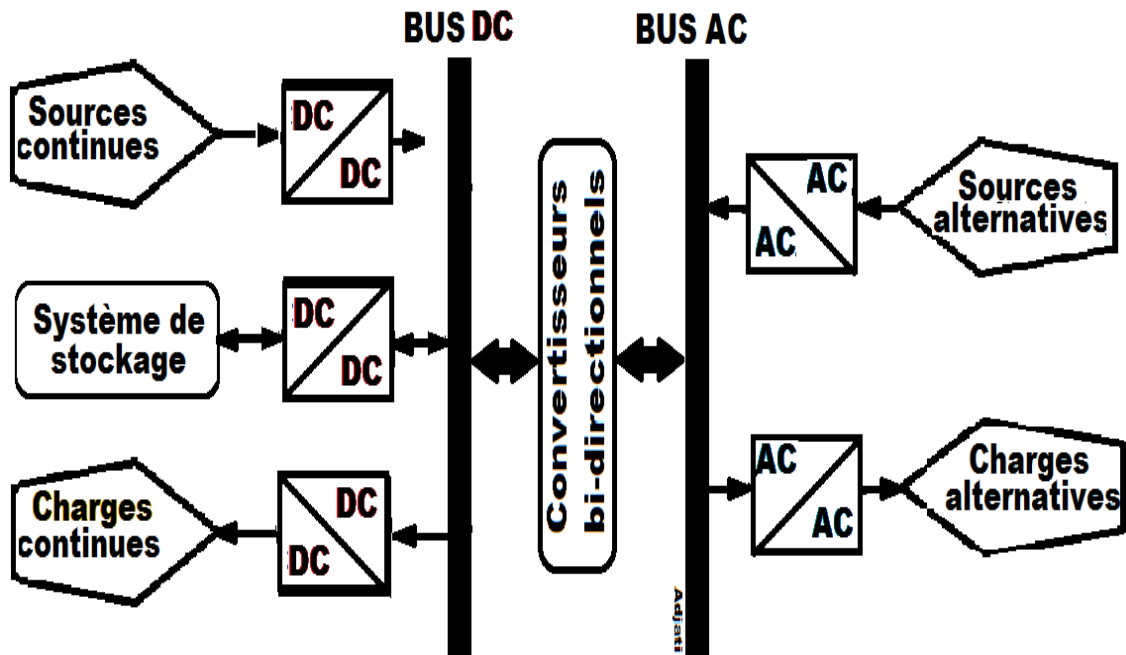


Figure I.18 : Structure des SEH à bus AC/DC

Dans le cas d'une connexion parallèle, les sources alternatives sont connectées au bus AC et les sources continues sont connectées au bus DC et la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément [74, 75].

Un convertisseur bidirectionnel est primordial dans la configuration à deux bus AC et DC, il permet le transfert de l'énergie de la source vers la charge selon la nature de la puissance. Le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme redresseur, lorsque les sources alternatives couvrent la consommation électrique et comme onduleur, quand les sources continues couvrent les besoins des charges. Dans le cas d'une anomalie du convertisseur bidirectionnel, elle ne provoque pas de coupure de l'alimentation [74, 75].

Lors de cette configuration, les éléments de l'installation ne seront pas dimensionnés pour la totalité de la charge compte tenu d'une possibilité d'alimentation par les deux sources simultanément. Le rendement de l'installation est amélioré, du fait que les sources fonctionnent en régime nominal.

Une synchronisation de l'onduleur avec les sources alternatives demeure un souci majeur pour ce genre de configuration et un personnel qualifié est exigé pour pouvoir contrôler l'automatisme, compte tenu de la difficulté de contrôler le bus DC [80, 81].



### I.9.5.3 Architecture à bus AC

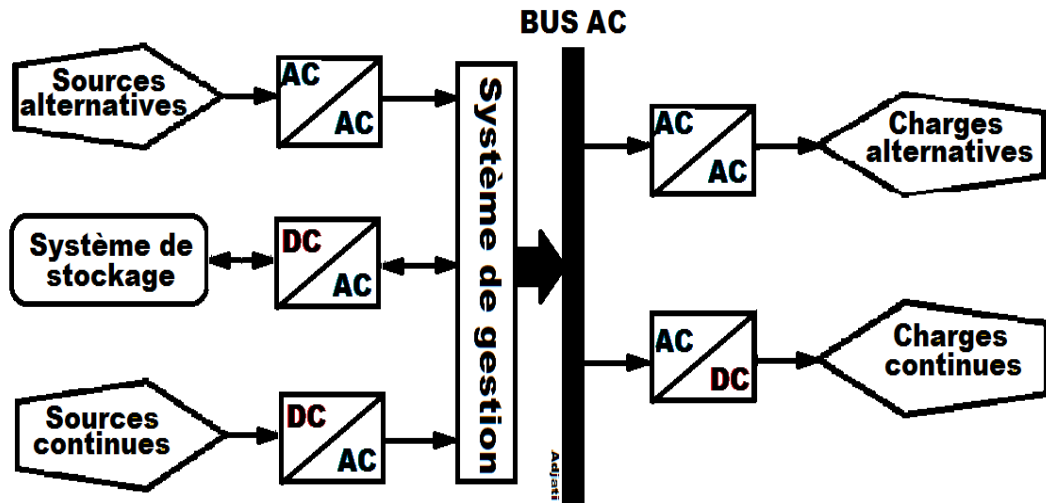


Figure I.19 : Structure des SEH à bus AC

Les sources alternatives sont connectées au bus à courant alternatif AC soit directement ou à travers un convertisseur AC/AC et celles à courant continu sont connectées à travers des onduleurs. Des convertisseurs bidirectionnels sont généralement utilisés pour permettre un transfert bidirectionnel entre les batteries et le bus AC [80, 81].

### I.9.5.4 Configuration à commutation

La configuration à commutation permet la connexion de la charge par la source alternative ou bien par l'onduleur alimenté via le bus DC. L'alimentation par les deux sources simultanément n'est pas envisageable, compte tenu du commutateur de source.

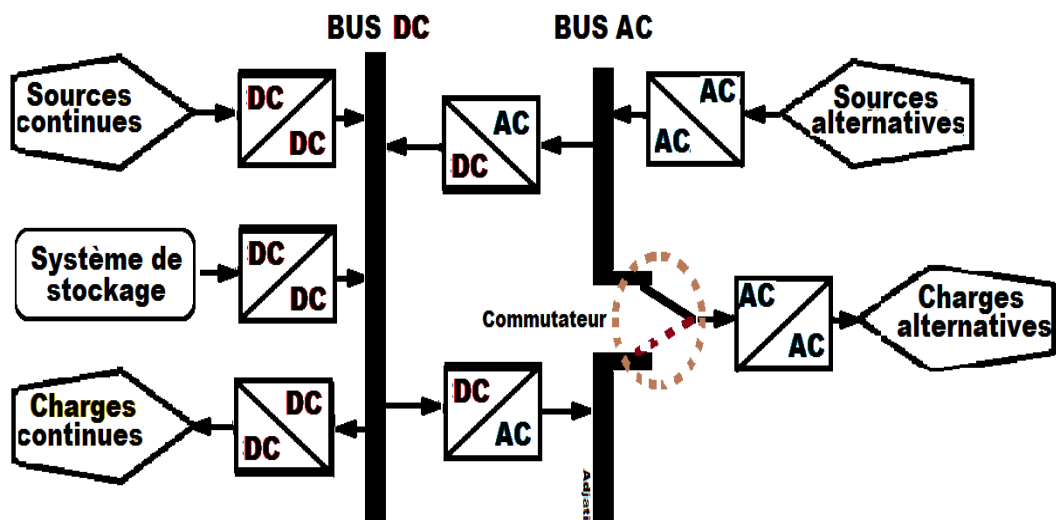


Figure I.20 : Système hybride à commutation

Evidemment, la gestion du système doit être automatisée par l'usage d'un automate programmable industriel à cause de la complexité du système hybride [80, 81].

Le rendement est plus élevé, du fait que la source alternative alimente directement la charge. L'onduleur assure une tension adéquate en forme et en valeur et dans le cas d'une interruption du fonctionnement de l'onduleur, le système ne s'arrêtera pas [80, 81].

La conception de ce genre de structure est relativement complexe et le dimensionnement doit être effectué pour une consommation maximale sans omettre la diminution du rendement lors des périodes défavorable.

### **I.10 Conclusion**

Perdant tout contrôle sur les ressources fossiles, une nouvelle vision de l'avenir ou du devenir de la planète voit le jour. Effectivement, le terme énergie renouvelable commence à devenir courant dans le vocabulaire quotidien des détenteurs du choix. Tout le monde commence à parler « vert » faisant allusion à la préservation et au respect de la planète, introduisant une nouvelle notion, « énergies renouvelables », mais omettant sciemment la phase de fabrication de l'outillage utilisé pour ces nouvelles techniques de production de l'énergie électrique.

L'énergie photovoltaïque trouve son compte dans des divers secteurs, notamment dans des appareils cosmiques sur satellites et des navettes spatiales. Outre les centrales de puissances photovoltaïques ou hybrides connectées au réseau conventionnel d'électricité, ce genre de source est utilisé pour l'électrification des stations-relais ou bien encore dans les régions isolées, assurant des services vitaux à la population, tels que le pompage de l'eau pour la consommation ou l'irrigation, la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, du sang, des produits agricoles, l'éclairage, ..., etc.

Etant donné que la pluviométrie est faible dans les zones arides, le recours aux ressources hydriques provenant essentiellement des nappes phréatiques souterraines devient plus qu'inévitable avec l'utilisation de l'énergie éolienne qui constitue une option intéressante pour pouvoir accéder à cette source vitale, notamment pour les régions ventées.

Voulant fuir les contraintes des énergies fossiles et fissiles, les chercheurs sont contraints à trouver un nouveau vecteur énergétique, disponible et facile à procurer, tout en offrant les mêmes rapports énergétiques. L'hydrogène semble être ce carburant tant attendu, qui sera à la disposition de tout un chacun, promettant un avenir certain tant que les conditions de sécurité soient respectées.

Un conflit semblable à celui existant entre le moteur électrique et le moteur thermique semble se reproduire actuellement, cette fois-ci entre le premier élément du tableau de Mendeleïev et son sixième élément. La décarbonation est un autre défi à relever afin de réduire les émissions du dioxyde de carbone et l'hydrogénisation semble être cette alternative.

Le développement des piles à combustibles et leur utilisation dans les dispositifs hybrides assurent une efficacité en offrant une énergie propre dans les situations les plus défavorables. L'hydrogène peut être produit, entre autre, par le biais d'un électrolyseur, puis stocker pour une éventuelle utilisation.

L'option d'utiliser la machine multiphasée, notamment la MASDE, en remplacement de la machine asynchrone triphasée est validée, compte tenu des divers avantages qu'elle offre, entre autre la segmentation de puissance, l'élimination d'harmoniques d'espace et la minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques avec une amélioration du facteur de puissance du moteur.

Le taux d'intégration des pompes dans le milieu industriel ou tertiaire est justifié du fait que ces organes vitaux dans le déplacement des fluides ont un intérêt particulier, notamment dans le pompage de l'eau, nécessaire à la pérennité de la vie.

La recherche pour améliorer la performance et la fiabilité des sources d'énergie dites « renouvelables » ne cesse de s'accroître et l'introduction de l'hybridation n'a fait que booster les efforts sur la conception, l'optimisation et le contrôle de ces systèmes hybrides. Les différentes architectures utilisées dans la gestion de ces flux d'énergies permettent de mieux gérer la transition énergétique entre ces sources et les diverses charges.

La modélisation des sources renouvelables utilisées dans cette thèse, entre autre le générateur photovoltaïque, l'éolienne et la pile à combustible et des actionneurs, notamment le générateur et le moteur asynchrone à double étoile ainsi que la pompe centrifuge utilisé feront l'objet du prochain chapitre.

# **CHAPITRE II**

## **MODÉLISATION DES SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DES ACTIONNEURS UTILISÉS**

## CHAPITRE II

### MODÉLISATION DES SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DES ACTIONNEURS UTILISÉS

#### II.1 Introduction

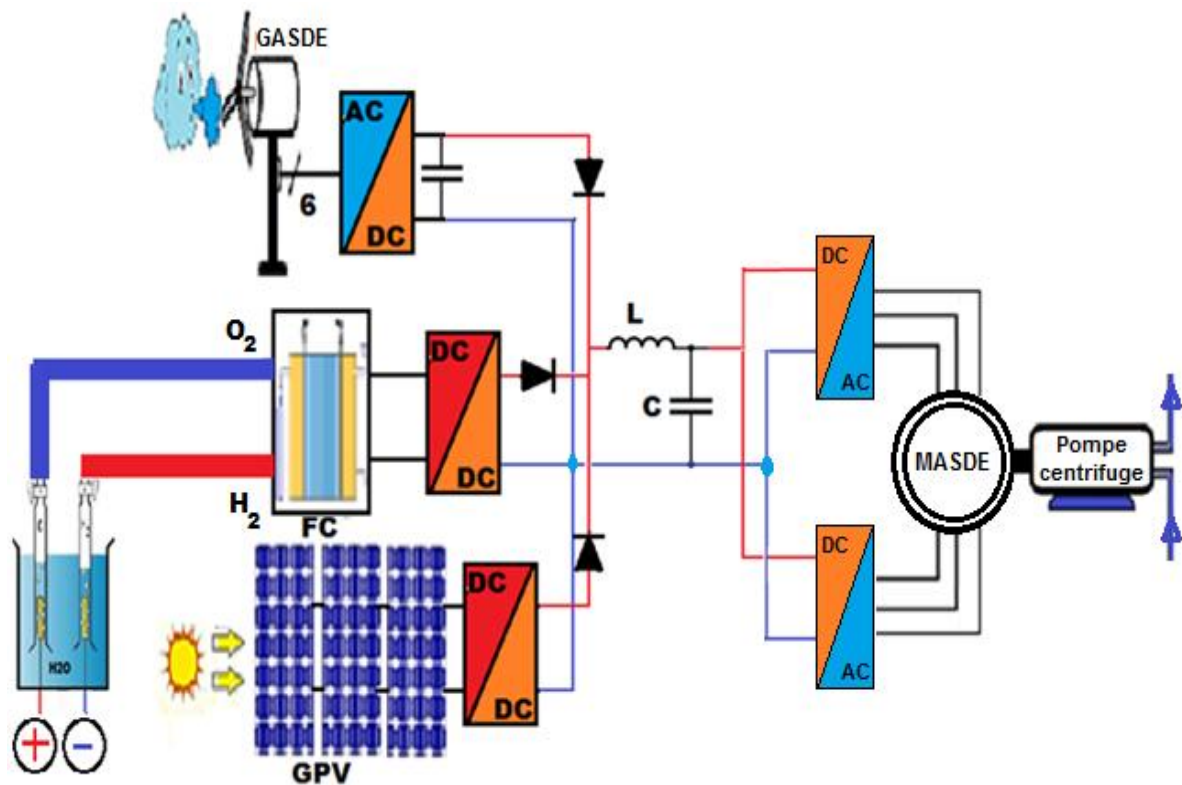
Par l'observation et l'analyse des différentes évolutions des grandeurs d'un système, le « *modéliser* » est une étape primordiale en vue de le contrôler et (ou) de le maîtriser. Donc modéliser, c'est concevoir un modèle mathématique typique du système par l'élaboration des lois de commande régissant son comportement électrique et dynamique [3].

Quel que soit la complexité du système, il est indispensable de développer un modèle dont le comportement soit le plus proche possible du modèle réel.

L'étude du système présente un grand intérêt en raison des impératifs techniques et économiques qui conduisent à concevoir et à exploiter le matériel au voisinage de ses limites technologiques [3, 87].

#### II.2 Présentation du schéma à étudier

Afin d'assurer l'approvisionnement continu en eau d'une localité, une combinaison illustrée par la figure (II.1) est proposée pour assurer les besoins de la charge.



*Figure II.1 : Système de pompage à énergie hybride pour le pompage de l'eau*

Pour pomper l'eau, le système présenté contient un générateur d'énergie photovoltaïque (GPV), une éolienne qui entraîne une génératrice asynchrone à double étoile (GASDE) et une pile à combustible (FC) comme sources d'énergies servant à alimenter un moteur asynchrone à double étoile (MASDE) utilisé pour entraîner une pompe centrifuge et alimenter un électrolyseur pour produire de l'hydrogène.

### II.3 Modélisation du générateur photovoltaïque

Un générateur élémentaire est composé d'une seule cellule photovoltaïque et afin d'améliorer son rendement, des modèles mathématiques sont développés pour identifier les multiples paramètres ayant des comportements non linéaire pour pouvoir les contrôler [3, 88].

#### II.3.1 Modèle d'une cellule idéale

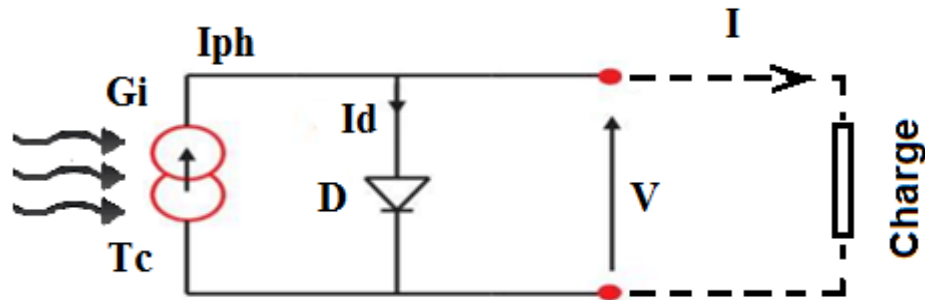


Figure (II.2) : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale [3].

La loi de Kirchhoff appliquée au circuit électrique équivalent, d'une cellule idéale, donne l'expression du courant photovoltaïque engendré par les irradiations lumineuses [89] :

$$\begin{cases} I_{ph} = I + I_d \\ I_d = I_{sat} \times \exp\left(\frac{e \times V}{A \times K \times T_c} - 1\right) \end{cases} \quad (II.1)$$

#### II.3.2 Modèle explicite

Le modèle de Rauschenbach offre des équations qui permettent de générer la courbe caractéristique  $I = f(V)$  d'une cellule solaire en connaissant la tension à circuit ouvert « Voc », la tension à puissance maximale « Vm », le courant de court-circuit « Icc » et le courant à puissance maximale « Im » [3, 55, 90, 91].

Le courant aux bornes de la cellule photovoltaïque est tel que :

$$I = I_{cc} \times \left[ 1 - C_1 \times \left[ \exp\left(\frac{V}{V_{oc} \times C_2}\right) - 1 \right] \right] \quad (II.2)$$

Les constantes  $C_1$  et  $C_2$  sont définies par :

$$\begin{cases} C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right) \times \exp\left(\frac{-V_m}{V_{oc} \times C_2}\right) \\ C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1\right) / \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

La tension «  $V_m$  » correspondante au maximum de puissance est calculée par l'équation suivante [3, 92] :

$$\begin{aligned} V_m = & V_{mref} \left[1 + \Delta V_m \times (T_j - T_{jref})\right] + K_1 \times V_T \ln\left(\frac{G_s}{G_{sref}}\right) \\ & + K_2 \left[V_T \times \ln\left(\frac{G_s}{G_{sref}}\right)\right]^2 \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Le courant «  $I_m$  », correspondant au maximum de puissance, est obtenu par :

$$I_m = I_{mref} \times \left(\frac{G_s}{G_{sref}}\right) \times [1 + \Delta I_m \times (T_j - T_{jref})] \quad (\text{II.5})$$

Pour d'autres niveaux d'ensoleillement  $G_s$  et de température  $T$ , il est possible d'utiliser quelques équations afin d'obtenir de nouveaux points à partir des points de référence de l'ensoleillement et de la température [3, 56, 57].

$$\begin{aligned} \Delta I_m = & \alpha \times \left(\frac{G_s}{G_{sref}}\right) \times \Delta T + \left(\frac{G_s}{G_{sref}} - 1\right) \times I_{cc} \\ \Delta V_m = & -\beta \times \Delta T - R_s \times \Delta I_m \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

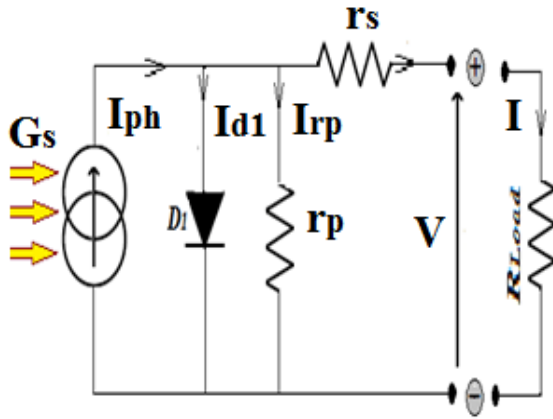
Et les nouvelles valeurs du courant et de la tension sont :

$$\begin{aligned} I_{new} = & I_{ref} + \Delta I_m \\ V_{new} = & V_{ref} - \Delta V_m \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

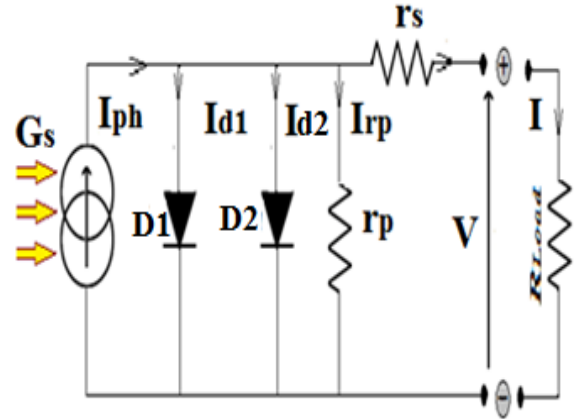
### II.3.3 Modèle à une diode et à deux diodes

La source de courant modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique et la résistance shunt «  $r_p$  » est due à un courant de fuite par l'effet de bord autour de la cellule solaire par contre la résistance série «  $r_s$  » symbolise la résistance interne de la cellule qui dépend, principalement, de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [3, 13].

La diode  $D_1$  placée en parallèle modélise la jonction PN et dans le cas du modèle à deux diodes, la seconde diode  $D_2$  représente le courant de génération-recombinaison dans la zone de charge d'espace de la jonction « ZCE » [7, 58, 89, 88].



**Figure (II.3) :** Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode [13]



**Figure (II.4) :** Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes [13]

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante «  $T_a$  » et une donnée «  $Noct$  » fournie par le constructeur comme suit :

$$T_j = T_a + G_s \times \left( \frac{Noct - 20}{800} \right) \quad (II.8)$$

Le courant photovoltaïque «  $I_{ph}$  », engendré par les irradiations lumineuses, est directement dépendant du rayonnement solaire «  $G_s$  » et de la température de jonction de la cellule «  $T_j$  » tel que [3, 58, 89] :

$$I_{ph} = P_1 \times G_s \times [1 + P_2 \times (G_s - G_{sref}) + P_3 \times (T_j - T_{jref})] \quad (II.9)$$

Le courant passant dans la résistance en dérivation «  $r_p$  » est :

$$I_{rp} = \frac{V + r_s \times I}{r_p} \quad (II.10)$$

Le courant de la jonction NP est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{d1} = I_{sat1} \times \left[ \exp\left(\frac{e \times (V + r_s \times I)}{A \times K \times T_j}\right) - 1 \right] \\ I_{sat1} = P_4 \times T_j^3 \times \exp\left(\frac{-E_g}{K \times T_j}\right) \end{array} \right. \quad (II.11)$$

Et dans le cas du modèle à deux diodes, le courant de génération-recombinaison dans la zone de charge d'espace de la jonction « ZCE » est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{d2} = I_{sat2} \times \left[ \exp\left(\frac{e \times (V + r_s \times I)}{2 \times A \times K \times T_j}\right) - 1 \right] \\ I_{sat2} = P_5 \times T_j^3 \times \exp\left(\frac{-E_g}{2 \times K \times T_j}\right) \end{array} \right. \quad (II.12)$$



D'après la loi des nœuds de Kirchhoff, le courant généré par le module est donné par [13, 58] :

$$\begin{cases} I = I_{ph} - (I_{d1}) - I_{rp} \\ I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{rp} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Les paramètres «  $I_{ph}$  », «  $I_{sat}$  », «  $r_s$  », «  $r_p$  » et «  $V_t$  » dépendent de l'éclairement et de la température de la cellule et sont déterminés à partir des données du constructeur.

### II.3.3.1 Détermination des paramètres du modèle à une diode

Les sept paramètres constants dont, «  $P_1$  », «  $P_2$  », «  $P_3$  », «  $P_4$  », le facteur d'idéalité «  $A$  », les résistances «  $r_s$  » et «  $r_p$  » du modèle à une diode sont déterminés grâce à une résolution numérique par la méthode Newton Raphson du système d'équation (II.14) [3].

$$\begin{cases} I(V_{co}) = 0 \\ I(0) = I_{cc} \\ I(V_m) = I_m \\ \left. \frac{dP}{dV} \right|_{P=P_m} = I_m + \left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_m}^{I=I_m} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Les coefficients «  $P_1$  », «  $P_2$  », «  $P_3$  », «  $P_4$  » et «  $A$  » sont donnés par :

$$\begin{cases} P_1 = 0.00345 \\ P_2 = \frac{P_4}{V_{co}} \\ P_3 = \ln\left(\frac{I_{cc} \times (1 + P_1) - I_m}{P_1 \times I_{cc}}\right) \\ P_4 = \ln\left(\frac{1 + P_1}{P_1}\right) \\ A = \frac{\ln\left(\frac{P_3}{P_4}\right)}{\ln\left(\frac{V_m}{V_{co}}\right)} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

### II.3.3.2 Détermination des paramètres du modèle à deux diodes

A partir des relevés expérimentaux, l'identification des huit paramètres du modèle à deux diodes est réalisable par la résolution de l'équation  $I_G = f(I_G, V_G, E_S, T_j)$  qui aboutit aux différentes valeurs suivantes [3, 63] :

$$\begin{cases} P_1 = 03,40. 10^{-3} \\ P_2 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} P_3 = 0,20. 10^{-5} \\ P_4 = 450 \end{cases} \quad \begin{cases} P_5 = 72 \\ A = 1 \end{cases} \quad \begin{cases} r_s = 0,58 \\ r_p = 160 \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

### II.3.4 Association des cellules photovoltaïques

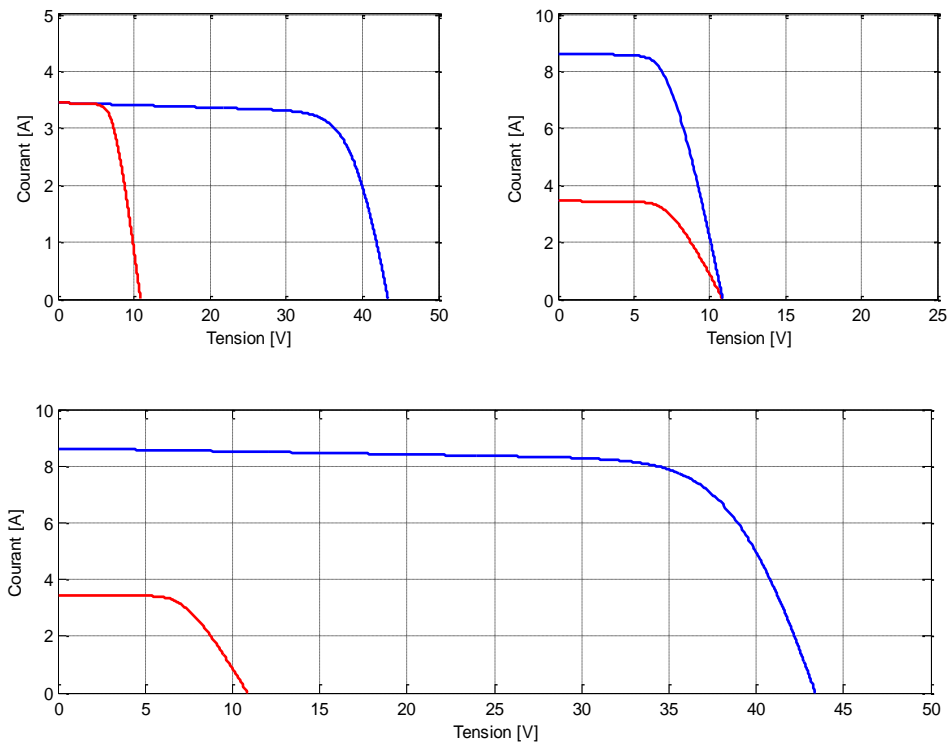
Dans le souci d'obtenir une tension élevée (utilisable), les cellules photovoltaïques sont connectées en série et sont traversées par le même courant sans pour autant qu'elles délivrent la même tension.

Par contre, pour obtenir un courant significatif, égale à la somme des courants produits, les cellules seront connectées en parallèle [3, 59].

Le courant et la tension de l'assemblage des cellules sont donnés par :

$$\begin{aligned} I &= \sum_{i=1}^{n_p} I_i \\ V &= \sum_{i=1}^{n_s} V_i \end{aligned} \quad (\text{II.17})$$

Une association hybride des cellules photovoltaïques est possible où la caractéristique de «  $n_s$  » cellules en série et ou «  $n_p$  » cellules en parallèle garde une allure générale semblable à celle d'une cellule élémentaire dans le cas où toutes les cellules reçoivent la même irradiation et sont soumises à la même température [3, 93].



**Figure (II.5) :** Caractéristique résultante d'un groupement de cellules identiques [3].

### II.3.5 Modélisation du générateur photovoltaïque

Selon les technologies, une cellule solaire élémentaire ne génère qu'une puissance inférieure à « 2 Watts » sous une tension comprise entre 0.5 et 1.5V. Pour que ce genre de générateur soit exploitable, il est nécessaire de connecter plusieurs cellules en série, pour augmenter la tension d'utilisation, et en parallèle, pour satisfaire le besoin en courant [15].

Des diverses études effectuées ont montré que le modèle à deux diodes est le plus proche de la réalité et présente des erreurs, relativement, faibles par rapport aux autres modèles étudiés. Le choix se portera sur ce modèle où les deux diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau [62].

Dans le cas où toutes les cellules utilisées sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, la figure (II.6) représente le schéma électrique équivalent du GPV [94].

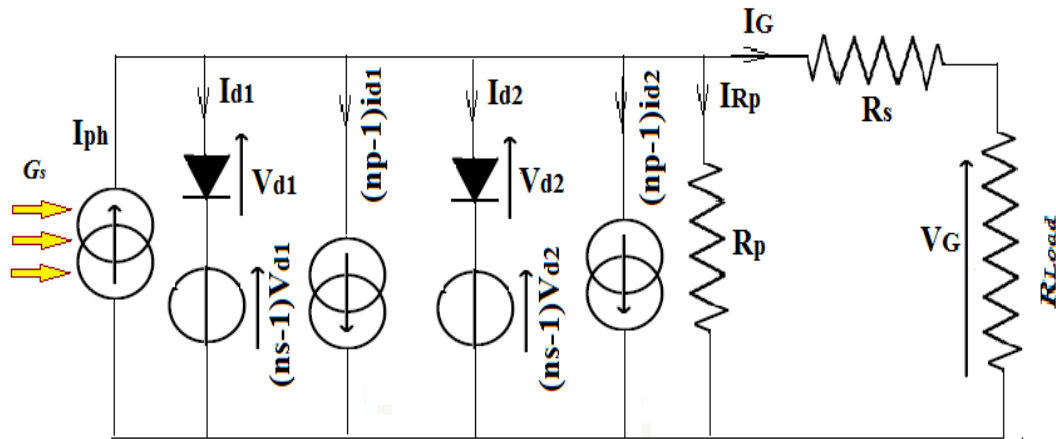


Figure (II.6) : Schéma électrique du « modèle à deux diodes » pour un groupe de panneaux [3].

Chaque groupe de panneaux nécessite un nombre «  $n_p$  » de branches en parallèles où chaque branche possède «  $n_s$  » cellules en série.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_G = n_s \cdot V \\ I_G = n_p \cdot I \\ I_{rp} = n_p \cdot i_{rp} \\ R_p = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_p \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_d = n_s \cdot v_d \\ I_d = n_p \cdot i_d \\ I_{ph} = n_p \cdot i_{ph} \\ R_s = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_s \end{array} \right. \quad (II.18)$$

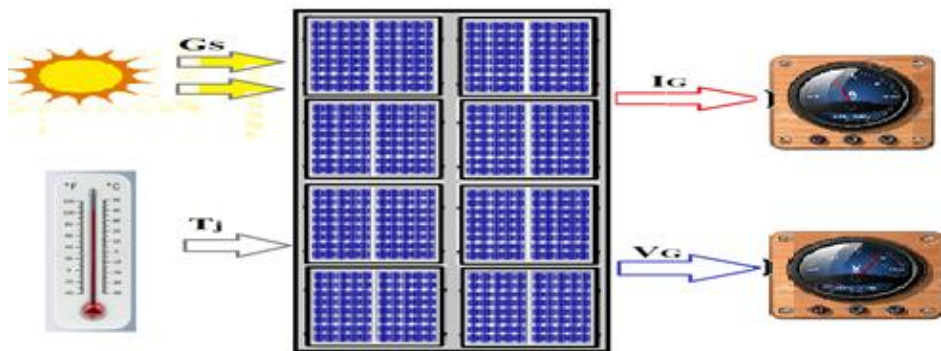


Figure (II.7) : Schéma Bloc du Générateur Photovoltaïque.

En ce qui concerne les courants, la relation existant entre une cellule et un générateur photovoltaïque n'est qu'une multiplication du dit courant par le nombre de cellules en parallèle «  $n_p$  » et pour les tensions, la multiplication se fera par le nombre de cellules en série «  $n_s$  » [3].

Le panneau, ainsi défini, peut être représenté par un quadripôle possédant deux variables d'entrées, à savoir l'ensoleillement  $G_s$  [ $W/m^2$ ] et la température de jonction des cellules  $T_j$  [ $^{\circ}C$ ], et deux variables de sortie, présentées par le courant fourni par le groupe de panneaux  $I_G$  [A] et par la tension délivrée par le groupe de panneaux  $V_G$  [V].

Le courant délivré par le panneau photovoltaïque est donné par la relation suivante [3] :

$$I_G = P_1 \times G_s \times \left[ 1 + P_2 \times (G_s - G_{sref}) + P_3 \times (T_j - T_{jref}) \right] - \frac{V_G + R_s \times I_G}{R_p} - \left[ P_4 \times T_j^3 \times \exp\left(-\frac{E_g}{K \times T_j}\right) \right] \times \left[ \exp\left(\frac{e(V_G + R_s \times I_G)}{A \times K \times T_j}\right) - 1 \right] - \left[ P_5 \times T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \times K \times T_j}\right) \right] \cdot \left[ \exp\left(\frac{e(V_G + R_s \times I_G)}{2 \times A \times K \times T_j}\right) - 1 \right] \quad (II.19)$$

### II.3.6 Convertisseur à pilotage MPPT

La non-linéarité de la caractéristique «  $I = f(V)$  » du GPV offre des puissances différentes pour le même éclairement.

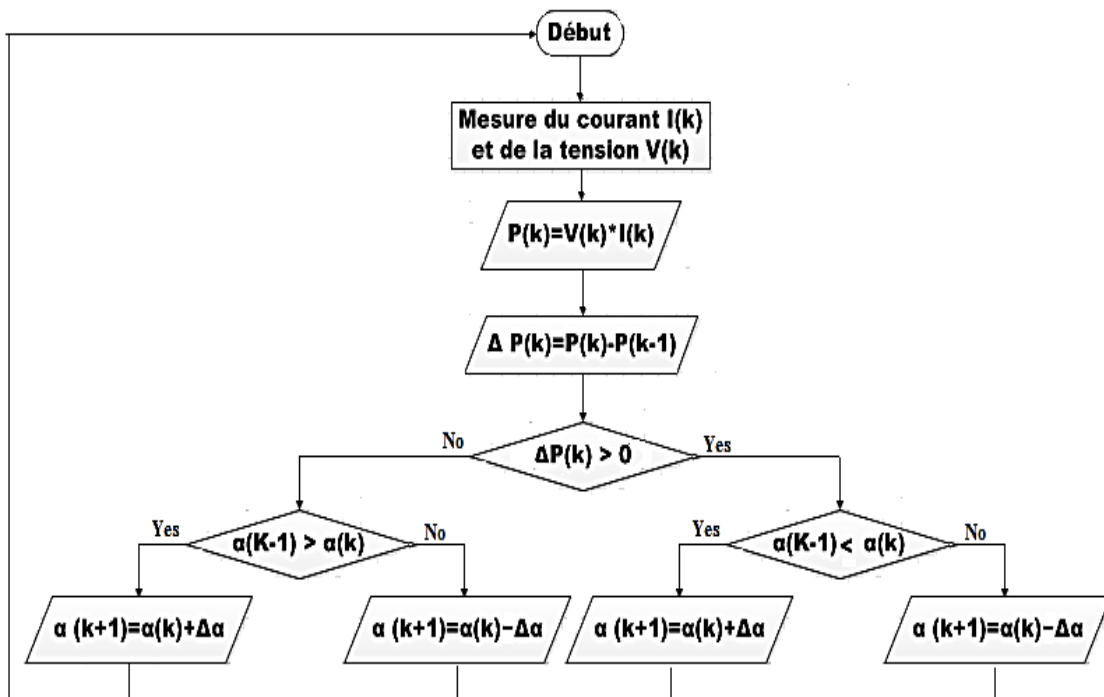


Figure (II.8) : Organigramme de l'algorithme « Perturbation et Observation » [3].

Le souci est donc d'offrir, à tout moment, le maximum de puissance à la charge grâce à un contrôleur MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » qui permet de piloter le convertisseur statique reliant la source à la charge et ayant comme objectif de suivre le point de puissance maximale.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour cette recherche du point de fonctionnement optimal, à l'instar de la méthode « Perturb and Observe » (P & O) qui s'avère être, sans doute, la plus simple [64].

Une méthode basée sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence  $V_{ref}$ , puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction du rapport cyclique du convertisseur (DC-DC). L'organigramme de la figure (II.8) résume la logique à suivre pour une recherche fructueuse de ce point [95].

Ainsi, le système adapte en permanence la tension aux bornes du générateur photovoltaïque afin de se rapprocher du point de puissance maximum, sans jamais l'atteindre précisément. Il est judicieux, par contre, de préciser que la technique « P & O » n'est pas tout à fait fiable, dans le cas d'une variation brusque de l'éclairement.

### II.3.7 Modélisation du hacheur Buck-Boost

Il est impératif de maintenir le rendement d'une conversion de puissance élevé, pour épargner le circuit électronique d'un excès d'échauffement.

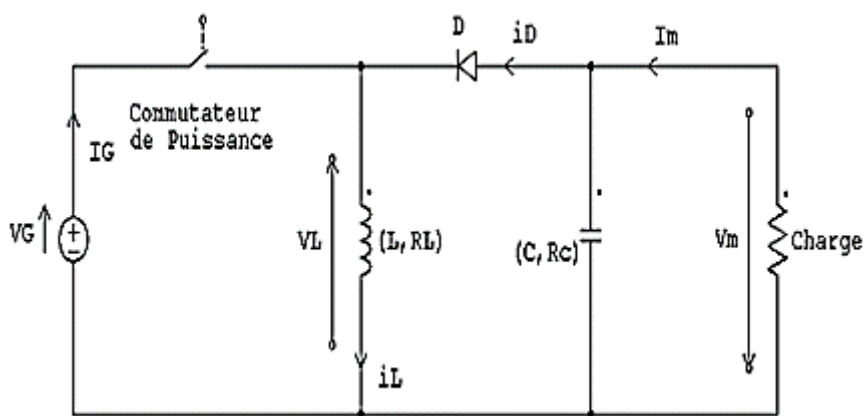


Figure (II.9) : Schéma du Hacheur Buck – Boost [3]

Le hacheur, fréquemment, utilisé dans les systèmes photovoltaïques est de type dévolteur-survolteur « Buck – Boost » qui fonctionne en Boost pour un ensoleillement faible et en Buck pour un ensoleillement conséquent [96].

Pour une période de hachage «  $T$  » et un rapport cyclique «  $\alpha$  », le commutateur est, d'abord, amorcé pendant une période «  $\alpha T$  » où la diode  $D$  est bloquée et l'inductance  $L$  emmagasine une certaine quantité d'énergie, le condensateur  $C$ , supposé préalablement chargé, alimente la charge. Le reste de la période, la diode conduit et le commutateur bloqué, l'inductance restitue l'énergie emmagasinée au condensateur et à la charge.

Le rapport cyclique «  $\alpha$  » ajuste la tension et le courant de sortie tel que [97] :

$$\left| \begin{array}{l} V_m = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \times V_G \\ I_m = \frac{1-\alpha}{\alpha} \times I_G \end{array} \right. \quad (\text{II.20})$$

Après introduction des paramètres réels du circuit, La relation devient :

$$V_m = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{R_L}{R} \times (1-\alpha)\right)} \times V_G \quad (\text{II.21})$$

Le modèle moyen du hacheur est alors donné par :

$$\left| \begin{array}{l} R_L \times i_L + L \times \frac{d}{dt} i_L = 2 \times \alpha \times V_G \\ i_c(t) = C \times \frac{d}{dt} V_c + \frac{(V_m - V_c)}{R_c} = (1-\alpha) \times i_L - \frac{V_m}{R} \end{array} \right. \quad (\text{II.22})$$

### II.3.8 Modélisation du filtre

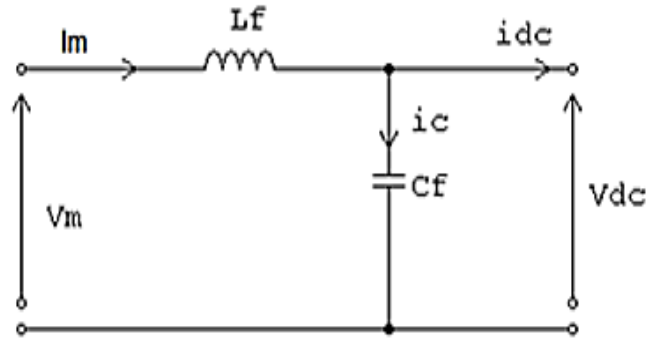


Figure (II.10) : Schéma du filtre passe-bas [3]

Pour venir à bout des hautes fréquences, il est nécessaire d'utiliser un filtre passe-bas « LC », représenté par la figure (II.10) [98].

La fréquence de coupure du filtre est :

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \sqrt{L_f \times C_f}} \quad (\text{II.23})$$

Les équations caractérisant le filtre sont comme suit :

$$\left| \begin{array}{l} V_m = L_f \times \frac{d}{dt} i_m + V_{dc} \\ \frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{1}{C_f (i_m - i_{dc})} \times V_m \end{array} \right. \quad (\text{II.24})$$

## II.4. Modélisation de la turbine de l'éolienne

### II.4.1 Puissance moyenne disponible du vent théoriquement récupérable

L'énergie cinétique en fonction de la masse et de la vitesse du vent est donnée par [27] :

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (\text{II.25})$$

L'air étant un gaz compressible, sa masse volumique notée «  $\rho_{\text{air}}$  [kg/m<sup>3</sup>] » est fonction de la pression, de la température et du taux d'humidité. En effet, si l'humidité est élevée la masse volumique diminue et l'air froid est plus dense que l'air chaud [29].

Pour de l'air sec sous pression atmosphérique normale et une température de 0°C, la masse volumique prend une valeur de 1,293 kg/m<sup>3</sup> et à 15°C une valeur de 1,225 kg/m<sup>3</sup> et à 20°C une valeur de 1,204 kg/m<sup>3</sup>. La puissance moyenne disponible contenue sous forme d'énergie cinétique associée à un déplacement d'une masse d'air disponible sur une surface S [m<sup>2</sup>] d'une éolienne est donnée par [99] :

$$P = \frac{1}{2} \times \rho_{\text{air}} \times S \times v^3 \quad (\text{II.26})$$

### II.4.2 Energie du vent réellement récupérable [Voir Annexe A1]

La puissance récupérable est donnée par :

$$P_{\text{recup}} = \frac{1}{2} \times \frac{16}{27} \times \rho \times S \times v_1^3 = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times S \times v_1^3 \quad (\text{II.27})$$

### II.4.3 Coefficient de puissance $C_p$ [Voir Annexe A2]

Pour une éolienne de petite puissance, l'équation analytique du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  est donnée par [100] :

$$C_p(\lambda) = 7,9563.10^{-5} \times \lambda^5 - 17,375.10^{-4} \times \lambda^4 - 9,86.10^{-3} \times \lambda^3 - 9,41.10^{-3} \times \lambda^2 + 6,38.10^{-2} \times \lambda + 0.001 \quad (\text{II.28})$$

### II.4.4 Puissance aérodynamique

Avec R[m] la longueur d'une pale, la puissance aérodynamique est donnée par [100] :

$$P_{\text{éol}} = \frac{1}{2} \times \rho \times \pi \times R^2 \times C_p(\lambda) \times v^3 \quad (\text{II.29})$$

### II.4.5 Couple de la turbine

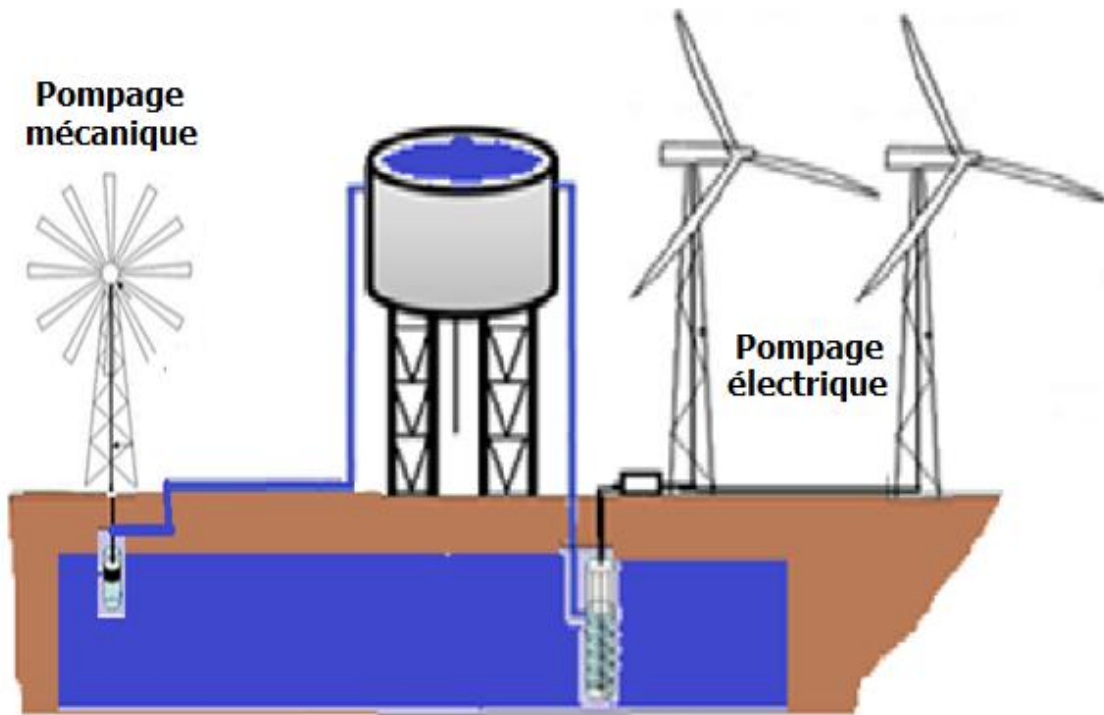
Le couple de la turbine sera donc [100] :

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = \frac{1}{2} \times \rho \times \pi \times R^3 \times C_p(\lambda) \times v^2 \quad (\text{II.30})$$

#### II.4.6 Pompage éolien

Le pompage éolien peut être mécanique, grâce à un système composé d'un rotor ayant une vingtaine de pales entraînant une pompe à piston plongée au fond d'un puits par un système de bielle-manivelle [101].

C'est un procédé qui convient assez bien pour les zones peu ventées, avec des besoins en eau journaliers n'excédant pas les 20 m<sup>3</sup> avec des profondeurs de puits ne dépassant pas les 50 m faute de quoi d'une rupture de la tringlerie de pompage [101].



*Figure II.11 : Schéma du pompage électrique et mécanique [101].*

Pour des puits profonds à grands débits, le pompage éolien électrique s'avère le plus adéquat pour les sites isolés et assez bien ventés, avec une compétitivité par rapport à d'autres sources d'énergie. L'utilisation de ces aérogénérateurs isolés sert surtout à alimenter des zones d'habitation ou des systèmes de télécommunication isolés [101].

#### II.4.7 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

Les éoliennes horizontales offrent un rendement meilleur grâce à leurs surfaces de pales qui sont plus importantes. L'éolienne verticale fonctionne même avec un vent faible et quel que soit sa direction, cependant elle offre des rendements plus faibles.

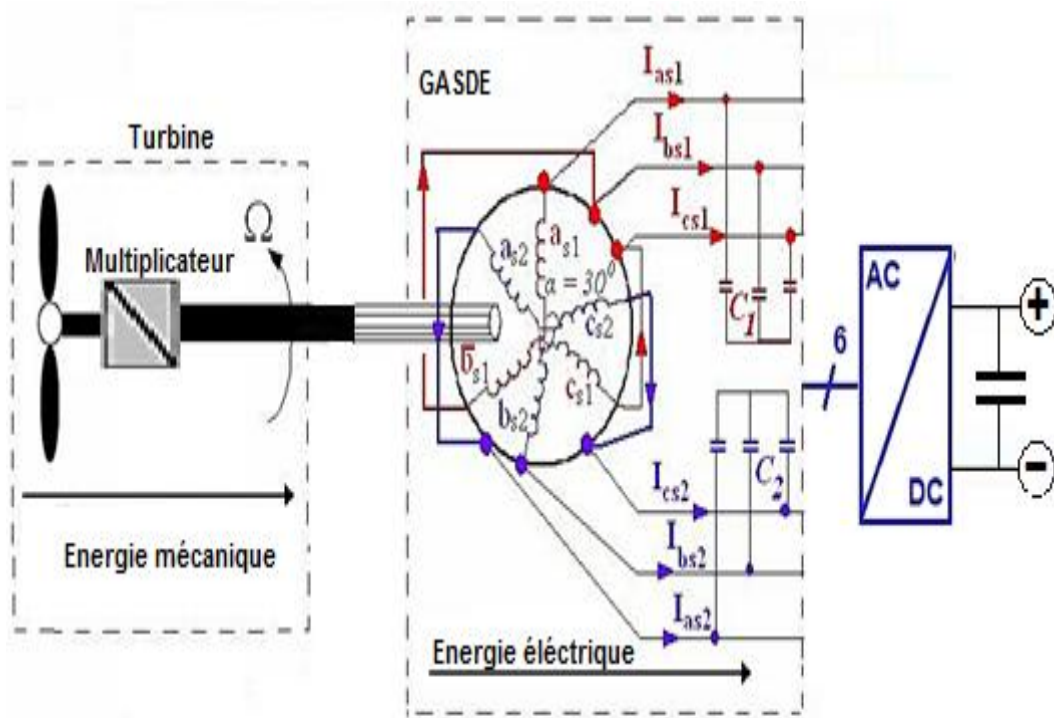
Le vent fait tourner la turbine qui capte une partie de l'énergie balayée par les pales et la transfère au moyeu fixé sur l'arbre de l'éolienne qui transmet ensuite l'énergie mécanique à la GASDE via un multiplicateur de vitesse.



## II.5 Modélisation du générateur asynchrone à double étoile (GASDE)

### II.5.1 Description de la GASDE

Du fait que la machine asynchrone à double étoile est réversible et est conçue dans ce cas pour fonctionner en mode générateur. Elle est désignée par GASDE diminutif du mot 'Générateur ASynchrone à Double Etoile'.



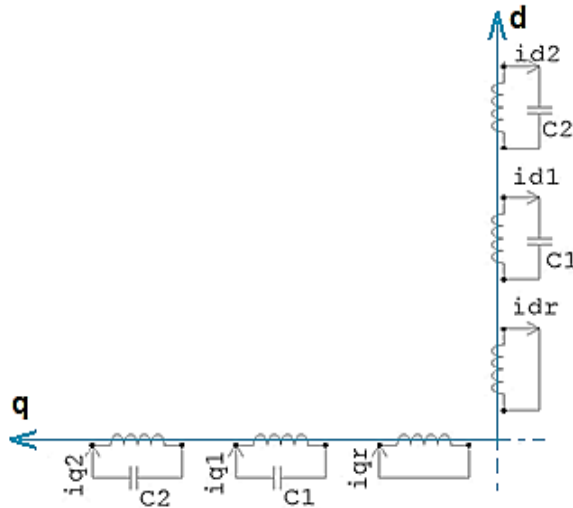
**Figure (II.12) :** Système de conversion éolienne basé sur la GASDE [101].

Outre le fait pour le fonctionnement générateur, il faudra entrainer le rotor de la machine à une vitesse de rotation  $N_r$  supérieure à la vitesse de synchronisme  $N_s$ , la conception de la GASDE est identique à celle de la MASDE.

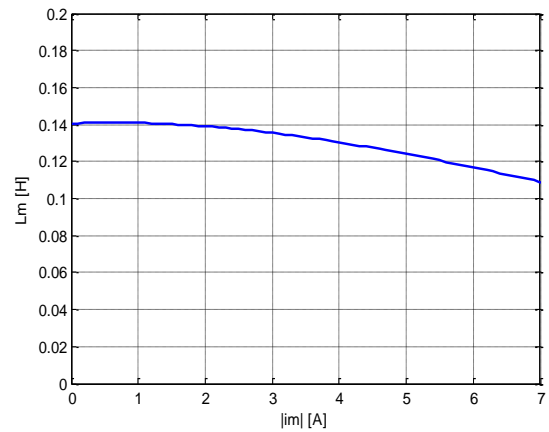
La GASDE est entraînée à une vitesse supérieure à celle de synchronisme et l'auto-amorçage de la génératrice est réalisé grâce à la présence d'un champ rémanent dans le fer rotorique et l'adjonction des batteries de condensateurs ayant des valeurs précises [102].

### II.5.2 Modèle biphasé lié au système d'axe « d, q »

Les équations de tensions et du flux sont obtenues en tenant compte des hypothèses simplificatrices (voir page 65) à l'exception de celle liée à la saturation du circuit magnétique. Cette dernière hypothèse est nécessaire, du fait que l'inductance de magnétisation est un facteur principal de la stabilisation de la tension générée sous les conditions de fonctionnement à vide ou en charge [103].



**Figure (II.13) :**  
Représentation des enroulements de la GASDE selon les axes « d,q » [104]



**Figure (II.14) :** Variation de l'inductance de magnétisation en fonction du module du courant de magnétisation [104]

### II.5.2.1 Courant de magnétisation

Les expressions du courant de magnétisation direct et en quadrature sont exprimées par [105, 106] :

$$\begin{aligned} I_{md} &= -i_{d1} - i_{d2} + i_{dr} \\ I_{mq} &= -i_{q1} - i_{q2} + i_{qr} \end{aligned} \quad (II.31)$$

Par le calcul du module, l'expression du courant de magnétisation peut être exprimée par :

$$i_m = \sqrt{I_{md}^2 + I_{mq}^2} = \sqrt{(-i_{d1} - i_{d2} + i_{dr})^2 + (-i_{q1} - i_{q2} + i_{qr})^2} \quad (II.32)$$

### II.5.2.2 Diverses inductances

Le tableau (II.1) résume toutes les inductances utilisées dans le calcul des diverses grandeurs.

**Tableau (II.1) :** Diverses inductances

$L_r$	Inductance de fuite rotorique	$L_{md}$	Inductance cyclique de saturation
$L_1$	Inductance de fuite du stator 1	$L_{mq}$	Inductance cyclique de saturation
$L_2$	Inductance de fuite du stator 2	$L_m$	Inductance de magnétisation
$L_{dq}$	Inductance cyclique d'inter saturation	$L$	Inductance dynamique
$L_{d1}, L_{d2}, L_{q1}, L_{q2}$	Inductance cyclique totale statorique	$L_{rd}, L_{rq}$	Inductance cyclique totale rotorique

**a) Inductance de magnétisation**

La variation de l'inductance de la magnétisation est représentée en fonction du courant de magnétisation  $i_m$  par la figure (II.14).

L'inductance de magnétisation est obtenue d'une manière expérimentale et l'expression de l'approximation polynomiale d'interpolation est donnée par [107, 108] :

$$L_m = 0.1406 + 0.0014 \times i_m - 0.0012 \times i_m^2 + 0.00005 \times i_m^3 \quad (II.33)$$

**b) inductances cycliques de saturation**

Les inductances cycliques de saturation sont données par [109, 110, 111] :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{md} = L_m + \frac{i_{md}}{i_{mq}} \times L_{dq} \\ L_{mq} = L_m + \frac{i_{mq}}{i_{md}} \times L_{dq} \end{array} \right. \quad (II.34)$$

**c) inductances cycliques totales**

Les inductances cycliques totales statoriques et rotoriques selon les axes, direct et en quadrature sont exprimées par [112, 113] :

$$\text{Rotor: } \left\{ \begin{array}{l} L_{rd} = L_1 + L_{md} \\ L_{rq} = L_1 + L_{mq} \end{array} \right. \quad (II.35)$$

$$\text{Stator: } \left\{ \begin{array}{l} L_{d1} = L_1 + L_{md} \\ L_{q1} = L_1 + L_{mq} \\ L_{d2} = L_2 + L_{md} \\ L_{q2} = L_2 + L_{mq} \end{array} \right. \quad (II.36)$$

**d) Inductances cycliques d'inter saturation**

L'inductance cyclique d'inter saturation est donnée par [110, 114, 115] :

$$L_{dq} = \frac{i_{md} \times i_{mq}}{|i_m|} \times \frac{dL_m}{d|i_m|} = \frac{i_{md} \times i_{mq}}{|i_m|^2} \times (L - L_m) \quad (II.37)$$

**e) Inductance dynamique**

Inductance dynamique est définie comme étant la dérivée du flux de magnétisation par rapport au courant de magnétisation et est donnée par :

$$L = \frac{d|\overline{\phi}_m|}{d|i_m|} \quad (II.38)$$

Sous les conditions magnétiques linéaires, il en découle à partir des équations (II.34), (II.35) et (II.36) [116, 117] :

$$L_{dq} = 0, \quad L_{md} = L_{mq} = L_m, \quad L_{d1} = L_{q1}, \quad L_{d2} = L_{q2} \quad \text{et} \quad L_{rd} = L_{rq}.$$

### II.5.2.3 Couple électromagnétique

Comme pour le développement, en ce qui concerne la MASDE (voir page 74), le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = p \times \frac{L_m}{L_r + L_m} [\varphi_{dr}(i_{q1} + i_{q2}) - \varphi_{qr}(i_{d1} + i_{d2})] \quad (II.39)$$

Et le mouvement du rotor peut être régi par l'équation mécanique suivante :

$$C_{em} = J \times \frac{d\Omega}{dt} + f_r \times \Omega + C_r \quad (II.40)$$

### II.5.2.4 Equations électriques

Les systèmes d'équations différentielles de la GASDE selon le référentiel « d,q » sont donnés par les équations électriques suivantes :

a) **Rotor :**

$$\begin{cases} v_{dr} = r_r i_{dr} + p\varphi_{dr} - (\omega_s - \omega_r)\varphi_{qr} = 0 \\ v_{qr} = r_r i_{qr} + p\varphi_{qr} + (\omega_s - \omega_r)\varphi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (II.41)$$

b) **Stator 1 et 2 :**

$$\begin{cases} v_{d1} = -r_1 i_{d1} + p\varphi_{d1} - \omega_s \varphi_{q1} \\ v_{q1} = -r_1 i_{q1} + p\varphi_{q1} + \omega_s \varphi_{d1} \\ v_{d2} = -r_2 i_{d2} + p\varphi_{d2} - \omega_s \varphi_{q2} \\ v_{q2} = -r_2 i_{q2} + p\varphi_{q2} + \omega_s \varphi_{d2} \end{cases} \quad (II.42)$$

### II.5.2.5 Flux rotoriques et statoriques

Le flux rotorique et le flux statorique selon le référentiel « d, q » sont donnés par [114] :

a) **Rotor**

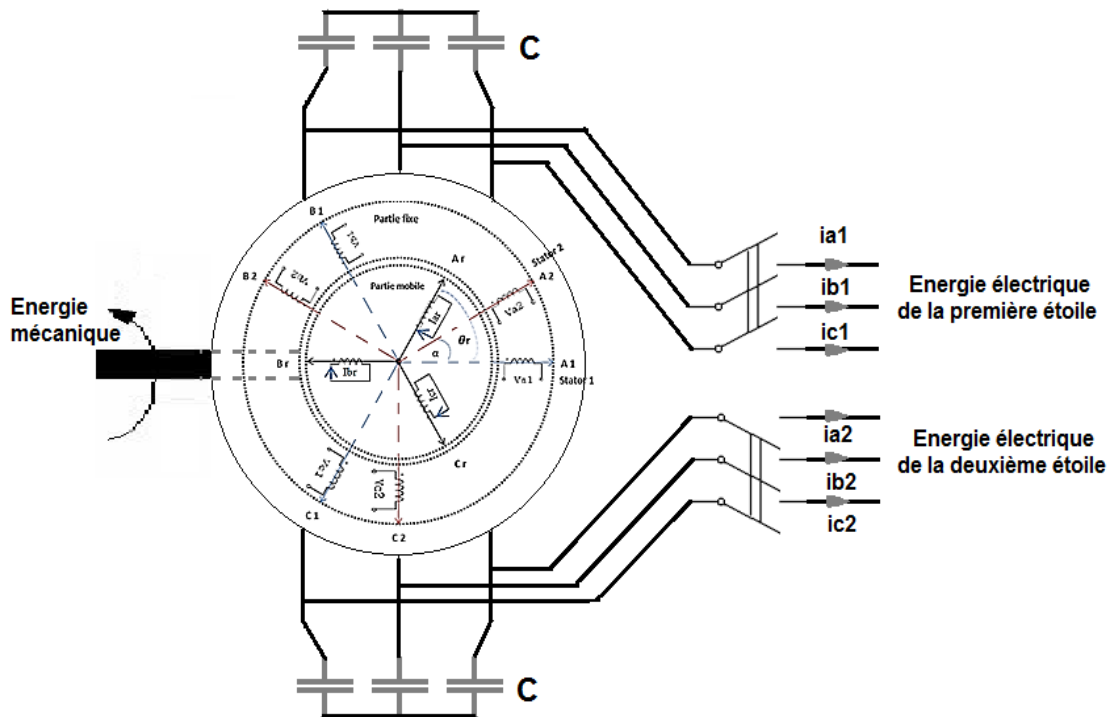
$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_{md}(-i_{d1} - i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_{mq}(-i_{q1} - i_{q2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (II.43)$$

b) **Stator 1 et 2**

$$\begin{cases} \varphi_{d1} = -L_1 i_{d1} - L_m(i_{d1} + i_{d2}) - L_{dq} i_{q2} + L_{md}(-i_{d1} - i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{q1} = -L_1 i_{q1} - L_m(i_{q1} + i_{q2}) + L_{dq} i_{d2} + L_{mq}(-i_{q1} - i_{q2} + i_{qr}) \\ \varphi_{d2} = -L_2 i_{d2} - L_m(i_{d1} + i_{d2}) + L_{dq} i_{q1} + L_{md}(-i_{d1} - i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{q2} = -L_2 i_{q2} - L_m(i_{q1} + i_{q2}) - L_{dq} i_{d1} + L_{mq}(-i_{q1} - i_{q2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (II.44)$$

### II.5.3 Auto-amorçage de la GASDE

Les deux étoiles du stator doivent être forcément reliées au réseau ou bien connectées à des condensateurs dans le cas de fonctionnement autonome car c'est la condition nécessaire pour renforcer le champ magnétique rémanent nécessaire pour magnétiser la machine et générer ainsi des courants rotoriques.



**Figure (II.15) :**  
*Schéma d'un système de conversion d'énergie à base de la GASDE*

Dans notre cas de fonctionnement autonome, une batterie de condensateurs correctement dimensionnée est connectée aux bornes des deux stators.

Quand le rotor de la GASDE tourne à une vitesse supérieure à celle du synchronisme où le couple change de sens « fonctionnement hyper-synchrone » et en présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor, une f.é.m. de petite valeur apparaît aux bornes des bobinages des deux étoiles du stator.

Cette f.é.m. induite augmente grâce à la présence des condensateurs qui fournissent le courant d'excitation requis par la génératrice qui recharge les condensateurs pour augmenter la tension de sortie (fig. II.16).

Cette réaction cyclique permet à la génératrice d'atteindre un régime permanent situé dans la zone de saturation. Lorsque le point de fonctionnement est atteint, la machine délivre une tension aux stators dont la valeur efficace est constante, si l'inductance magnétisante est

considérée comme constante est égale à sa valeur en régime non saturé et si la caractéristique de magnétisation ne présente alors pas de coude de saturation et il n'y a pas d'intersection avec la caractéristique externe du condensateur, l'auto amorçage est alors possible mais la tension statorique augmente alors jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie.

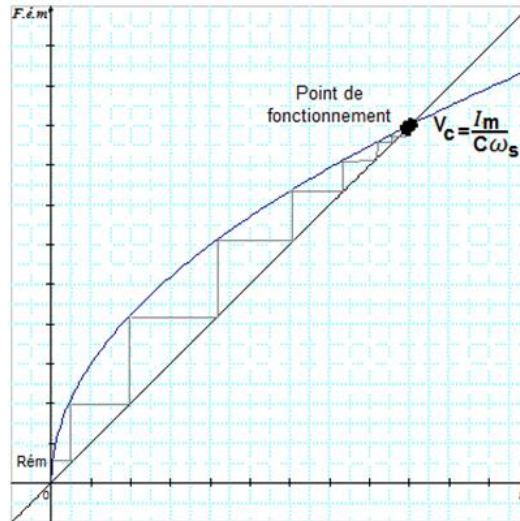


Figure (II.16) : Auto-amorçage de la génératrice asynchrone à double étoile

### II.5.3.1 Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage

Le calcul de la capacité nécessaire pour générer une tension donnée peut s'effectuer à partir du schéma électrique équivalent de la machine débitant sur un banc de capacités.

L'auto-amorçage de la GASDE, ne peut avoir lieu que si la puissance apparente qu'elle produit correspond à celle qu'elle absorbe, c'est la raison pour laquelle des capacités d'excitation sont introduites dans le montage [117].

La condition nécessaire pour l'auto-amorçage est [109, 115, 117] :

$$L_s \times C \times \omega_s^2 > 1 \quad \text{d'où} \quad C > \frac{1}{L_s \times \omega_s^2} \quad (\text{II.45})$$

Les grandeurs des condensateurs sont limitées par un minimum et un maximum tel que  $C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$  [118].

Pour un fonctionnement à vide, c'est-à-dire un glissement presque nul, la vitesse de rotation est très proche de la vitesse de synchronisme, d'où :

$$C_{\min} = \frac{1}{L_s \times \omega_f^2} \quad (\text{II.46})$$

Les démarches effectuées pour une génératrice asynchrone à cage classique sont effectuées pour la GASDE avec les mêmes conditions.

Pratiquement, seule la valeur de  $C_{\min}$  est importante et au-delà de  $C_{\max}$ , le fonctionnement devient instable [117].

### II.5.3.2 Modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE

Les condensateurs sont montés en étoile aux bornes des deux étoiles constituant le stator de la GASDE et les équations électriques les régissant sont :

$$\begin{cases} v_{d1} = \frac{1}{p} (\dot{i}_{dc1}/C_1 + \omega_s \times v_{q1}) \\ v_{q1} = \frac{1}{p} (\dot{i}_{qc1}/C_1 - \omega_s \times v_{d1}) \\ v_{d2} = \frac{1}{p} (\dot{i}_{dc2}/C_2 + \omega_s \times v_{q2}) \\ v_{q2} = \frac{1}{p} (\dot{i}_{qc2}/C_2 - \omega_s \times v_{d2}) \end{cases} \quad (II.47)$$

### II.5.3.3 Modélisation des charges

Pour mettre en évidence l'influence des déphasages, l'étude de cette génératrice se fera pour une charge résistive puis pour une charge inductive.

#### II.5.3.3.1 Charge purement résistive

La charge équilibrée est constituée de deux jeux de trois résistances identiques connectées en étoile mise en parallèle avec les condensateurs des deux étoiles de la GASDE et la figure (II.17) représente l'équivalence de cette charge dans les axes fictifs d et q [101].

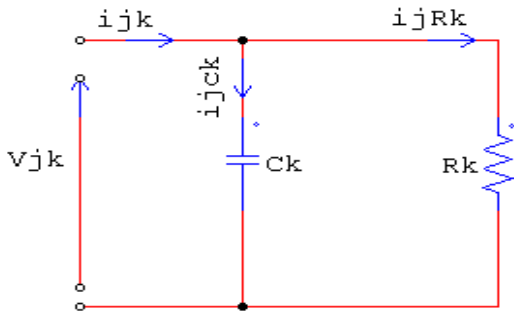


Figure (II.17) : Connexion de la charge résistive selon les axes fictifs ( $j=d,q - k=1,2$ )

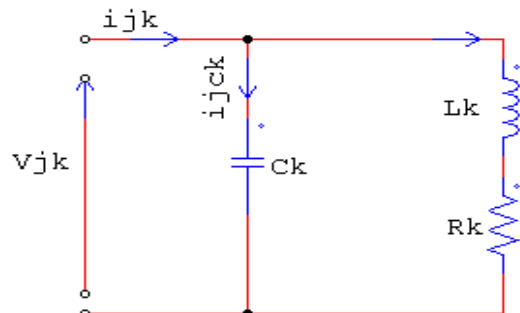


Figure (II.18) : Connexion de la charge inductive selon les axes fictifs ( $j=d,q - k=1,2$ )

$$\begin{cases} v_{d1} = \frac{1}{p \times C_1} \left( i_{d1} - \frac{v_{d1}}{R_1} \right) + \frac{1}{p} \omega_s \times v_{q1} \\ v_{q1} = \frac{1}{p \times C_1} \left( i_{q1} - \frac{v_{q1}}{R_1} \right) - \frac{1}{p} \omega_s \times v_{d1} \\ v_{d2} = \frac{1}{p \times C_2} \left( i_{d2} - \frac{v_{d2}}{R_2} \right) + \frac{1}{p} \omega_s \times v_{q2} \\ v_{q2} = \frac{1}{p \times C_2} \left( i_{q2} - \frac{v_{q2}}{R_2} \right) - \frac{1}{p} \omega_s \times v_{d2} \end{cases} \quad (II.48)$$

Les tensions directes et en quadrature de l'équation (II.48) sont obtenues par utilisation de la loi des nœuds et en remplaçant le résultat trouvé dans l'équation (II.47).

### II.5.3.3.2 Charge inductive

La charge équilibrée est constituée de deux jeux de trois circuits RL identiques connectés en étoile mis en parallèle avec les condensateurs des deux étoiles de la GASDE et la figure (II.18) représente l'équivalence de cette charge dans les axes fictifs d et q [102].

$$\begin{cases} v_{d1} = \frac{1}{P} ((i_{d1} - i_{dL1})/C_1 + \omega_s \times v_{q1}) \\ v_{q1} = \frac{1}{P} ((i_{q1} - i_{qL1})/C_1 - \omega_s \times v_{d1}) \\ v_{d2} = \frac{1}{P} ((i_{d2} - i_{dL2})/C_2 + \omega_s \times v_{q2}) \\ v_{q2} = \frac{1}{P} ((i_{q2} - i_{qL2})/C_2 - \omega_s \times v_{d2}) \end{cases} \quad (II.49)$$

Les tensions dans les repères fictifs sont données par les équations (II.49), par contre les courants sont donnés par :

$$\begin{cases} i_{dL1} = \frac{1}{P} ((v_{d1} - R_1 \times i_{dL1})/L_1 + \omega_s \times i_{qL1}) \\ i_{qL1} = \frac{1}{P} ((v_{q1} - R_1 \times i_{qL1})/L_1 - \omega_s \times i_{dL1}) \\ i_{dL2} = \frac{1}{P} ((v_{d2} - R_2 \times i_{dL2})/L_2 + \omega_s \times i_{qL2}) \\ i_{qL2} = \frac{1}{P} ((v_{q2} - R_2 \times i_{qL2})/L_2 - \omega_s \times i_{dL2}) \end{cases} \quad (II.50)$$

## II.6 Modélisation de la pile à combustible

### II.6.1 Le choix de la pile à combustible

Le choix se porte sur la technologie PEMFC pour sa température basse de fonctionnement ne dépassant pas les 100°C et pour son démarrage assez rapide et une évacuation facile de la chaleur.

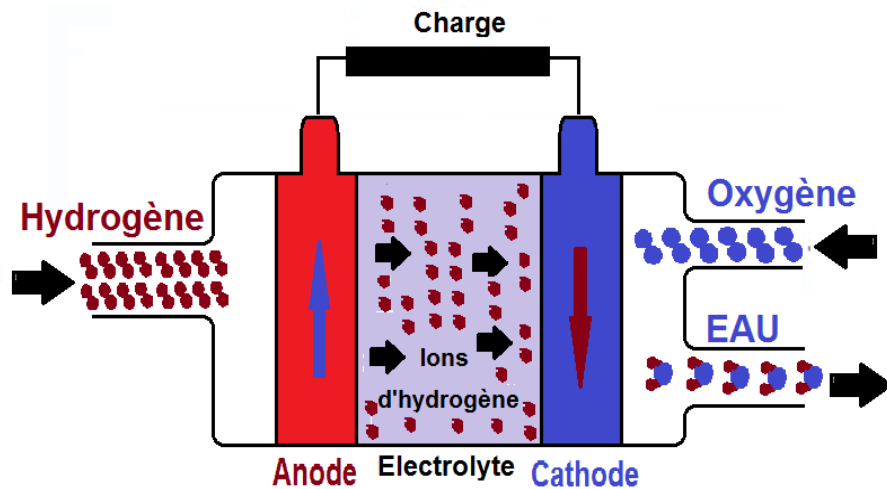


Figure II.19 : Pile à combustible à membrane échangeuse de protons "PEMFC" [47].



Contrairement à la filière alcaline, la PEMFC est insensible à la présence du CO<sub>2</sub> dans l'air et ayant un électrolyte solide assurant des durées de vie supérieures par rapport aux piles à électrolyte liquide [48].

La PEMFC ou pile à hydrogène utilise de l'hydrogène comme combustible, et de l'oxygène comme comburant, généralement prélevé dans l'air ambiant.

L'hydrogène utilisé est soit stocké dans des bouteilles de gaz comprimé ou dans des hydrures métalliques ou soit produit par reformage à l'eau de différents combustibles [48].

### II.6.2 Modèle de tension d'une PAC

Pour décrire les réactions chimiques aux niveaux de l'anode et de la cathode de la PAC, plusieurs modèles existent dans la littérature, notamment celui de l'évolution de la tension qui combine les modèles empiriques avec les lois élémentaires [49].

En effet, les équations de Maxwell modélisent le transport de la matière, celle de Nernst, les potentiels d'équilibre thermodynamique et les équations de Tafel prennent en charge les surtensions d'activation. La résistance interne est déterminée par les équations de Nernst-Planck [49].

#### II.6.2.1 Circuit électrique équivalent

Le comportement dynamique de la pile à combustible peut être résumé ou représenté par le circuit électrique équivalent suivant [47, 53, 54] :

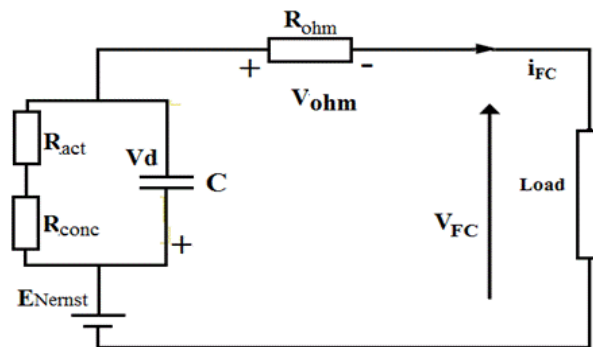


Figure II.20 : Schéma électrique dynamique équivalent d'une pile à combustible [47].

#### II.6.2.2 Tension de Nernst

$E_{\text{Nernst}}$ , dite tension réversible, est le potentiel d'équilibre thermodynamique défini en utilisant l'équation de Nernst [119] tel que :

$$E_{\text{Nernst}} = \frac{\Delta G}{2F} - \frac{\Delta S}{2F}(T - T_{\text{ref}}) + \frac{R \times T}{2F} \left[ \ln(\text{PH}_2) + \frac{1}{2} \ln(\text{PO}_2) \right] \quad (\text{II.51})$$

Pour les valeurs standards de la température et de la pression, l'équation peut être écrite comme suit :

$$E_{\text{Nernst}} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5}T \left[ \ln(\text{PH}_2) + \frac{1}{2}\ln(\text{PO}_2) \right] \quad (\text{II.52})$$

La température de la membrane et les pressions partielles du gaz varient proportionnellement en fonction du courant, par contre les pressions d'hydrogène et de l'oxygène varient inversement avec les variations du courant [45, 120].

### II.6.2.3 Pertes d'activation

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques aux niveaux des deux électrodes de la pile où une partie de l'énergie est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques.

L'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode, il se résulte que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques [45, 47, 121].

L'écart de la tension d'activation représenté par la résistance  $R_{\text{act}}$  dans le circuit électrique équivalent figure (II.22) est donné par l'équation de TAFEL [47] :

$$V_{\text{act}} = A \times \ln \left( \frac{I_{\text{FC}} + I_{\text{n}}}{i_0} \right) \quad (\text{II.53})$$

### II.6.2.4 Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques caractérisent la résistance qu'opposent les plaques bipolaires à la circulation des électrons ainsi que celle de l'électrolyte au passage des protons.

La chute de tension causée par les pertes ohmiques est donnée par [45, 122] :

$$V_{\text{ohm}} = R_{\text{m}} \times (I_{\text{FC}} + I_{\text{n}}) \quad (\text{II.54})$$

### II.6.2.5 Pertes de concentration

La tension de concentration représentée par la résistance  $R_{\text{con}}$  est causée par l'effet de la double couche de charge. Sachant que ce phénomène apparaît quand il y a une accumulation de charges entre deux matériaux différents qui sont en contact direct. La couche de charge dans l'interface électrode/électrolyte se comporte comme un condensateur.

Les pertes de concentration sont données par l'expression suivante [45, 124] :

$$V_{\text{conc}} = -B \times \ln \left( 1 - \frac{I_{\text{FC}} + I_{\text{n}}}{I_{\text{L}}} \right) \quad (\text{II.55})$$

### II.6.2.6 Potentiel réel global d'une pile à combustible

Le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, est donné par [45, 124] :

$$U_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (II.56)$$

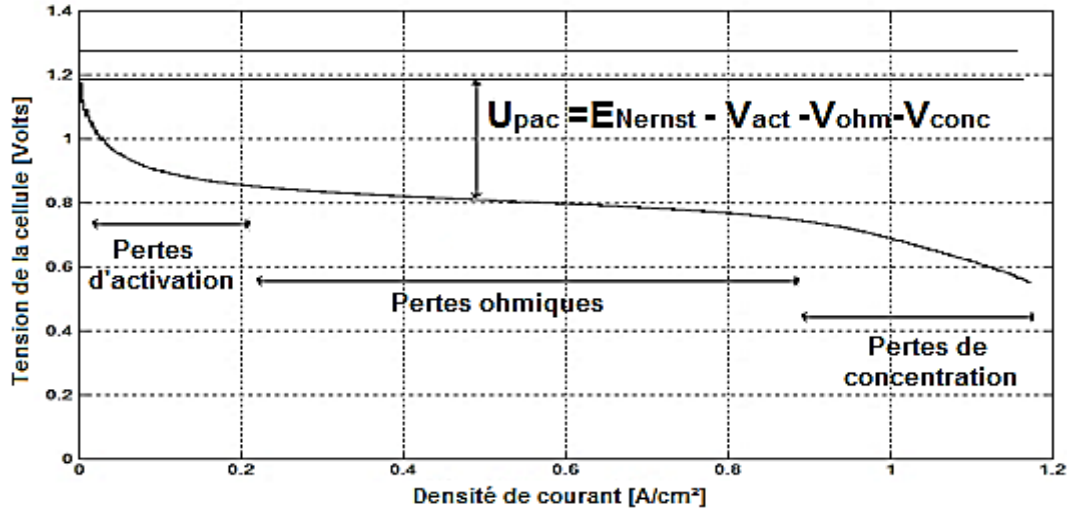


Figure II.21 : Polarisation d'une cellule PEM fuel Cell [125, 126].

Donc le potentiel réel global de la PEMFC devient [47, 49] :

$$\begin{aligned}
 U_{FC} = & 0.2817 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + B \left( 1 - \frac{J}{J_{max}} \right) - 1,93 \cdot 10^{-4} \ln[I_{FC}] \\
 & + 4.308 \cdot 10^{-5} \cdot T \left[ \ln \left( \frac{3}{4} \cdot P_{ano} \right) + \frac{1}{2} \cdot \ln \left( \frac{1}{2} \cdot P_{cat} \right) \right] \\
 & + \left[ 2.86 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln A + 4.3 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \left[ \frac{0,75 \cdot P_{ano}}{1,09 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{77}{T}\right)} \right] \right] \\
 & + 7.6 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \ln \left[ \frac{0,5 \cdot P_{cat}}{5,08 \cdot 10^{-6} \cdot \exp\left(-\frac{498}{T}\right)} \right] \\
 & - I_{FC} \cdot \left[ R_c + \frac{181,6 \left[ 1 + 0,03 \left( \frac{I_{FC}}{A} \right) + 0,062 \left( \frac{T}{303} \right)^2 \left( \frac{I_{FC}}{A} \right)^{2,5} \right]}{A \cdot \left[ \frac{\lambda_{H_2O}}{SO_3} - 0,638 - 3 \left( \frac{I_{FC}}{A} \right) \right] \exp \left[ 4,18 \left[ \frac{T-303}{T} \right] \right]} \right]
 \end{aligned} \quad (II.57)$$

L'accroissement de la température accélère les réactions chimiques et induit une diminution des pertes d'activation et des pertes ohmiques par contre les pertes de concentration sont constantes, ce qui entraîne l'augmentation de la puissance fournie [47].

L'augmentation des pressions provoque une élévation de la tension et de la puissance aux bornes de la pile due seulement à l'augmentation des pertes d'activation.

## II.7 Modélisation du moteur asynchrone à double étoile (MASDE)

### II.7.1 Description du MASDE

Pour un fonctionnement moteur (MASDE), un intérêt distinctif est porté à la machine asynchrone à double étoile grâce aux avantages multiples qu'elle offre, entre autre, la segmentation de puissance.

Le MASDE se compose d'un rotor mobile à cage d'écureuil, composé de barres conductrices en aluminium dont les extrémités sont court-circuitées, déphasé d'un angle «  $\theta_r$  » par rapport à la première étoile et de deux stators fixes déphasés d'un angle «  $\alpha = \frac{\pi}{6}$  ».

Les enroulements du stator sont alimentés par deux sources de tensions triphasées à fréquence et amplitude égales, déphasées entre elles d'un même angle «  $\alpha$  » [87, 127].

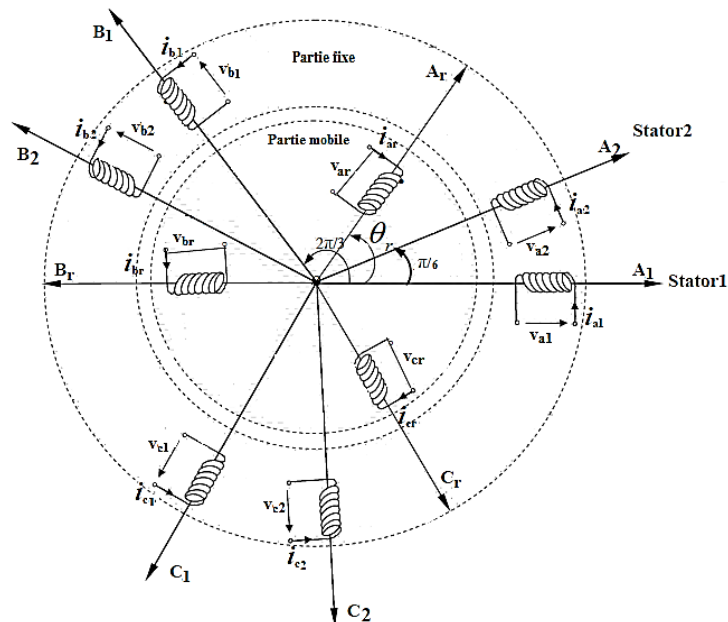


Figure (II.22) : Représentation des enroulements de la MASDE [3]

### II.7.2 Modèle du MASDE

La géométrie, la répartition des enroulements ainsi que les phénomènes difficiles à modéliser rendent l'étude de cet actionneur ardue. En vue d'alléger la formulation mathématique de ce modèle, quelques hypothèses simplificatrices, dont l'effet est considéré comme négligeable, sont prises en compte pour cette étude.

Ainsi, il est acceptable d'opter pour une machine de constitution symétrique ayant un entrefer d'épaisseur uniforme dont la saturation du circuit magnétique et les pertes causées par courants de Foucault et par hystérésis soient négligeables [128, 129, 130, 131, 132].

Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des intensités de courant, dont leur densité est uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, ainsi la force magnétomotrice créée est considérée à répartition sinusoïdale [3, 109, 133].

### II.7.2.1 Equations des tensions de la machine

La loi d'Ohm combinée à la loi de Lenz permet d'écrire les équations électriques de la MASDE comme suit [3, 134] :

$$\text{Equation de l'étoile 1 : } \begin{bmatrix} v_{a1} \\ v_{b1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{a1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{b1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{c1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{a1} \\ \varphi_{b1} \\ \varphi_{c1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.58})$$

$$\text{Equation de l'étoile 2 : } \begin{bmatrix} v_{a2} \\ v_{b2} \\ v_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{a2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{b2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{c2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{a2} \\ \varphi_{b2} \\ \varphi_{c2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.59})$$

$$\text{Equation du rotor : } \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.60})$$

### II.7.2.2. Expressions des flux magnétiques de la machine

La matrice suivante exprime la relation entre les flux et les courants tels que [134, 135, 136] :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{s1, abc} \\ \varphi_{s2, abc} \\ \varphi_r, abc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1, abc} \\ i_{s2, abc} \\ i_r, abc \end{bmatrix} \quad (\text{II.61})$$

En tenant compte de l'hypothèse simplificatrice usuelle de la représentation sinusoïdale des forces magnétomotrices, nous pouvons écrire :

$$\text{Matrice inductance de l'étoile 1 : } [L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{s1} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$\text{Matrice inductance de l'étoile 2 : } [L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{s2} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$\text{Matrice inductance du rotor : } [L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} & -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & L_r + L_{mr} & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 & L_r + L_{mr} \end{bmatrix}$$

Matrice inductance mutuelle entre les deux étoiles du stator :

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

Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et le rotor :

$$[L_{s1,r}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 4\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 4\pi/3) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 4\pi/3) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 2 et le rotor :

$$[L_{s2,r}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \alpha) & \cos(\theta_r - \alpha + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - \alpha + 4\pi/3) \\ \cos(\theta_r - \alpha + 4\pi/3) & \cos(\theta_r - \alpha) & \cos(\theta_r - \alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r - \alpha + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - \alpha + 4\pi/3) & \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix}$$

Il faudra noter que :  $[L_{s2,s1}] = [L_{s1,s2}]^t$ ;  $[L_{r,s1}] = [L_{s1,r}]^t$ ;  $[L_{r,s2}] = [L_{s2,r}]^t$ .

$L_{s1}$ ,  $L_{s2}$  et  $L_r$ : Inductances propres du 1<sup>er</sup> et du 2<sup>eme</sup> stator et du rotor respectivement.

$L_{ms}$  et  $L_{mr}$ : Valeurs maximales des coefficients d'inductance mutuelle statorique et rotorique.

$L_{sr}$  : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre l'une des étoiles du stator et le rotor.

### II.7.2.3 Equation des flux magnétiques développée du MASDE

L'équation (II.62) résume la relation entre les différents flux et les divers courants de la machine avec  $M_{xy}$  représentant l'inductance mutuelle entre la bobine x et la bobine y tel que x et y peuvent être "a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>r</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>r</sub>, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub> et c<sub>r</sub>".

$$\begin{bmatrix} \varphi_{a1} \\ \varphi_{b1} \\ \varphi_{c1} \\ \varphi_{a2} \\ \varphi_{b2} \\ \varphi_{c2} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{a1a1} & M_{a1b1} & M_{a1c1} & M_{a1a2} & M_{a1b2} & M_{a1c2} & M_{a1ar} & M_{a1br} & M_{a1cr} \\ M_{b1a1} & L_{b1b1} & M_{b1c1} & M_{b1a2} & M_{b1b2} & M_{b1c2} & M_{b1ar} & M_{b1br} & M_{b1cr} \\ M_{c1a1} & M_{c1b1} & L_{c1c1} & M_{c1a2} & M_{c1b2} & M_{c1c2} & M_{c1ar} & M_{c1br} & M_{c1cr} \\ M_{a2a1} & M_{a2b1} & M_{a2c1} & L_{a2a2} & M_{a2b2} & M_{a2c2} & M_{a2ar} & M_{a2br} & M_{a2cr} \\ M_{b2a1} & M_{b2b1} & M_{b2c1} & M_{b2a2} & L_{b2b2} & M_{b2c2} & M_{b2ar} & M_{b2br} & M_{b2cr} \\ M_{c2a1} & M_{c2b1} & M_{c2c1} & M_{c2a2} & M_{c2b2} & L_{c2c2} & M_{c2ar} & M_{c2br} & M_{c2cr} \\ M_{ara1} & M_{arb1} & M_{arc1} & M_{ara2} & M_{arb2} & M_{arc2} & L_{arar} & M_{arbr} & M_{arcr} \\ M_{bra1} & M_{brb1} & M_{brc1} & M_{bra2} & M_{brb2} & M_{brc2} & M_{brar} & L_{brbr} & M_{brcr} \\ M_{cra1} & M_{crb1} & M_{crc1} & M_{cra2} & M_{crb2} & M_{crc2} & M_{cra2} & M_{crbr} & L_{crcr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (II.62)$$

### II.7.2.4 Energie magnétique

L'expression de l'énergie magnétique est donnée par :

$$w_{mag} = \frac{1}{2} [[i_{s1}]^t [\varphi_{s1}] + [i_{s2}]^t [\varphi_{s2}] + [i_r]^t [\varphi_r]] \quad (II.63)$$

### II.7.2.5 Couple électromagnétique

L'entrefer de la machine étant de largeur constante, seules les matrices  $[M_{sr}]$  et  $[M_{sr}]^t$  dépendent de  $(\theta_r)$ . Le couple électromagnétique est alors donné par la dérivée partielle de l'énergie par rapport à l'angle mécanique  $\theta_m$  [109, 137, 138].

$$C_{em} = \frac{dw_{mag}}{d\theta_m} = p \times \frac{dw_{mag}}{d\theta_e} \quad (II.64)$$

Avec, p représentant le nombre de paires de pôle et  $\theta_e = \theta_r$  l'angle électrique, l'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{p}{2} \left( [i_{s1,abc}] \times \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1,r}] [i_{r,abc}]^t + [i_{s2,abc}] \times \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2,r}] [i_{r,abc}]^t \right) \quad (II.65)$$

### II.7.2.6 Equation mécanique

L'équation mécanique fondamentale qui régit le mouvement du rotor de la machine peut être donnée par [127, 137, 138, 139] :

$$J \times \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \times \Omega \quad (II.66)$$

Avec  $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = p\Omega$  où  $\Omega$  représente la vitesse angulaire de rotation.

### II.7.3 Modèle biphasé du MASDE

Par utilisation des transformations orthogonales qui permettent de convertir un système polyphasé en un système biphasé, un modèle mathématique du système plus simple que le modèle physique est ainsi obtenu [140].

#### II.7.3.1. Conventions

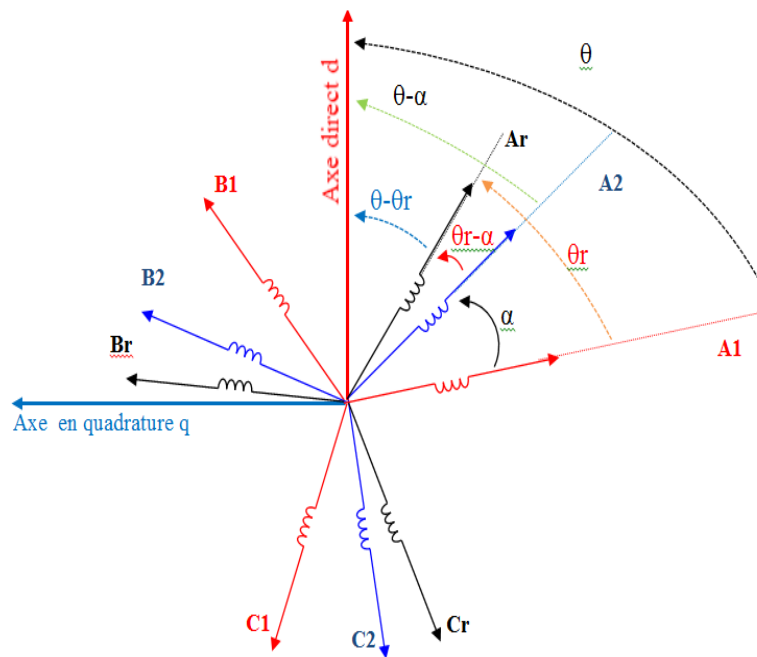


Figure (II.23) : Représentation angulaire des systèmes d'axe dans l'espace électrique [3].

$(A_1, B_1, C_1)$  et  $(A_2, B_2, C_2)$  représentent les deux étoiles du stator,  $(A_r, B_r, C_r)$  représentent les trois phases du rotor et  $\theta$  angle de transformation de PARK de l'étoile 1 du stator, c'est-à-dire l'angle entre la première phase de la première étoile  $A_1$  et l'axe direct « d ». Le repère (d, q) tourne avec une vitesse «  $\omega_{dq}$  » par rapport aux deux étoiles du stator et «  $\theta_{gl}$  » représente l'angle entre l'axe direct « d » et le premier axe du rotor  $A_r$  [127].

$$\left\| \begin{array}{l} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \theta = \int_0^t \omega_{dq} dt \\ \theta = \theta_r + \theta_{gl} \end{array} \right. \quad (\text{II.67})$$

### II.7.3.2. Transformation de PARK directe

La transformation de Park consiste à convertir les systèmes d'enroulements statoriques et rotoriques en un système équivalent de deux bobinages en quadrature sans interactions magnétiques entre eux, créant un champ électromagnétique tournant et générant la même force magnétomotrice. La composante homopolaire est de valeur nulle si le système (abc) est considéré équilibré et symétrique. En utilisant la matrice de PARK, les grandeurs statoriques et rotoriques d'indices réelles (a, b, c) sont converties en grandeurs d'indices (d, q, o) (directe, en quadrature et homopolaire) [129, 135, 136].

#### a) Matrice de PARK de la première étoile

Matrice de transformation des enroulements statoriques de l'étoile 1.

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.68})$$

#### b) Matrice de PARK de la deuxième étoile

Matrice de transformation des enroulements statoriques de l'étoile 2.

$$[P(\theta - \alpha)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.69})$$

#### c) Matrice de PARK du rotor

Matrice de transformation de l'enroulement rotorique.

$$[P(\theta - \theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.70})$$



### II.7.3.3. Transformation de PARK inverse

Après étude du système, maintenant, simplifié, il est impératif de revenir à la dimension réelle de la machine à travers une autre matrice de passage appelée « matrice de PARK inverse ».

#### a) Matrice de PARK inverse de la première étoile

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.71})$$

#### b) Matrice de PARK inverse de la deuxième étoile

$$[P(\theta - \alpha)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \alpha - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \alpha - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) & -\sin(\theta - \alpha + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.72})$$

#### c) Matrice de PARK inverse du rotor

$$[P(\theta - \theta_r)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \theta_r - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \theta_r + 2\pi/3) & -\sin(\theta - \theta_r + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.73})$$

### II.7.3.4. Modèle et choix du référentiel

Selon la vitesse attribuée au repère « d-q », trois dispositions de référentiels existent, tel que [129, 136] :

#### a) Référentiel lié au stator

C'est le référentiel le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées du régime transitoire avec une variation importante de la vitesse de rotation.

«  $\omega_{dq} = 0$  » : Cela signifie que le repère de Park est stationnaire par rapport au stator. La première phase de la première étoile ( $A_1$ ) coïncide avec l'axe direct (d), donc «  $\theta = 0$  ».

$$\theta = \theta_r + \theta_{gl} \Rightarrow 0 = \theta_r + \theta_{gl} \Rightarrow \frac{d\theta_{gl}}{dt} = -\frac{d\theta_r}{dt} \Rightarrow \frac{d\theta_{gl}}{dt} = -p\Omega$$

#### b) Référentiel lié au rotor

C'est un référentiel souvent utilisé dans le régime transitoire où la vitesse de rotation est considérée constante. La vitesse électrique du repère « d-q » est égale à la pulsation électrique  $\omega_r$  du rotor «  $\omega_{dq} = \omega_{gl}$  ».

$$\theta = \theta_r + \theta_{gl} \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta_{gl}}{dt} \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = +\frac{d\theta_r}{dt} \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = +p\Omega$$

### c) Référentiel lié au champ tournant

Dans ce référentiel qui n'introduit pas de simplification dans la transformation des équations électriques, la vitesse du repère « d-q » est égale à la vitesse du champ tournant.

$$\omega_{dq} = \omega_s \Rightarrow \theta = \int_0^t \omega_{dq} dt = \int_0^t \omega_s dt \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

$$\theta = \theta_r + \theta_{gl} \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta_{gl}}{dt} \Rightarrow \omega_s = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta_{gl}}{dt} \Rightarrow \frac{d\theta_{gl}}{dt} = \omega_s - p\Omega$$

Dans ce qui suit, l'étude du MASDE se fera avec un référentiel « d-q » lié au champ tournant.

### II.7.4. Application de la transformation de PARK à la MASDE

Un nouveau système d'équation sera mis en évidence après application de la transformation de Park aux courants, aux tensions et aux flux, tel que [137, 138, 141] :

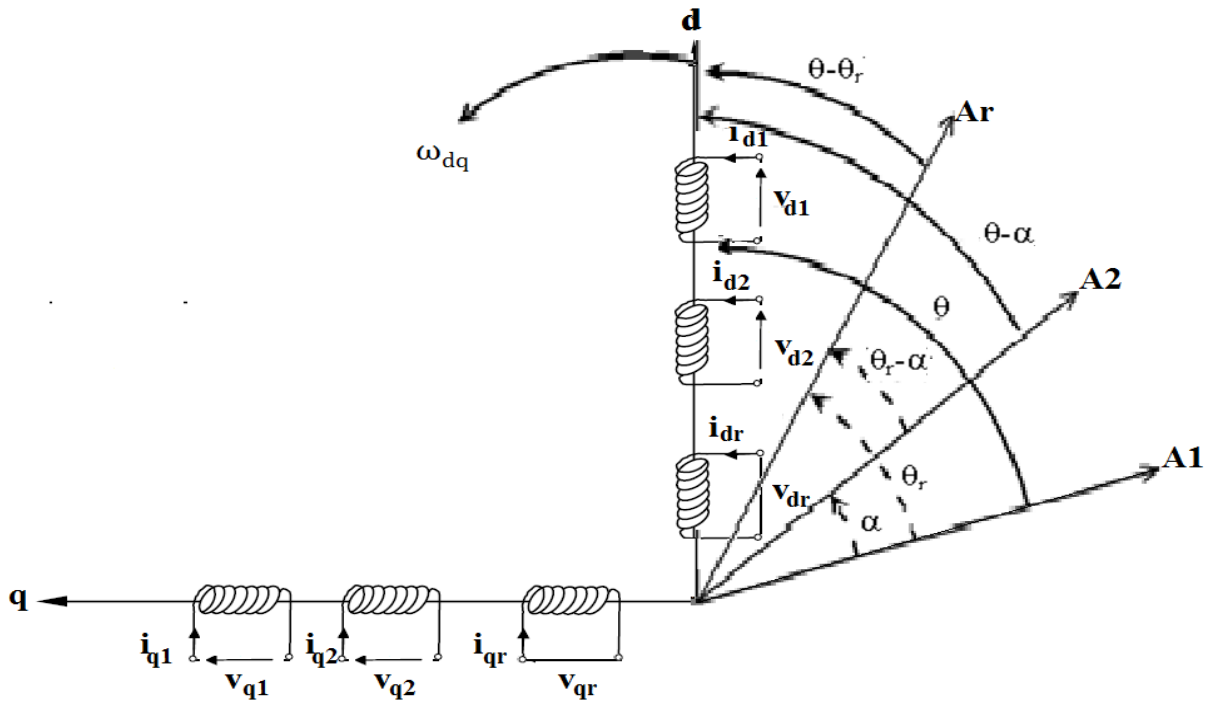


Figure (II.24) : Représentation du modèle de PARK de la MASDE dans le repère d-q [140]

#### a) Transformation des tensions

$$\begin{cases} [v_1] = [P(\theta)] \times [v_{1p}] \\ [v_2] = [P(\theta - \alpha)] \times [v_{2p}] \end{cases} \quad \text{avec } [v_{1p}] = \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \\ v_{01} \end{bmatrix} \text{ et } [v_{2p}] = \begin{bmatrix} v_{d2} \\ v_{q2} \\ v_{02} \end{bmatrix}$$

#### b) Transformation des courants

$$\begin{cases} [i_1] = [P(\theta)] \times [i_{1p}] \\ [i_2] = [P(\theta - \alpha)] \times [i_{2p}] \\ [i_r] = [P(\theta - \theta_r)] \times [i_{rp}] \end{cases} \quad \text{avec } [i_{1p}] = \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{01} \end{bmatrix}, [i_{2p}] = \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \\ i_{02} \end{bmatrix} \text{ et } [i_{rp}] = \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{0r} \end{bmatrix}$$

**c) Transformation des flux**

$$\begin{cases} [\varphi_1] = [P(\theta)] \times [\varphi_{1p}] \\ [\varphi_2] = [P(\theta - \alpha)] \times [\varphi_{2p}] \\ [\varphi_r] = [P(\theta - \theta_r)] \times [\varphi_{rp}] \end{cases} \text{ avec } [\varphi_{1p}] = \begin{bmatrix} \varphi_{d1} \\ \varphi_{q1} \\ \varphi_{01} \end{bmatrix}, [\varphi_{2p}] = \begin{bmatrix} \varphi_{d2} \\ \varphi_{q2} \\ \varphi_{02} \end{bmatrix} \text{ et } [\varphi_{rp}] = \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{0r} \end{bmatrix}.$$

**II.7.4.1 Equations des tensions**

Par application de la transformation de PARK aux équations (II.58), (II.59) et (II.60) et en prenant «  $R_{a1} = R_{b1} = R_{c1} = R_{s1}$ ,  $R_{a2} = R_{b2} = R_{c2} = R_{s2}$  et  $R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r$  », il en résulte [127, 144] :

**(a) Etoile 1**

$$[P(\theta)] \times [v_{1p}] = [R_{s1}] \times [P(\theta)] \times [i_{1p}] + \frac{d}{dt} ([P(\theta)] \times [\varphi_{1p}])$$

$$D'où : \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \\ v_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{01} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{d1} \\ \varphi_{q1} \\ \varphi_{01} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{d1} \\ \varphi_{q1} \\ \varphi_{01} \end{bmatrix} \quad (\text{II.74})$$

**(b) Etoile 2**

$$[P(\theta - \alpha)] \times [v_{2p}] = [R_{s2}] \times [P(\theta - \alpha)] \times [i_{2p}] + \frac{d}{dt} ([P(\theta - \alpha)] \times [\varphi_{2p}])$$

$$D'où : \begin{bmatrix} v_{d2} \\ v_{q2} \\ v_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \\ i_{02} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{d2} \\ \varphi_{q2} \\ \varphi_{02} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{d2} \\ \varphi_{q2} \\ \varphi_{02} \end{bmatrix} \quad (\text{II.75})$$

**(c) Rotor**

$$[R_r] \times [P(\theta - \theta_r)] \times [i_{rp}] + \frac{d}{dt} ([P(\theta - \theta_r)] \times [\varphi_r]) = 0$$

Les barres de la cage d'écureuil du rotor sont court-circuitées, d'où :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{0r} \end{bmatrix} + (\omega_s - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{0r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.76})$$

**II.7.4.2 Expressions des flux magnétiques**

Les inductances propres cycliques des deux stators, qui sont d'ailleurs de conception identique, et du rotor sont respectivement données par «  $L_1 + L_m$ ,  $L_2 + L_m$  et  $L_r + L_m$  ».

Les inductances mutuelles cycliques entre les deux stators et le rotor sont données par «  $L_m = \frac{3}{2} L_{ms}$  », «  $L_m = \frac{3}{2} L_{sr}$  » et «  $L_m = \frac{3}{2} L_{mr}$  ».

Par application de la transformation de PARK aux équations (II.62), il en résulte [127,130,144] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{d1} = (L_1 + 3/2 \cdot L_{ms})i_{d1} + 3/2 \cdot L_{ms}i_{d2} + 3/2 \cdot L_{sr}i_{dr} \\ \varphi_{q1} = (L_1 + 3/2 \cdot L_{ms})i_{q1} + 3/2 \cdot L_{ms}i_{q2} + 3/2 \cdot L_{sr}i_{qr} \\ \varphi_{d2} = 3/2 \cdot L_{ms}i_{d1} + (L_2 + 3/2 \cdot L_{ms})i_{d2} + 3/2 \cdot L_{sr}i_{dr} \\ \varphi_{q2} = 3/2 \cdot L_{ms}i_{q1} + (L_2 + 3/2 \cdot L_{ms})i_{q2} + 3/2 \cdot L_{sr}i_{qr} \\ \varphi_{dr} = 3/2 \cdot L_{sr}i_{d1} + 3/2 \cdot L_{sr}i_{d2} + (L_r + 3/2 \cdot L_{mr})i_{dr} \\ \varphi_{qr} = 3/2 \cdot L_{sr}i_{q1} + 3/2 \cdot L_{sr}i_{q2} + (L_r + 3/2 \cdot L_{mr})i_{qr} \end{array} \right. \quad (\text{II.77})$$

Les équations du flux (II.73) deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{d1} = L_1 i_{d1} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{q1} = L_1 i_{q1} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\ \varphi_{d2} = L_2 i_{d2} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{q2} = L_2 i_{q2} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \end{array} \right. \quad (\text{II.78})$$

### II.7.4.3 Equations mécaniques

#### II.7.4.3.1 Puissance instantanée

La puissance instantanée absorbée par la machine asynchrone à double étoile est donnée par l'expression suivante [127, 144] :

$$P = [v_s] \cdot [i_s] = v_{a1}i_{a1} + v_{b1}i_{b1} + v_{c1}i_{c1} + v_{a2}i_{a2} + v_{b2}i_{b2} + v_{c2}i_{c2} \quad (\text{II.79})$$

La transformation de Park utilisée repose sur l'invariance de la puissance instantanée, ce qui conduit à leur équivalence physique, et l'équation (II.79) devient :

$$P = v_{d1} \times i_{d1} + v_{q1} \times i_{q1} + v_{d2} \times i_{d2} + v_{q2} \times i_{q2} \quad (\text{II.80})$$

Par développement des relations (II.74), (II.75), (II.76) et (II.77) :

$$\begin{aligned} P = & \left( R_{s1} \times i_{d1} + \frac{d\varphi_{d1}}{dt} - \omega_s \times \varphi_{q1} \right) i_{d1} + \left( R_{s2} \times i_{d2} + \frac{d\varphi_{d2}}{dt} - \omega_s \times \varphi_{q2} \right) i_{d2} \\ & + \left( R_{s1} \times i_{q1} + \frac{d\varphi_{q1}}{dt} + \omega_s \times \varphi_{d1} \right) i_{q1} + \left( R_{s2} \times i_{q2} + \frac{d\varphi_{q2}}{dt} + \omega_s \times \varphi_{d2} \right) i_{q2} \end{aligned}$$

La puissance devient :

$$\begin{aligned} P = & [R_{s1} \times i_{d1}^2 + R_{s2} \times i_{d2}^2 + R_{s1} \times i_{q1}^2 + R_{s2} \times i_{q2}^2] \\ & + \left[ \frac{d}{dt} \varphi_{d1} i_{d1} + \frac{d}{dt} \varphi_{d2} i_{d2} + \frac{d}{dt} \varphi_{q1} i_{q1} + \frac{d}{dt} \varphi_{q2} i_{q2} \right] \\ & + \omega_s [\varphi_{d1} i_{q1} + \varphi_{d2} i_{q2} - \varphi_{q1} i_{d1} - \varphi_{q2} i_{d2}] \end{aligned} \quad (\text{II.81})$$

Ainsi, trois termes émanent de l'expression de la puissance représentant [127, 144] :

**a) Les pertes joules**

$$P_j = R_{s1} \times i_{d1}^2 + R_{s2} \times i_{d2}^2 + R_{s1} \times i_{q1}^2 + R_{s2} \times i_{q2}^2 \quad \text{Représente les pertes joules statoriques.}$$

**b) La variation de l'énergie électromagnétique**

$$\frac{d}{dt} \varphi_{d1} i_{d1} + \frac{d}{dt} \varphi_{d2} i_{d2} + \frac{d}{dt} \varphi_{q1} i_{q1} + \frac{d}{dt} \varphi_{q2} i_{q2}$$

C'est la variation de l'énergie électromagnétique ou la réserve d'énergie stockée dans le champ.

**c) La puissance électromagnétique**

$$P_{em} = \omega_s \times [\varphi_{d1} \times i_{q1} + \varphi_{d2} \times i_{q2} - \varphi_{q1} \times i_{d1} - \varphi_{q2} \times i_{d2}]$$

Représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique avec les pertes fer supposées négligeables.

**II.7.4.3.2 Couple électromagnétique**

Etant donné la relation entre la puissance et le couple, il en résulte

$$P_{em} = C_{em} \times \Omega_s \quad (\text{II.82})$$

$$\text{D'où : } C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = \frac{\omega_s}{\Omega_s} (\varphi_{d1} i_{q1} + \varphi_{d2} i_{q2} - \varphi_{q1} i_{d1} - \varphi_{q2} i_{d2}) \quad (\text{II.83})$$

Le couple électromagnétique peut s'écrire de la manière suivante :

$$C_{em} = p \times (\varphi_{d1} i_{q1} + \varphi_{d2} i_{q2} - \varphi_{q1} i_{d1} - \varphi_{q2} i_{d2}) \quad (\text{II.84})$$

Par utilisation des relations du flux développées par les équations (II.78), l'expression du couple deviendra :

$$C_{em} = p \times L_m \times [i_{dr} \times (i_{q1} + i_{q2}) - i_{qr} \times (i_{d1} + i_{d2})] \quad (\text{II.85})$$

Comme il est possible d'obtenir une relation du couple électromagnétique en fonction des flux rotoriques et des courants directs et en quadratures des deux bobinages fictives du stator, ainsi :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \rightarrow i_{dr} = \frac{\varphi_{dr}}{L_r + L_m} - \frac{L_m}{L_r + L_m} (i_{d1} + i_{d2}) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \rightarrow i_{qr} = \frac{\varphi_{qr}}{L_r + L_m} - \frac{L_m}{L_r + L_m} (i_{q1} + i_{q2}) \end{cases} \quad (\text{II.86})$$

$$\text{D'où : } C_{em} = p \times \frac{L_m}{L_r + L_m} \times [\varphi_{dr} (i_{q1} + i_{q2}) - \varphi_{qr} (i_{d1} + i_{d2})] \quad (\text{II.87})$$

### II.7.4.4 Mise sous forme d'équation d'état

Pour pouvoir commander la machine, il est intéressant de la représenter sous forme d'équation d'état tel que [129, 142] :

$$\frac{dx}{dt} = A.X + B.U \quad (\text{II.88})$$

#### a) Vecteur d'état

Le vecteur d'état est donné par :

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

#### b) Vecteur d'entrée

Le vecteur U est le vecteur d'entrée, donné par :

$$U = [V_{d1}, V_{d2}, V_{q1}, V_{q2}, 0, 0]^t$$

#### c) Vecteur de commande

B est le vecteur de commande qui est donné par :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Avec  $\varphi_{md} = L_m(i_{d1} + i_{d2} + i_{dr})$  et  $\varphi_{mq} = L_m(i_{q1} + i_{q2} + i_{qr})$ , le flux magnétisant est :

$$\varphi_m = \sqrt{\varphi_{md}^2 + \varphi_{mq}^2} \quad (\text{II.89})$$

Les relations donnant la composante directe et la composante en quadrature du flux magnétisant, avec  $\frac{1}{L_a} = \frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_r}$  sont :

$$\begin{cases} \varphi_{md} = \left( \frac{\varphi_{d1}}{L_1} + \frac{\varphi_{d2}}{L_2} + \frac{\varphi_{dr}}{L_r} \right) L_a \\ \varphi_{mq} = \left( \frac{\varphi_{q1}}{L_1} + \frac{\varphi_{q2}}{L_2} + \frac{\varphi_{qr}}{L_r} \right) L_a \end{cases} \quad (\text{II.90})$$

Les courants seront donc déduits à partir de la relation (II.78) où :

$$\begin{cases} i_{d1} = \frac{\varphi_{d1} - \varphi_{md}}{L_1} \\ i_{d2} = \frac{\varphi_{d2} - \varphi_{md}}{L_2} \\ i_{dr} = \frac{\varphi_{dr} - \varphi_{md}}{L_r} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} i_{q1} = \frac{\varphi_{q1} - \varphi_{mq}}{L_1} \\ i_{q2} = \frac{\varphi_{q2} - \varphi_{mq}}{L_2} \\ i_{qr} = \frac{\varphi_{qr} - \varphi_{mq}}{L_r} \end{cases} \quad (\text{II.91})$$

$$\text{et} \left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \varphi_{d1} = V_{d1} - \frac{R_1}{L_1} \times (\varphi_{d1} - \varphi_{md}) + \omega_s \times \varphi_{q1} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{q1} = V_{q1} - \frac{R_1}{L_1} \times (\varphi_{q1} - \varphi_{mq}) - \omega_s \times \varphi_{d1} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{d2} = V_{d2} - \frac{R_2}{L_2} \times (\varphi_{d2} - \varphi_{md}) + \omega_s \times \varphi_{q2} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{q2} = V_{q2} - \frac{R_2}{L_2} \times (\varphi_{q2} - \varphi_{mq}) - \omega_s \times \varphi_{d2} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{dr} = -\frac{R_r}{L_r} \times (\varphi_{dr} - \varphi_{md}) + (\omega_s - \omega_r) \times \varphi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = -\frac{R_r}{L_r} \times (\varphi_{qr} - \varphi_{mq}) - (\omega_s - \omega_r) \times \varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II.92})$$

En développant ce système d'équation on aura :

$$\begin{array}{l} \frac{d}{dt} \varphi_{d1} = V_{d1} - \frac{R_1}{L_1} \left(1 - \frac{L_a}{L_1}\right) \varphi_{d1} + \frac{R_1 L_a}{L_1 L_2} \varphi_{d2} + \frac{R_1 L_a}{L_r L_1} \varphi_{dr} + \omega_s \varphi_{q1} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{d2} = V_{d2} + \frac{R_2 L_a}{L_1 L_2} \varphi_{d1} - \frac{R_2}{L_2} \left(1 - \frac{L_a}{L_2}\right) \varphi_{d2} + \frac{R_2 L_a}{L_r L_2} \varphi_{dr} + \omega_s \varphi_{q2} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{dr} = \frac{R_r L_a}{L_1 L_r} \varphi_{d1} + \frac{R_r L_a}{L_r L_2} \varphi_{d2} - \frac{R_r}{L_r} \left(1 - \frac{L_a}{L_r}\right) \varphi_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{q1} = V_{q1} - \frac{R_1}{L_1} \left(1 - \frac{L_a}{L_1}\right) \varphi_{q1} + \frac{R_1 L_a}{L_1 L_2} \varphi_{q2} + \frac{R_1 L_a}{L_r L_1} \varphi_{qr} - \omega_s \varphi_{d1} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{q2} = V_{q2} + \frac{R_2 L_a}{L_1 L_2} \varphi_{q1} - \frac{R_2}{L_2} \left(1 - \frac{L_a}{L_2}\right) \varphi_{q2} + \frac{R_2 L_a}{L_r L_2} \varphi_{qr} - \omega_s \varphi_{d2} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = \frac{R_r L_a}{L_1 L_r} \varphi_{q1} + \frac{R_r L_a}{L_r L_2} \varphi_{q2} - \frac{R_r}{L_r} \left(1 - \frac{L_a}{L_r}\right) \varphi_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{array} \quad (\text{II.93})$$

La matrice d'évolution du système A est obtenue après quelques arrangements des équations (II.78) et elle est donnée par :

$$A = \left( \begin{array}{cccccc} -\frac{R_1}{L_1} \left(1 - \frac{L_a}{L_1}\right) & \frac{R_1 L_a}{L_1 L_2} & \omega_s & 0 & \frac{R_1 L_a}{L_r L_1} & 0 \\ \frac{R_2 L_a}{L_1 L_2} & -\frac{R_2}{L_2} \left(1 - \frac{L_a}{L_2}\right) & 0 & \omega_s & \frac{R_2 L_a}{L_r L_2} & 0 \\ -\omega_s & 0 & -\frac{R_1}{L_1} \left(1 - \frac{L_a}{L_1}\right) & \frac{R_1 L_a}{L_1 L_2} & 0 & \frac{R_1 L_a}{L_r L_1} \\ 0 & -\omega_s & \frac{R_2 L_a}{L_1 L_2} & -\frac{R_2}{L_2} \left(1 - \frac{L_a}{L_2}\right) & 0 & \frac{R_2 L_a}{L_r L_2} \\ \frac{R_r L_a}{L_1 L_r} & \frac{R_r L_a}{L_r L_2} & 0 & 0 & -\frac{R_r}{L_r} \left(1 - \frac{L_a}{L_r}\right) & (\omega_s - \omega_r) \\ 0 & 0 & \frac{R_r L_a}{L_1 L_r} & \frac{R_r L_a}{L_r L_2} & -(\omega_s - \omega_r) & -\frac{R_r}{L_r} \left(1 - \frac{L_a}{L_r}\right) \end{array} \right) \quad (\text{II.94})$$

## II.8 Adaptation de l'alimentation par onduleur

### II.8.1 Modélisation de l'onduleur

Deux onduleurs triphasés, à commutations commandées, sont utilisés pour alimenter les deux étoiles de la machine.

Chaque onduleur est constitué de trois bras composés de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits. Les commandes sont alors disjointes, mais, complémentaires [127, 25].

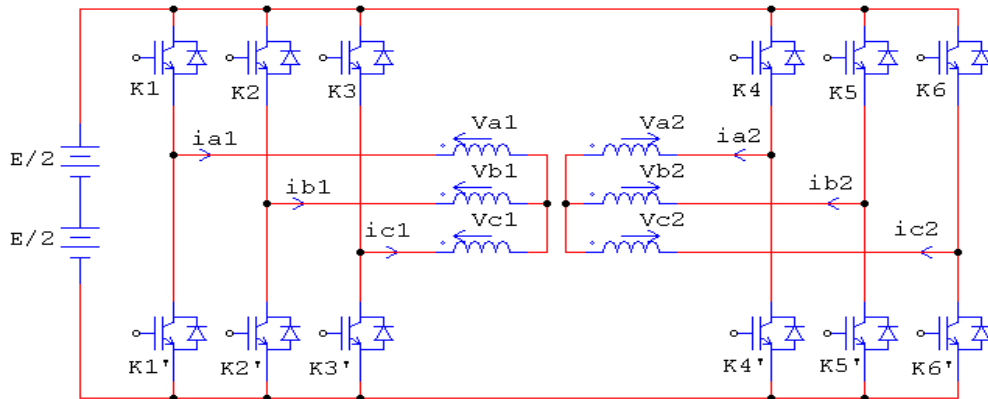


Figure (II.25) : Alimentation du stator par onduleurs de tension [3]

L'interrupteur " i ", tel que  $i \in \{1,2,3,4,5,6\}$  est représenté par une paire de 'transistor-diode' modélisée par la fonction logique  $f_i$  tel que  $f_i + \bar{f}_i = 1$  [127].

Tableau (II.2) : Etats de la fonction logique  $f_i$

$f_i$	" i "	Ki	Ki'
1	Fermé	Conduit	Bloqué
0	Ouvert	Bloqué	Conduit

Les tensions composées sont définies comme :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{a1b1} = V_{a1} - V_{b1} = E(f_1 - f_2) \\ U_{b1c1} = V_{b1} - V_{c1} = E(f_2 - f_3) \\ U_{c1a1} = V_{c1} - V_{a1} = E(f_3 - f_1) \\ U_{a2b2} = V_{a2} - V_{b2} = E(f_4 - f_5) \\ U_{b2c2} = V_{b2} - V_{c2} = E(f_5 - f_6) \\ U_{c2a2} = V_{c2} - V_{a2} = E(f_6 - f_4) \end{array} \right. \quad (II.95)$$

Les deux systèmes de tension simples sont équilibrés :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{a1} + V_{b1} + V_{c1} = 0 \\ V_{a2} + V_{b2} + V_{c2} = 0 \end{array} \right. \quad (II.96)$$



La résolution des équations (II.95) et (II.96) donne :

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \\ V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \times \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & +2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & +2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +2 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & +2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.97})$$

## II.8.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle

La technique de modulation de largeur d'impulsion « MLI » consiste à changer la largeur des impulsions de la tension de sortie avec des commandes appropriées des interrupteurs à semi-conducteurs de l'onduleur.

Le gain de l'onduleur peut être défini comme le rapport entre la tension alternative de sortie et la tension continue d'entrée [127].

La 'MLI' sinus-triangle consiste à comparer une onde modulante basse fréquence dite 'tension de référence' à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire [146, 147].

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La porteuse fixe la fréquence de commutation des interrupteurs [148].

### II.8.2.1 Onde modulante

Avec l'angle «  $\alpha = \pi/6$  » qui représente le déphasage entre les deux étoiles du stator, les tensions de référence sinusoïdales sont données par [149] :

$$\begin{aligned} \text{Etoile 1:} & \begin{cases} V_{\text{refa1}} = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_{\text{refb1}} = V_m \sin(2\pi ft - 2\pi/3) \\ V_{\text{refc1}} = V_m \sin(2\pi ft - 4\pi/3) \end{cases} \\ \text{Etoile 2:} & \begin{cases} V_{\text{refa2}} = V_m \sin(2\pi ft - \pi/6) \\ V_{\text{refb2}} = V_m \sin(2\pi ft - 5\pi/6) \\ V_{\text{refc2}} = V_m \sin(2\pi ft - 3\pi/2) \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{II.98})$$

### II.8.2.2 La porteuse

L'équation de la porteuse est donnée par [127, 149] :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm}(+4t/T_p - 1) & \text{si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pm}(-4t/T_p + 3) & \text{si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II.99})$$

### II.8.2.3 Critères de performance

Deux paramètres caractérisent cette technique de commande à savoir :

**a) L'indice de modulation**

Cet indice est défini comme étant le rapport entre la fréquence de modulation ( $f_p$ ) et la fréquence de la tension de référence ( $f_{ref}$ ).

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \tag{II.100}$$

**b) Le coefficient de réglage en tension**

Communément appelé 'coefficient de réglage de tension', il est défini comme étant le rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_{mref}$ ) et la valeur crête de l'onde de modulation ( $V_{mp}$ ) [127, 144].

$$0 < r = \frac{V_{mref}}{V_{mp}} \leq 1 \tag{II.101}$$

Pour un fonctionnement en « MLI », le coefficient de réglage en tension est toujours inférieur à l'unité et par définition «  $r=1$  » correspond à un fonctionnement en pleine onde.

**c) Observation**

Il existe quelques règles à respecter dans l'utilisation de la technique « MLI » à savoir :

- L'indice de modulation doit être un multiple de trois. ( $\frac{f_p}{f_{ref}} = 3k ; k \text{ naturel}$ ) et cette condition assurera d'avoir des tensions identiques à appliquer aux différentes phases.
- $\frac{f_p}{f_{ref}} = \text{nombre entier impair}$ . Cette condition assure une symétrie des différentes tensions et seront totalement dépourvues d'harmoniques pairs.

Généralement, il est préférable d'opter pour un rapport  $\frac{f_p}{f_{ref}} = 3 + 6k$ .

La « MLI » est dite synchrone dans le cas où le rapport  $\frac{f_p}{f_{ref}}$  est un nombre entier et elle est quasi obligatoire dans le cas où ce rapport est faible, c'est-à-dire en forte puissance et à grande vitesse.

**II.9 Modélisation des pompes**

**II.9.1 Débit de pompage « Q »**

C'est la quantité d'eau que la pompe peut déplacer durant un intervalle de temps donné. En pompage, le débit est, habituellement, donné en litres par heure [l/h] ou gallons par heure [g/h]. En pompage solaire, le débit est souvent exprimé en [m<sup>3</sup>/j].

**a) Niveau statique (Ns)**

Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage [3].

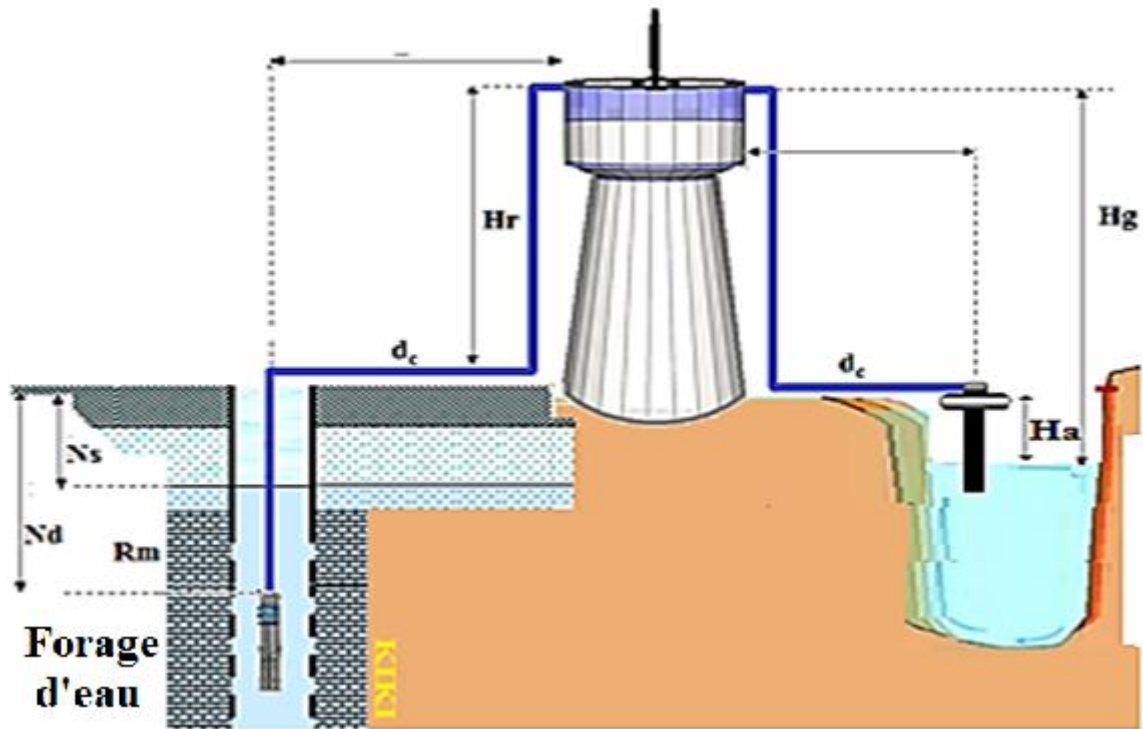


Figure (II.26) : Données de base d'une pompe [47].

**b) Niveau dynamique ( $N_d$ )**

Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit moyen [3].

**c) Rabattement ( $R_m$ )**

Le rabattement est la différence entre le niveau dynamique et le niveau statique et  $R_m = N_d - N_s$  : représente le rabattement maximal acceptable avant de stopper la pompe [3].

**II.9.2 Hauteur manométrique totale (HMT)**

Pour véhiculer un liquide d'un endroit à un autre, la pompe doit fournir une certaine pression appelée hauteur manométrique totale « HMT » exprimée en mètre colonne d'eau [mce].

Cette pression dépend de la hauteur d'aspiration «  $H_a$  » et de la hauteur de refoulement «  $H_r$  », ainsi que des pertes de charge à l'aspiration «  $J_a$  », des pertes de pression à l'écoulement «  $J_r$  » et de la pression de refoulement «  $P_r$  » [10, 150].

$$HMT = H_g + (J_a + J_r) + P_r \tag{II.102}$$

La hauteur manométrique totale est la somme de la pression résiduelle à la sortie du tube de refoulement et de la hauteur géométrique dite aussi hauteur totale de refoulement située entre le point le plus haut et le point le plus bas du rabattement de la nappe et des pertes de charge «  $J_c$  » dans le tube d'aspiration, la crépine, le clapet, la ou les vannes, ... etc.

A savoir que d'autant que la hauteur manométrique totale est élevée, d'autant que le débit fourni par la pompe est faible [16, 150].

### II.9.2.1 Cas de pompe en aspiration

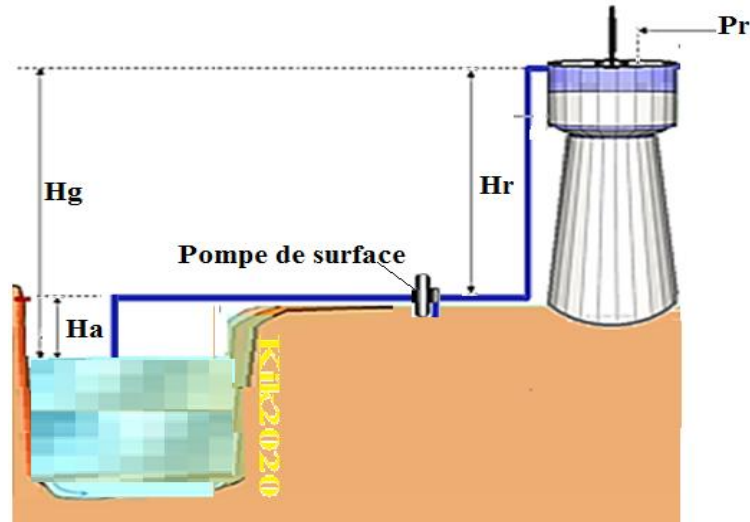


Figure (II.27) : Cas de pompe de surface.

Dans ce cas de figure la hauteur géométrique «  $H_g$  » n'est que la somme de la hauteur d'aspiration «  $H_a$  » et celle du refoulement «  $H_r$  ». Les pertes de pression globales à l'aspiration et au refoulement sont représentées par «  $J_c$  ».

$$HMT = (H_a + H_r) + J_c + P_r \quad (II.103)$$

Il existe des valeurs normalisées de pertes de charge exprimées en pourcentage de la hauteur géométrique en fonction du débit et de la section des conduites fournies par le constructeur sous forme de tableaux.

Pratiquement, des valeurs de 10% à 15% de la hauteur géométrique sont utilisées pour le calcul des pertes de charges [10, 150].

### II.9.2.2 Cas de pompe en charge

Les hauteurs d'aspiration et de refoulement sont facilement mesurables, les pertes de charges sont facilement calculables et la pression résiduelle est généralement la pression atmosphérique [150].

Dans ce cas, la hauteur géométrique n'est que la différence entre la hauteur de refoulement et celle d'aspiration.

$$HMT = H_r - H_a + J_c + P_r \quad (II.104)$$

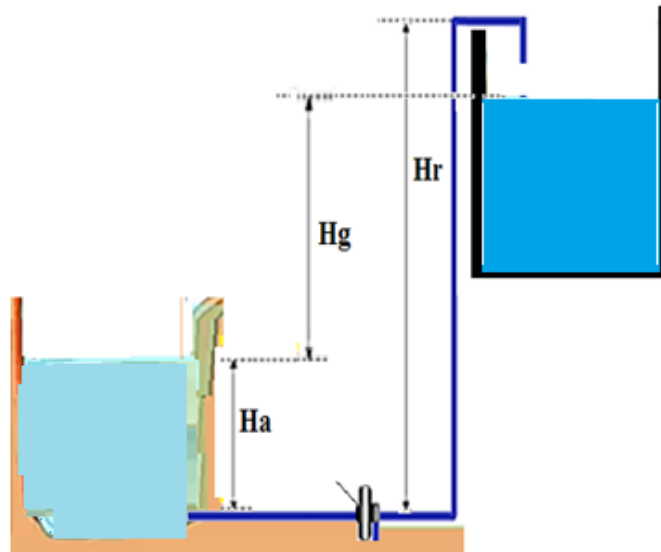


Figure (II.28) : Cas de pompe en charge.

### II.9.2.3 Cas de pompe immergée

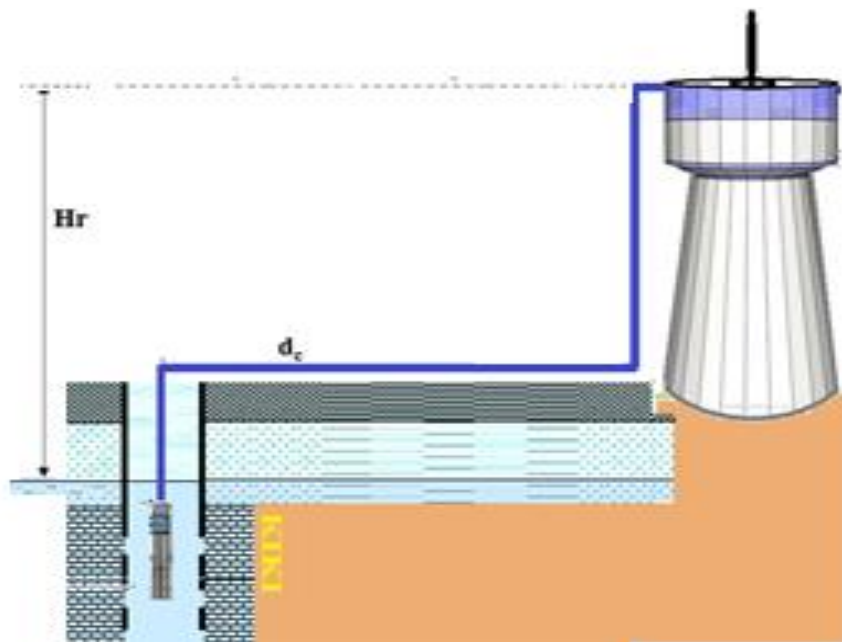


Figure (II.29) : Cas de pompe immergée.

Dans ce cas, la hauteur d'aspiration est nulle, compte tenu que la pompe est immergée et la hauteur géométrique n'est que la hauteur de refoulement [150].

$$HMT = H_r + J_c + P_r \quad (II.105)$$

Les hauteurs d'aspiration et de refoulement sont facilement mesurables, les pertes de charges sont facilement calculables et la pression résiduelle est généralement la pression atmosphérique.

### II.9.3 Hauteur d'aspiration

La hauteur d'aspiration dans un réseau de pompage est la cote verticale mesurée entre la surface du réservoir d'aspiration et l'axe de la pompe. Cette hauteur est, directement, liée à la charge hydrostatique [151].

La hauteur théorique d'aspiration d'une pompe est de 10.33 mètres à la pression atmosphérique au niveau de la mer avec une eau à 0°C de température [151] (voir Annexe 3).

À cause des phénomènes de cavitation et des diverses pertes causées par la charge dans la tuyauterie, par l'altitude, par la température de l'eau, la viscosité de l'eau et par l'état de la pompe et que généralement, le vide absolue ne peut pas être atteint, cette hauteur ne peut être atteinte [151].

La pompe à vide doit réaliser une pression supérieure à la pression de vapeur saturante, condition sine qua none pour éviter l'apparition du phénomène de cavitation où l'eau commence à s'évaporer causant des bulles destructrices [68].

La hauteur pratique d'aspiration maximale est située autour des 7 mètres à température ambiante. Dans le cas où la hauteur maximale est atteinte, il faudra placer une pompe intermédiaire, mettre le réservoir en pression, diminuer la température du fluide,... etc. [58]

### II.9.4 Pertes de charge

Les pertes de charge sont dues aux frottements du liquide contre les parois, plus au moins lisses, de la tuyauterie, aux changements de diamètres, aux courbes, aux accessoires tels que les té, les vannes, les coudes, ... etc.

La formule de Cole brook permet le calcul des pertes de charge de tous les fluides, mais, son inconvénient majeur reste la complexité de son expression mathématique, c'est pourquoi quelques formules empiriques équivalentes sont encore en usage.

La formule de Darcy permet de définir la perte de charge d'une canalisation par [152] :

$$J_c = \frac{\lambda_c \times v_f^2}{2 \times g_t \times D} \quad [\text{mce}] \quad (\text{II.106})$$

Avec :

$v_f = \frac{4 \times Q}{\pi \times D^2}$  : Vitesse moyenne du fluide ;

$\lambda_c$  : coefficient de perte de charge ;

D : diamètre intérieur de la conduite.

### II.9.5 Hauteur totale de pompage

C'est la somme de la hauteur statique  $H_s$  ou la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel l'eau doit être pompée et  $H_d$  représentant la somme des pertes linéaires et des pertes singulières [68, 69].

#### a) Pertes de charge linéaires

Les pertes de charge linéaires sont données par [68, 69] :

$$\Delta H_1 = \frac{\lambda_c \times L \times v_f^2}{2 \times g_t \times D} \quad (\text{II.107})$$

#### b) Pertes de charge singulières (locales)

Avec  $\varepsilon$ , le coefficient de pertes de charges locales, les pertes singulières qui sont dues aux divers changements de section sont données par [68, 69] :

$$\Delta H_2 = \varepsilon \times \frac{v_f^2}{2 \times g_t} \quad (\text{II.108})$$

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2 = \frac{8}{\pi^2 \times D^4 \times g_t} \left( \lambda_c \times \frac{L}{D} + \varepsilon \right) Q^2 = K_{fr} \times Q^2 \quad (\text{II.109})$$

Avec  $K_{fr}$ , un coefficient qui représente la constante de canalisation

$$K_{fr} = \frac{8}{\pi^2 \times D^4 \times g_t} \left( \lambda_c \times \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \quad (\text{II.110})$$

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_s + K_{fr} \times Q^2 \quad (\text{II.111})$$

### II.9.6 Puissance d'une pompe

La puissance de la pompe se calcule à l'aide du théorème de Bernoulli. L'énergie hydraulique est considérée comme étant la somme de l'énergie cinétique déterminée par le mouvement du liquide dans le tube et d'une énergie potentielle stockée, soit sous la forme d'un accroissement de pression, soit sous celle d'une augmentation de hauteur [153].

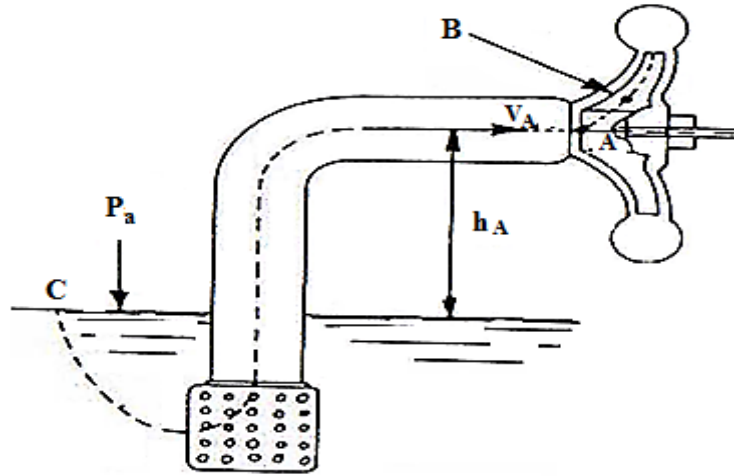
La puissance hydraulique fournie par la pompe est donnée par :

$$P_h = \rho_{eau} \times g_t \times Q \times HMT \quad (\text{II.112})$$

### II.9.7 Charge nette à l'aspiration NPSH

NPSH est le diminutif de « Net Positive Suction Head », soit « charge ou hauteur nette à l'aspiration ».

Soit une pompe centrifuge dont l'axe supposé horizontal est à une hauteur  $h_A$  au-dessus du plan d'eau à l'aspiration, représentée par la figure (II.30) [68].



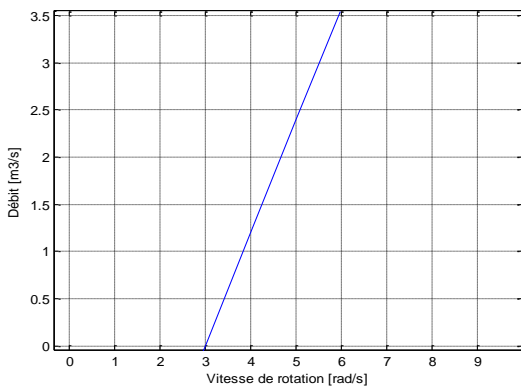
**Figure (II.30) :** Représentation d'une pompe centrifuge horizontale [68].

Si  $P_A$  est la pression absolue à l'entrée de la roue au point A et  $V_A$  la vitesse en ce point et si  $H_d$  est la perte de charge totale entre les points C et A d'un filet liquide partant de la surface libre à l'aspiration en C et passant en A, le théorème de Bernoulli appliqué entre les deux points considérés donne [68]:

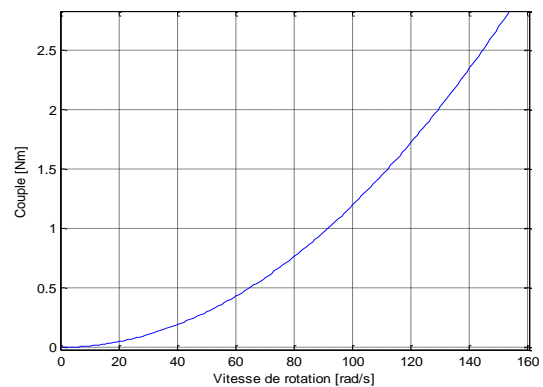
$$NPSH = \frac{P_{atm}}{\rho_{eau} \times g_t} - \frac{P_v}{\rho_{eau} \times g_t} - \frac{V_A^2}{2 \times g_t} - H_d - h_A \quad (II.113)$$

La NPSH est la hauteur représentative de la tension de vapeur du liquide pompé à la température considérée. C'est une expression indépendante de la pompe qui dépend de la longueur et du diamètre de la canalisation d'aspiration, des pertes de charge le long de cette canalisation, de la hauteur géométrique d'aspiration [68].

### II.9.8 Caractéristiques de la pompe centrifuge



**Figure (II.31) :** Caractéristiques « débits – vitesses » d'une pompe centrifuge



**Figure (II.32) :** Caractéristiques « Couple – Vitesse » d'une pompe centrifuge



### II.9.8.1 Caractéristique «Débit – Vitesse»

Le débit est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur (fig. II.31). Toutefois, il faut une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir un débit [16].

### II.9.8.2 Caractéristique « Couple-Vitesse »

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de la vitesse (figure II.32). La hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. Le moteur devra, donc, être très rapide pour assurer un bon débit.

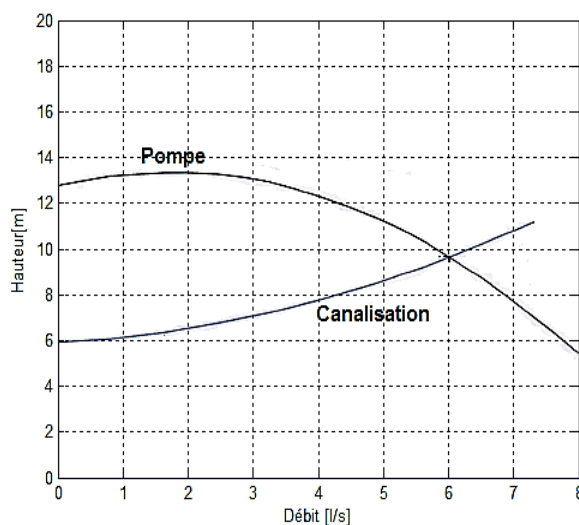
Puisque, le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une HMT donnée, pour obtenir un débit de départ non nul [16, 154].

Donc, la pompe centrifuge oppose un couple résistant  $C_r$ , avec  $C_s$  représentant le couple statique, très petit et  $K_r$  le coefficient de proportionnalité [ $Nm.s^2/rad^2$ ] tel que BRAUNSTEIN et KORNFIELD l'ont introduit en 1981 [68] :

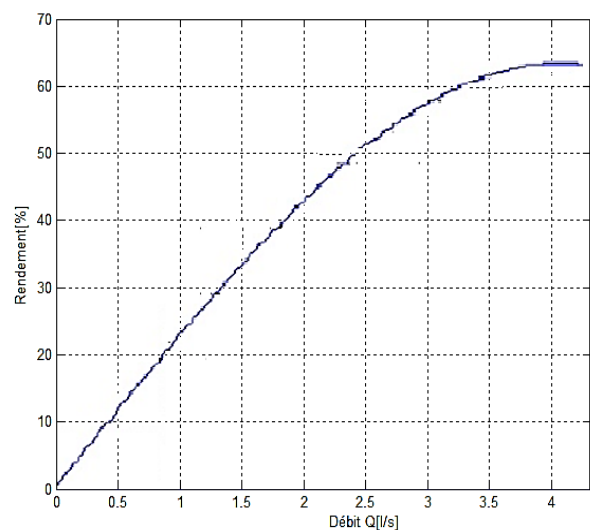
$$\begin{cases} C_r = K_r \times \Omega_{pmp}^2 + C_s \\ P_{mec} = K_r \times \Omega_{pmp}^3 \end{cases} \quad (II.114)$$

### II.9.8.3 Caractéristique « Débit-Hauteur »

Les constructeurs fournissent les courbes Q(HMT) maximale et minimale correspondant aux diamètres maximaux et minimaux possibles de la roue [155, 156].



**Figure (II.33) :**  
Caractéristiques « HMT – Débit »  
d'une pompe centrifuge



**Figure (II.34) :**  
Caractéristiques de rendement  
d'une pompe centrifuge

Si la charge est une pompe monocellulaire à roue radiale, elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la charge hydraulique appliquée sur le fluide par la roue à aubes HMT [mètre] en fonction du débit  $Q$  [l/s] (fig. II.33).

Le modèle utilisé est identifié par l'expression de la HMT qui est donnée par le modèle de PELEIDER-PETERMAN où des constantes propres de la pompe liées à sa géométrie  $K_0$ ,  $K_1$  et  $K_2$  sont fournies par le constructeur [157] :

$$HMT = K_0 \times \omega^2 + K_1 \times \omega \times Q - K_2 \times Q^2 \quad (\text{II.115})$$

La courbe HMT(Q) est une parabole où le point d'intersection avec l'axe des ordonnées est le point à débit nul. C'est le point dit de « barbotage » où les vannes sont fermées [155, 156].

#### II.9.8.4 Caractéristique de rendement de la pompe

Même si les fabricants donnent, généralement, la courbe du rendement hydraulique (figure II.34) avec  $P_{ab}$  représentant la puissance absorbée par le moteur, il est possible de la tracer en utilisant la formule suivante [158] :

$$\eta_H = \frac{P_h}{P_{ab}} \quad (\text{II.116})$$

avec: 
$$P_h = \rho_{eau} \times g_t \times Q \times HMT \quad (\text{II.117})$$

Généralement le rendement maximal du groupe motopompe ne dépasse pas 72%.

#### II.9.9 Utilisation des lois de similitude

Une pompe centrifuge fonctionne rarement à régime constant, il se produit, généralement, des variations de régime dues aux nécessités d'exploitation.

Pour une pompe donnée, si une des caractéristiques de puissance et du rendement est connue à vitesse «  $N$  » constante, alors, il est facile d'en déduire toutes les caractéristiques correspondantes de la pompe et de toutes les pompes semblables.

Les lois de similitude permettent de déterminer les performances de débit, de hauteur manométrique totale et de puissance dans le cas où la vitesse de rotation de la pompe passe d'une valeur  $N_1$  à une valeur  $N_2$  de la manière suivante [159] :

##### II.9.9.1 Débit

La pompe peut conserver un excellent rendement, en fournissant un débit et une hauteur différents, à condition, de modifier sa vitesse de rotation [101, 160].

$$Q_2 = Q_1 \times \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{II.118})$$

**II.9.9.2 Puissance du moteur**

$$P_2 = P_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (\text{II.119})$$

**II.9.9.3 Hauteur manométrique totale**

Ces lois de similitude, dont les utilisateurs de ces pompes centrifuges peuvent s'enorgueillir, laissent les différentes applications souples et flexibles aux divers emplois [3, 101, 160].

$$\text{HMT}_2 = \text{HMT}_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (\text{II.120})$$

Par la caractéristique  $H = f(Q)$  à une vitesse donnée et un diamètre de la roue  $D$ , il est possible de déterminer les dimensions d'une pompe semblable devant réaliser un débit  $Q_1$  sous une pression  $H_1$  en tournant à une vitesse  $N_1$  [101, 160].

**II.10 Conclusion**

La modélisation des diverses sources s'avère très importante en vue de connaître et de maîtriser leur comportement lors des différentes étapes. La connaissance des potentialités éoliennes et photovoltaïque d'un site donné est primordiale pour toute éventuelle implantation de station de pompage. Le vent et le soleil peuvent être la solution espérée pour les sites éloignés non connectés aux réseaux conventionnels.

Ainsi, l'utilisation de ces deux énergies, soit pour le pompage, soit pour la génération électrique semble être une aubaine pour les pays souffrant de famine causée par la rareté de l'eau.

Actuellement, la réaction électrochimique au niveau de la FC est assez maîtrisée, par contre, la recherche se base sur des modèles d'état qui permettront une optimisation des performances par un contrôle dynamique, notamment, en ce qui concerne le système d'alimentation d'air et d'hydrogène, le système de refroidissement et celui de l'humidification ainsi que sur les matériaux et les techniques d'assemblages des empilements.

La MASDE est la machine multiphasée la plus utilisée, soit pour un fonctionnement moteur ou bien générateur. Un intérêt distinctif est porté à la MASDE grâce aux avantages multiples qu'elle offre, entre autre, la segmentation de puissance où le fait d'augmenter le nombre de phases du stator, le courant par phase diminue sans que la tension par phase ne soit augmentée, amenant ainsi une répartition de la puissance sur les différentes phases tout en minimisant les ondulations de courant et de couple. La machine aura moins de perte au niveau du rotor et le facteur de puissance est amélioré [127].

La complexité des équations régissant la MASDE a conduit à l'élaboration d'un système à deux axes où sont éliminées les interactions entre les bobines fictives des enroulements directes et en quadratures. Pour ce faire, les transformées de Park directe et inverse offrent un très bon outil pour surmonter la difficulté rencontrée lors de la modélisation de la machine.

La pompe peut conserver un excellent rendement, en fournissant un débit et une hauteur différents, à condition de modifier sa vitesse de rotation et les lois de similitude permettent la déduction des nouvelles performances de la pompe ou d'une autre pompe. En pratique, les hydrauliciens utilisent des notions plus simples pour dimensionner les systèmes de pompage.

Le dimensionnement des divers éléments constituant la station de pompage fera l'objet du prochain chapitre où des simulations permettent de suivre leur évolution et leur comportement.

# **CHAPITRE III**

**DIMENSIONNEMENT ET**

**APPLICATION DE LA MASSE EN**

**POMPAGE HYBRIDE À ÉNERGIES**

**RENOUVELABLES**

## CHAPITRE III

### **DIMENSIONNEMENT ET APPLICATION DE LA MASDE EN POMPAGE HYBRIDE À ÉNERGIES RENOUVÉLABLES**

---

#### III.1 Introduction

Evidemment, après la modélisation, le dimensionnement s'avère être une étape incontournable dans le processus entamé. Sous dimensionner un générateur ou un actionneur, revient à ne pas exaucer le besoin réel de la charge à tout instant. Un surdimensionnement, par contre, entraîne un coût exorbitant de l'installation sans pour autant influencer sur le rendement global.

Dans ce qui suit, un dimensionnement du système hybride est réalisé pour le générateur photovoltaïque et le générateur éolien passant par un dimensionnement du générateur de secours, à savoir, la pile à combustible.

Le besoin réel en eau de cette localité est un élément vital pour l'entame d'un dimensionnement rigoureux, notamment, du réservoir à ériger, du nombre de panneaux photovoltaïques à installer et des caractéristiques physiques de l'éolienne ou des éoliennes à planter.

Faute d'expérimentation et en prenant compte de toutes les contraintes envisageables, la simulation offre des résultats très proches de la réalité, une fois que la modélisation est bien effectuée. Ainsi, le comportement de chaque élément par rapport aux autres éléments constituant la chaîne de pompage est décortiqué dans le but de prévoir des corrections afin d'améliorer les rendements.

Pour les besoins de simulation numérique du comportement de l'ensemble de la chaîne de pompage, le choix s'est porté sur l'utilisation du logiciel MATLAB SIMULINK [143].

#### III.2 Présentation du site

Dans l'optique d'électrifier des villages à faible densité de population, caractérisés par leur isolement et leur éloignement de tout réseau de communication, un programme d'utiliser l'énergie solaire photovoltaïque est réalisé durant la période de 1995 à 1999 où 18 villages représentant un millier de foyers éparpillés sur 4 wilayas du grand Sud ont bénéficié de cette source vitale [164].

A « 29° 15' nord et 0° 15' est » se trouve Timimoune, une localité du sud algérien qui s'étale entre le Grand Erg Occidental, au Nord, et le plateau du Tademaït, au Sud, elle est la principale oasis de la région du Gourara.

Tableau III.1 : Durée journalière d’insolation et vitesse du vent de Timimoune [167, 168].

Mois	Vitesse du vent [km/h]	Durée journalière d’insolation	Mois	Vitesse du vent [km/h]	Durée journalière d’insolation
Janvier	14	9	Juillet	17	10
Février	15	9	Aout	16	10
Mars	16	10	Septembre	14	10
Avril	18	10	Octobre	15	10
Mai	18	10	Novembre	15	9
Juin	18	11	Décembre	16	9

Les températures moyennes dans cette région fluctuent entre 19°C en janvier et 45°C en juillet. Le tableau (III.1) résume le nombre d’heures d’insolation journalière au cours d’une année, ainsi que la vitesse moyenne du vent mensuelle [165, 166, 167, 168].

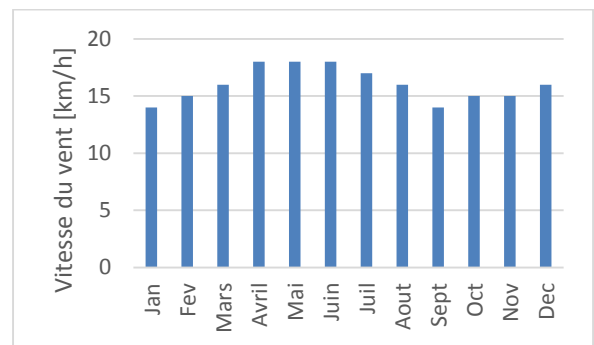
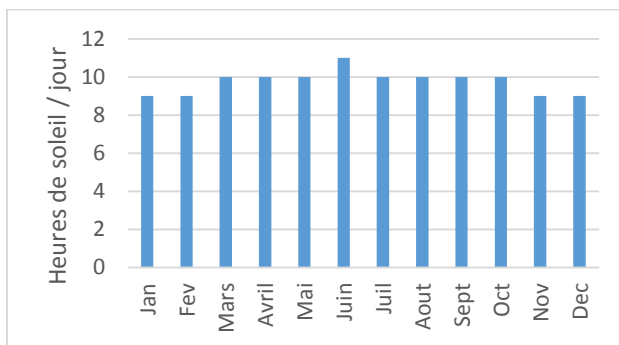


Figure III.1 : Heures d’insolation par jour de la région de Timimoune

Figure III.2 : Vitesses du vent mensuelles de la région de Timimoune

Les différentes mesures quotidiennes ont permis de connaître le potentiel éolien de Timimoune disponible au cours d’une année. Ainsi le tableau (III.2) détaille les vitesses du vent disponible par tranches.

Du point de vue caractéristique astronomique, le site de la région d’étude (Adrar) est caractérisé par une durée du jour longue, d’une moyenne annuelle de plus de 9.5 heures par jour et un taux d’insolation autour de 80% pour le site de Timimoune [164, 165].

En s’appuyant sur les données récoltées et inscrites sur le tableau (III.2), la valeur moyenne de la vitesse du vent sera calculée par la relation statistique suivante :

$$\bar{v}_w = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \times n_i}{\sum_{i=1}^n n_i} \tag{III.1}$$

Application numérique :  $\bar{v}_w = 22.43 \text{ km/h} = 6.23 \text{ m/s}$

Tableau III.2 : Vitesses du vent disponible au niveau de Timimoune [166, 167].

Intervalle de vitesse [km/h]	[1 ; 5[	[5 ; 12[	[12 ;19[	[19 ; 28[	[28 ; 38[	[38 ; 50[	[50 ; 61[
Vitesse moyenne $x_i$	3	8.5	15.5	23.5	33	44	55.5
Janvier	0.2	6.6	10.9	9.8	3.2	0.3	0.0
Février	0.1	5.0	8.1	9.9	4.5	0.6	0.0
Mars	0.0	2.8	9.2	11.5	6.2	1.3	0.0
Avril	0.0	1.5	6.4	11.5	9.1	1.4	0.0
Mai	0.0	0.7	6	14.0	9.3	1.0	0.0
Juin	0.0	1.1	7.8	14.3	6.3	0.5	0.0
Juillet	0.0	0.0	1.9	9.0	16.7	3.4	0.0
Aout	0.0	1.9	11.1	15.7	2.3	0.0	0.0
Septembre	0.0	2.5	9.8	13.7	3.7	0.2	0.0
Octobre	0.0	3.3	11.7	12.4	3.5	0.1	0.0
Novembre	0.1	6.1	10.2	10.5	2.8	0.2	0.0
Décembre	0.1	7.7	10.3	10.1	2.7	0.1	0.0
Nombre d'heures annuel « $n_i$ »	12	940.8	2481.6	3417.6	2100	218.4	0

Selon l'adage « *A défaut d'avoir ce que l'on veut, il faut se contenter de ce que l'on a.* », nous avons préconisé d'utiliser les données climatiques à savoir, l'humidité relative, la température et la durée d'ensoleillement pour estimer le rayonnement solaire.

Les études menées en Algérie par plusieurs équipes de chercheurs pour estimer l'irradiation globale du rayonnement solaire sont diverses et diversifiées. Mefti et Bouroubi [169] ont opté pour la fraction d'insolation, Merdaoui [170] a proposé de générer des données de rayonnement solaire à partir de la durée d'insolation, Gairaa et Benkacali [171] ont complété l'étude faite sur un plan horizontal en optant pour des inclinaisons. Pour ne citer que ceux-là, Bouchouicha [172], quant à lui, a appliqué six types de modèles pour exprimer l'indice de clarté en fonction de la fraction d'insolation à l'aide des données des moyennes mensuelles de la durée d'insolation pour les deux sites d'Adrar et d'Oran.

La moyenne annuelle d'ensoleillement est de 9.5 heures par jour pour le site de Timimoune avec un taux d'ensoleillement autour de 80%. Plusieurs modèles de régression sont utilisés pour exprimer le rayonnement solaire global sur un plan horizontal en fonction de la durée d'insolation [170, 171, 172].



### III.3 Dimensionnement de la pompe

Le dimensionnement d'une installation autonome nécessite, au préalable, tout en suivant quelques étapes, la connaissance de quelques paramètres à savoir [173] :

#### III.3.1 Evaluation des besoins en eau

Les besoins réels en eau de cette localité à desservir durant l'année, doivent être déterminés, afin de prévoir la capacité du réservoir et acquérir une autonomie du système.

En effet un réservoir, d'une capacité de 150 m<sup>3</sup>, est érigé dans le but d'asservir l'unique puits issu d'un forage dont le besoin en eau journalier n'excède pas cette capacité dans les cas les plus défavorables [3, 47, 101].

#### III.3.2 Durée de pompage

Le volume du réservoir d'eau étant V [m<sup>3</sup>], sous un débit nominal attendu de « Q<sub>n</sub>=17 m<sup>3</sup>/h » et une hauteur manométrique totale « HMT=30 m », la durée de pompage est donnée par [3] :

$$T_{\text{pompage}} = \frac{V}{Q_n} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{An: } T_{\text{pompage}} = \frac{150}{17} = 8.8235 \text{ heures} = 8\text{heures } 49\text{minutes } 24\text{secondes} \approx 9\text{heures}$$

#### III.3.3 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

La puissance hydraulique nécessaire pour déplacer l'eau d'un point à un autre est donnée par :

$$P_H = \rho_{\text{eau}} \times g_t \times \text{HMT} \times Q_n \quad (\text{III.3})$$

$$\text{An: } P_H = 1000 \times 9,81 \times 30 \times \frac{17}{3600} \approx 1390 \text{ W}$$

#### III.3.4 Puissance mécanique

La pompe centrifuge ayant un rendement de 55% a besoin d'une énergie mécanique de :

$$P_{\text{méc}} = \frac{P_H}{\eta_{\text{pompe}}} \quad (\text{III.4})$$

$$\text{An: } P_{\text{méc}} = \frac{1390}{0.55} \approx 2527 \text{ W}$$

La puissance mécanique est, généralement, donnée par le constructeur de la pompe pour pouvoir choisir le moteur d'entraînement [3].

### III.3.5 Puissance électrique

De la puissance mécanique «  $P_{\text{méc}}$  » et de la valeur du rendement du moteur «  $\eta_{\text{moteur}}$  » à utiliser, il est possible de déterminer la puissance électrique «  $P_{\text{élec}}$  » indispensable pour le fonctionnement du moteur. Le rendement de ce moteur est de 85% d'où [3, 47,101] :

$$P_{\text{élec}} = \frac{P_{\text{méc}}}{\eta_{\text{moteur}}} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{An: } P_{\text{élec}} = \frac{2527}{0.85} = 2973 \text{ W}$$

### III.3.6 Puissance délivrée nécessaire

La puissance électrique, réellement demandée, inclue la consommation des convertisseurs statiques utilisés dans la chaîne d'énergie, notamment, les onduleurs possédant un rendement de 95% [3, 47,101].

$$P_{\text{délivrée}} = \frac{P_{\text{élec}}}{\eta_{\text{onduleur}}} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{An: } P_{\text{délivrée}} = \frac{P_{\text{élec}}}{\eta_{\text{onduleur}}} = \frac{2973}{0.95} \simeq 3130 \text{ W}$$

Le rendement total de l'installation peut être calculé comme étant le produit de tous les rendements des actionneurs intervenants dans la chaîne de pompage, il est donné par :

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{onduleur}} \times \eta_{\text{Masde}} \times \eta_{\text{pompe}} \quad (\text{III.7})$$

$$\text{An: } \eta_{\text{total}} = 0.95 \times 0.85 \times 0.55 = 0.444$$

La puissance électrique demandée peut se calculer à l'aide du théorème de Bernoulli et pour simplifier au maximum tous ces calculs, les praticiens utilisent la formule suivante avec un correcteur d'unité d'une valeur de « 0.367 ».

$$P_{\text{délivrée}} = \frac{Q \times \text{HMT}}{0.367 \times \eta_{\text{total}}} \quad [\text{Watts}] \quad (\text{III.8})$$

$$\text{Application numérique : } P_{\text{délivrée}} = \frac{17 \times 30}{0.367 \times 0.444} \simeq 3130 \text{ W}$$

### III.3.7 Energie électrique nécessaire

Le besoin de la charge en énergie électrique est évalué en tenant compte de la durée journalière de pompage tel que :

$$E_c = P_{\text{délivrée}} \times T_{\text{pompage}} \quad [\text{kWh/jour}] \quad (\text{III.9})$$

An:  $E_c = 3130 \times 9 = 28.17 \text{ kWh/jour}$

### III.4 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

La détermination de l'énergie solaire disponible est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières, mensuelles, de l'irradiation solaire disponible, par consultation des données climatiques de la région, notamment, l'irradiation, ombres, températures, brouillard, microclimat,...etc [3, 17].

#### III.4.1 Puissance du générateur photovoltaïque

La puissance du générateur photovoltaïque «  $P_g$  » est fonction de l'énergie journalière demandée par la charge «  $E_c$  », de la durée de pompage «  $T_{\text{pompage}}$  », nécessaire pour satisfaire les besoins journaliers en eau et des pertes causées par la poussière sur les panneaux photovoltaïques et leurs températures [3, 17].

$$P_g = \frac{E_c}{T_{\text{pompage}} \times (1 - \sum \text{pertes})} = \frac{P_{\text{délivrée}}}{1 - \sum \text{pertes}} \quad (\text{III.10})$$

Les pertes de puissance attribuables à la température et à la poussière sont supposées présenter, dans les pires des cas, un cinquième de la puissance délivrée par l'ensemble des modules [3].

An:  $P_g = \frac{3130}{1-0.2} \simeq 3912.5 \text{ W}$

#### III.4.2 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques

La méthode la plus simple pour déterminer le nombre de panneaux à utiliser, consiste à calculer, «  $P_s$  », la puissance normalisée du panneau sous les conditions « Noct » d'un panneau standard à partir des données d'irradiation du lieu et ensuite chercher combien de panneaux sont nécessaires, pour compenser la consommation [3, 47, 101].

Afin de déterminer la puissance normalisée du GPV à utiliser, le dimensionnement sera effectué pour une installation photovoltaïque, avec des panneaux solaires normalisés de type SIEMENS SM 110-24 ayant une puissance nominale normalisée de 110Wc [3, 47,101].

Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du module ( $I_{sc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{mpp}$ ) sous les conditions standard de fonctionnement, notamment une insolation de 1000W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C (AM 1.5) (voir Annexe 4.1).

**Tableau (III.3)** : Paramètres du module photovoltaïque SIEMENS SM 110-24.

Paramètres		Valeurs
Puissance maximale du panneau.	« P <sub>OP</sub> »	110 W
Courant au point de puissance maximale.	« I <sub>OP</sub> »	3,15 A
Tension au point de puissance maximale.	« V <sub>OP</sub> »	35 V
Courant de court-circuit.	« I <sub>CC</sub> »	3,45 A
Tension en circuit ouvert.	« V <sub>CO</sub> »	43,5 V
Coefficient d'incrémentement du courant I <sub>CC</sub> .	« α <sub>T</sub> »	1,4 mA/°C
Coefficient d'incrémentement de la tension V <sub>CO</sub> .	« β <sub>T</sub> »	-152 mV/°C

### III.4.3 Détermination du nombre de panneaux photovoltaïques

#### a) Calcul du nombre de panneaux photovoltaïques

Le nombre de panneaux nécessaires se calcule donc par [3, 47, 101] :

$$N_p = \frac{P_g}{P_{OP}} \quad (\text{III.11})$$

An:  $N_p \geq \frac{3912.5}{110} = 35,56$  panneaux.

Le nombre de panneaux requis est donc de 36 panneaux.

#### b) Puissance normalisée du GPV

La puissance normalisée du GPV sera donc [3, 47, 101] :

$$P_{GPV} = N_p \times P_{OP} \quad (\text{III.12})$$

An :  $P_{GPV} = 36 \times 110 = 3960W$

#### c) Valeur de la tension du bus continu

Pour un onduleur dont les tensions simples de valeurs efficaces  $V_{eff}$ , la tension du bus continu doit obéir à la relation suivante :

$$V_{bus} \geq \sqrt{2} \times \sqrt{3} \times V_{eff} + 2 \times V_{CE(IGBT)} + 2(R_{filtre} + L_{filtre} \times \omega)\hat{i} \quad (\text{III.13})$$

Pour une tension efficace pouvant atteindre 240V et des chutes de tension dans les semi-conducteurs « $V_{CE(IGBT)}=3V$ » ainsi que dans le filtre de sortie RL ayant comme caractéristiques « $L_{filtre}=15mH$ ,  $R_{filtre}=0.5721\Omega$ » et pour un courant moyen  $\hat{i}=1.23A$ .

La tension du bus continu doit être supérieure à 607 V :  $V_{bus} \geq 607 V$

Il est intéressant d'opter pour  $V_{bus} = 630 V$ , une valeur légèrement supérieure à la valeur calculée, afin de pouvoir fonctionner dans toutes les conditions.

**d) Nombre de panneaux en série**

La tension continue de l'onduleur est de 630 Volts, le nombre de panneaux photovoltaïques à brancher en série sera donc [3, 47, 101] :

$$N_{PV\text{série}} = \frac{V_{\text{bus}}}{V_{\text{OP}}} \quad (\text{III.14})$$

An :  $N_{PV\text{série}} = \frac{630}{35} = 18$  panneaux en série

**e) Nombre de branches en parallèle**

Le courant nominal de la machine asynchrone à double étoile est de 6.5 A, le nombre de branches de panneaux photovoltaïques en parallèle sera donc [3, 47, 101] :

$$N_{PV//} = \frac{I_{\text{nominal}}}{I_{\text{OP}}} \quad (\text{III.15})$$

An :  $N_{PV//} = \frac{6.5}{3.15} \approx 2$  branches de panneaux en parallèle

**III.5 Dimensionnement de la turbine****a) Puissance électrique à utiliser**

Dans la station de pompage en étude, le GPV est considéré comme énergie primaire, donc, il est légitime de s'appuyer sur le GPV pour dimensionner l'éolienne implantée dans le site où la vitesse du vent moyenne est de 6.23m/s d'après le tableau (III.2). La puissance électrique acquise qui représente la puissance normalisée est :  $P_{\text{élec}}=3960\text{W}$ .

**b) Puissance mécanique**

La GASDE utilisée pour la conversion possède un rendement de 0,88 et un glissement négatif de 1% et le gain du multiplicateur de vitesse est de 0,9 [100, 101] (voir Annexe 4.2).

La puissance mécanique nécessaire pour faire pivoter les pales de l'éolienne est [101] :

$$P_{\text{méc}} = \frac{P_{\text{élec}}}{\eta_{\text{Multi}} \times \eta_{\text{GASDE}}} \quad (\text{III.16})$$

$$\text{Application numérique : } P_{\text{méc}} = \frac{3960}{0.9 \times 0.88} = 5000\text{W}$$

**c) Détermination de la longueur des pales**

La longueur des pales est donnée par [100, 101] :

$$R = \sqrt[3]{\frac{2 \times P_{\text{méc}}}{\rho_{\text{air}} \times \pi \times C_p \times v_w^2}} \quad (\text{III.17})$$

$$\text{Application numérique : } R = \sqrt[3]{\frac{2 \times 5000}{1.22 \times \pi \times 0.48 \times 6.5^2}} = 5.04 \approx 5\text{m.}$$

D'après les caractéristiques de l'éolienne à trois pales (voir Annexe A2), les coefficients correspondants sont :  $C_p = 0.48$  et  $\lambda = 8$  [100, 101].

#### d) Vitesse des pales

La vitesse des pales est donnée par :

$$N = \frac{30 \times \lambda \times v_w}{\pi \times R} \quad (\text{III.18})$$

Application numérique :  $N = \frac{30 \times 8 \times 6.5}{\pi \times 5} = 98.36 \text{ tr/mn}$

#### e) Rapport de multiplication

Le coefficient multiplicateur est ainsi obtenu par :

$$K = \frac{N_s}{N} \quad (\text{III.19})$$

An :  $K = \frac{N_s}{N} = \frac{3000}{98.36} = 30.50$

Ainsi les pales de l'éolienne utilisée possèdent une longueur de 5 m et un multiplicateur de vitesse ayant un rapport  $K = 30,5$  [100, 101].

### III.6 Dimensionnement de la pile à combustible

Dans cette application, la pile à combustible est appelée à nous garantir une tension de 630Volts au bus continu nécessaire aux deux onduleurs, pour fournir le système des tensions servant à alimenter les deux étoiles de la MASDE. Donc, pour dimensionner la pile à combustible, la puissance électrique à utiliser sera aussi de  $P_{\text{elec}} = 3960W$ .

La tension est dépendante des cellules qui doivent être assemblées en série, tout en sachant que chaque cellule fournit entre 0 et 1,1Volts. Par contre le courant est dépendant de la surface totale d'une cellule [47, 53, 54].

Pour un rendement de 60%, la tension de fonctionnement est de 0,63V/cellule et la densité de courant est de 1300mA/cm<sup>2</sup> [47, 53, 54].

Le nombre de cellule sera donc de :

$$N_{\text{cellule}} = \frac{U_{FC}}{U_{\text{cellule}}} \quad (\text{III.20})$$

L'application numérique donne :  $N_{\text{cellule}} = \frac{630}{0.63} = 1000$  cellules

Le courant sera donc :

$$I_{FC} = \frac{P_{\text{elec}}}{U_{FC}} \quad (\text{III.21})$$

La valeur du courant sera donc :  $I_{FC} = \frac{3960}{630} = 6.29 \text{ A}$

La surface nécessaire est obtenue par l'utilisation de la densité du courant :

$$S = \frac{I_{FC}}{dI_{FC}} \quad (\text{III.22})$$

La surface requise donc est de :  $S = \frac{6.29}{1300.10^{-3}} = 4.83 \text{ cm}^2$

**Tableau (III.4) : Récapitulation des dimensionnements des diverses sources.**

Désignation	Valeur	Désignation	Valeur
Temps de pompage	9 heures	Rendement des onduleurs	0.95
Volume du réservoir	150 m <sup>3</sup>	Rendement de la MASDE	0.85
Débit	17 m <sup>3</sup> /h	Rendement de la pompe	0.55
Hauteur manométrique totale	30 m	Rendement total	0.444
<b>Générateur photovoltaïque</b>			
Désignation	Valeur	Désignation	Valeur
Puissance normalisée	3960 W	Nombre de panneaux	36
Nombre de panneaux en série	18	Branche en parallèle	2
<b>Eolienne</b>		Puissance mécanique	5000 W
Désignation	Valeur	Désignation	Valeur
Rendement de la GASDE	0.88	Gain du multiplicateur	0.9
Coefficient multiplicateur	30.5	Rayon de la pale	5 m
<b>Pile à combustible</b>		Nombre de cellules	1000
Désignation	Valeur	Désignation	Valeur
Courant	6.29 A	Surface	4.83 cm <sup>2</sup>
<b>Carburant</b>	Hydrogène	Comburant	Oxygène

### III.7 Essais sur le GPV

#### III.7.1 Influence de l'ensoleillement sur les performances du GPV

Les essais sont effectués à une température constante de  $T = 25 \text{ °C}$  pour différentes valeurs de l'ensoleillement  $G_s$  et la figure (III.3) montre clairement que la baisse de l'éclairement  $G_s$  entraîne une diminution du courant de court-circuit, par contre, la tension de circuit ouvert diminue faiblement.

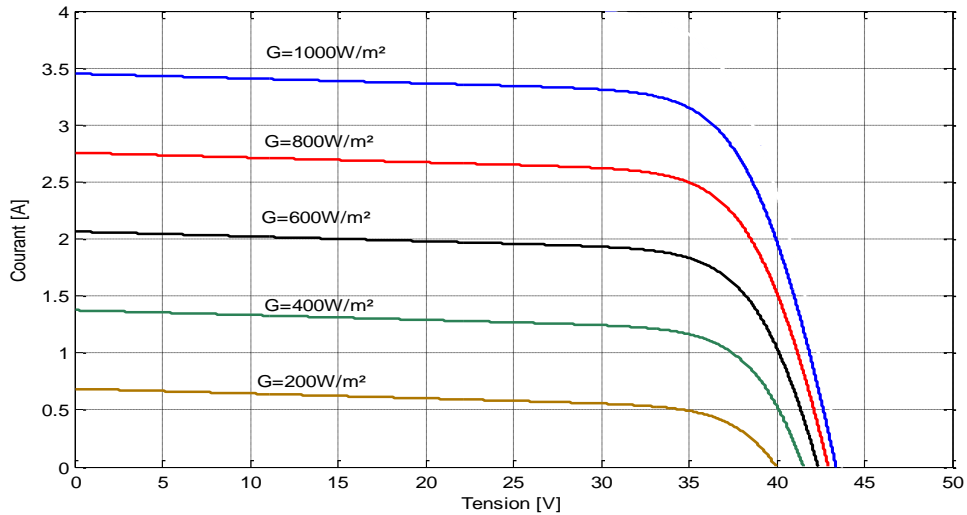


Figure III.3 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique  $I_{GPV} = f(V_{GPV})$

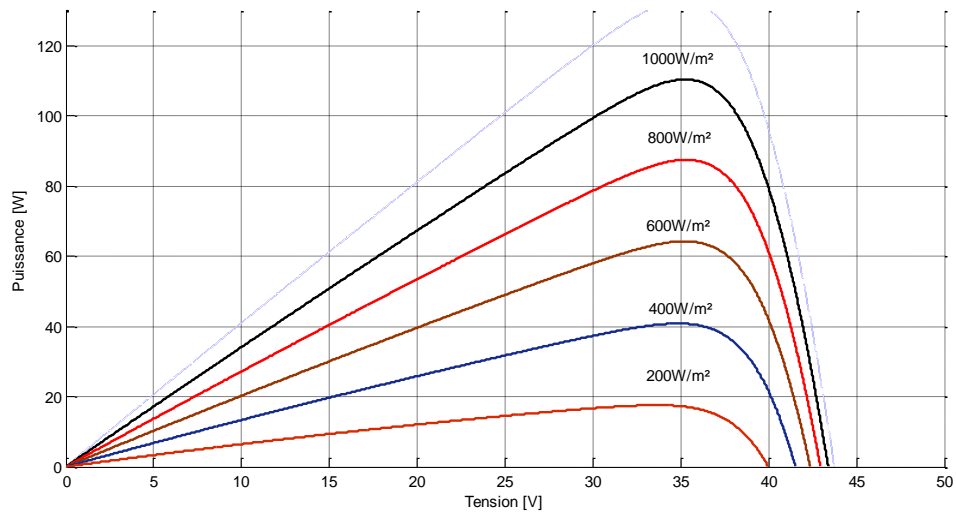


Figure III.4 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique  $P_{GPV} = f(V_{GPV})$

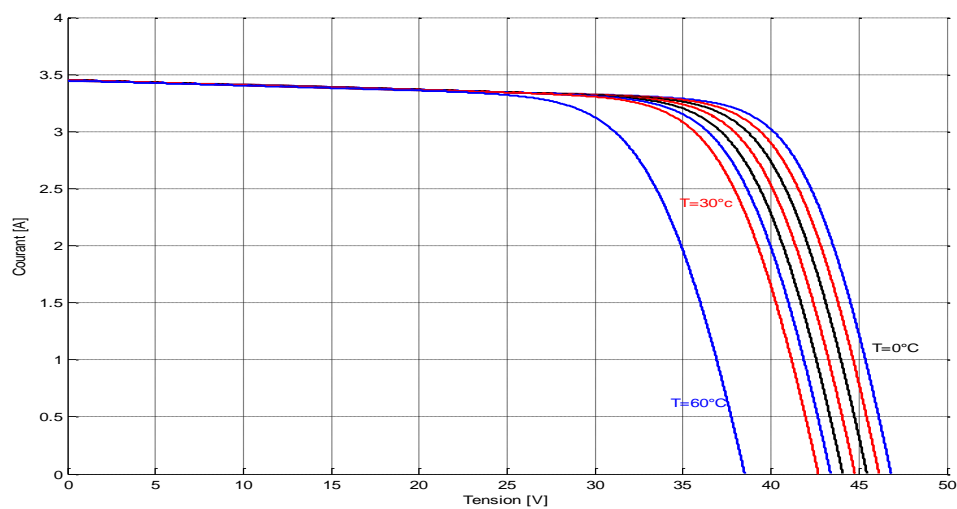


Figure III.5 : Influence de la température sur la caractéristique  $I_{GPV} = f(V_{GPV})$



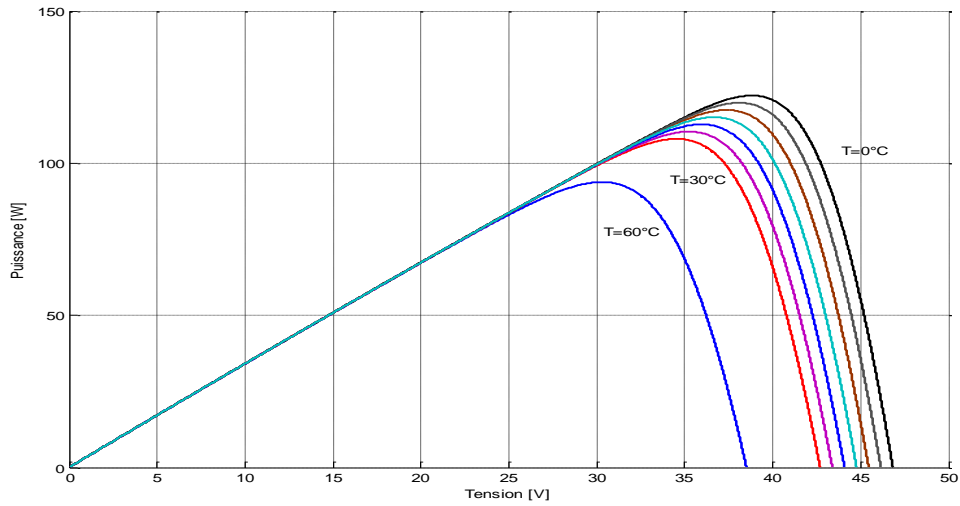


Figure III.6 : Influence de la température sur la caractéristique  $P_{GPV} = f(V_{GPV})$

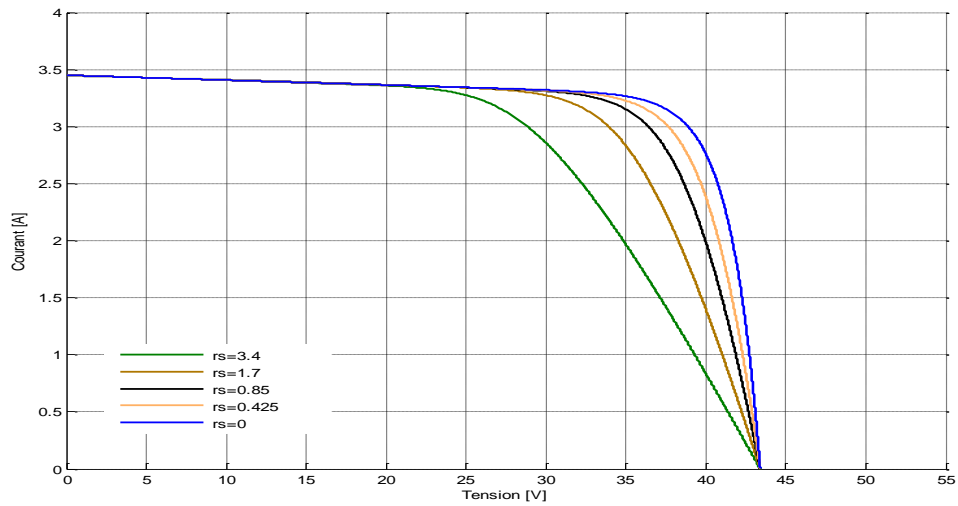


Figure III.7 : Influence de la résistance série sur les caractéristiques du GPV

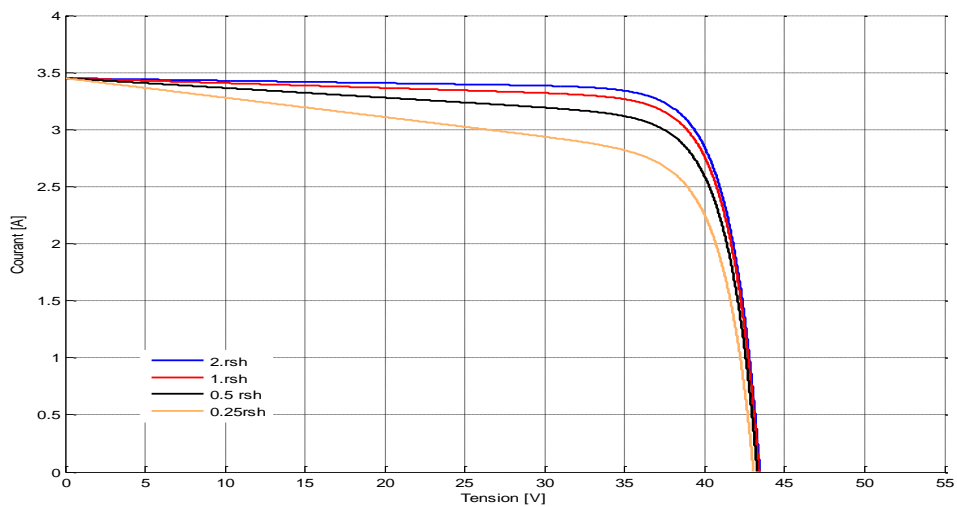


Figure III.8 : Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques du GPV

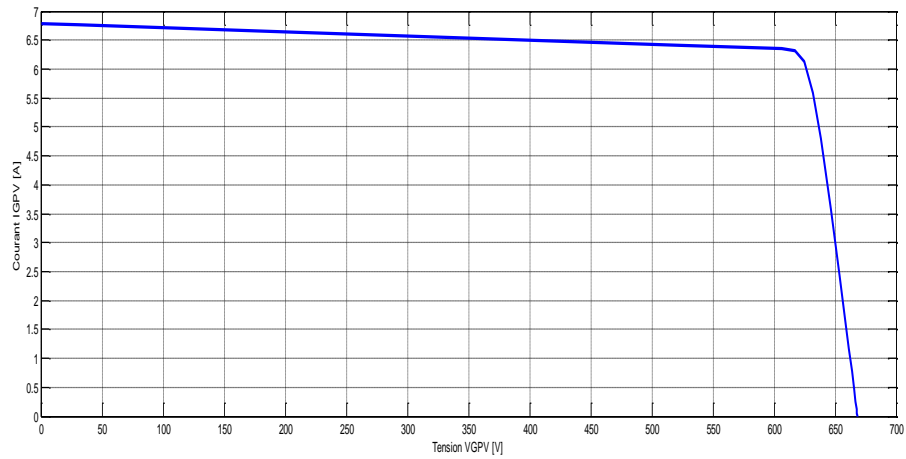


Figure III.9 : Caractéristique  $I_{GPV} = f(V_{GPV})$  du champ photovoltaïque

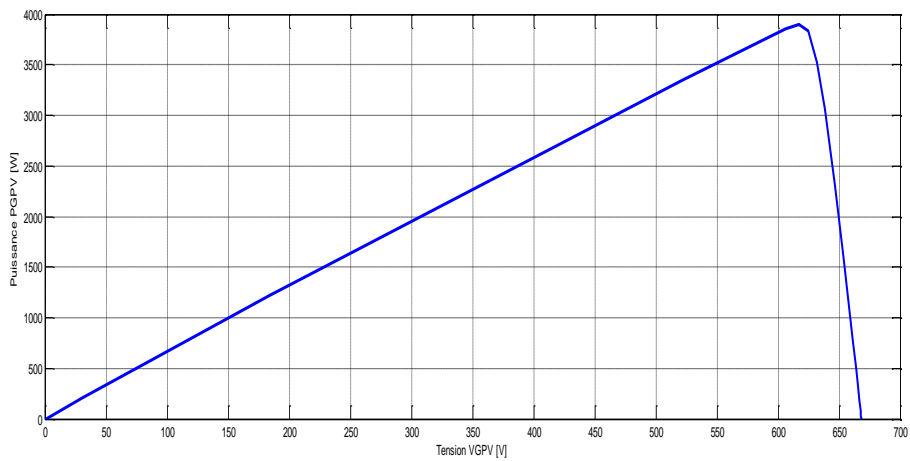


Figure III.10 : Caractéristique  $P_{GPV} = f(V_{GPV})$  du champ photovoltaïque

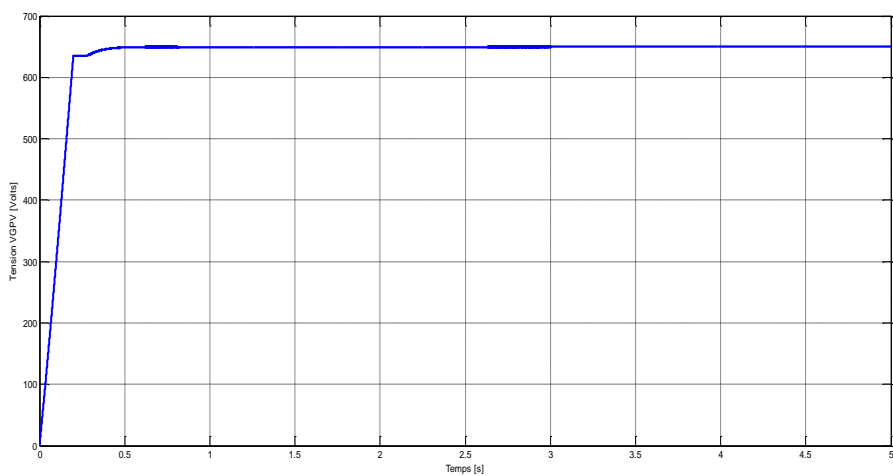


Figure III.11 : Tension générée du champ photovoltaïque

Pour les mêmes conditions d'essais, la puissance générée diminue considérablement si l'éclairement diminue et la figure (III.4) montre que le point optimal chute rapidement.

Les caractéristiques du champ photovoltaïque sont représentées par la figure (III.9) pour  $P_{GPV} = f(V_{GPV})$  et la figure (III.10) pour  $I_{GPV} = f(V_{GPV})$  et la tension générée pour un ensoleillement donné est représentée par la figure (III.11).

### III.7.2 Influence de la température sur les performances du GPV

Pour un ensoleillement maintenu constant à 1 kW/m<sup>2</sup>, des simulations sont réalisées pour des diverses valeurs de la température T, qui vraisemblablement a une influence sensible sur les propriétés électriques du semi-conducteur.

Les courbes sont obtenues pour des températures variant de 0°C à 30°C avec un pas de 5°C et à titre comparatif pour une valeur de 60°C.

Les courbes de la figure (III.5) montrent que le courant de court-circuit est faiblement dépendant de la température alors que la tension à vide diminue sensiblement si la température augmente.

La puissance optimale varie inversement avec la température telle qu'elle est illustrée par la figure (III.6), ce qui permet de ne pas confondre température du soleil exprimée en degré et son rayonnement exprimé en W/m<sup>2</sup>.

Après cette comparaison, nous pouvons confirmer que les caractéristiques du module photovoltaïque  $P_{GPV} = f(V_{GPV})$  et  $I_{GPV} = f(V_{GPV})$  varient en fonction de la température.

### III.7.3 Influence de la résistance série et shunt sur la caractéristique PV du module.

La résistance interne de la cellule représentée par la résistance série dépend, principalement, de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [3].

L'influence de la résistance série se constate sur la partie où la photodiode se comporte comme un générateur de tension.

Cette résistance agit sur la pente de cette caractéristique, elle est responsable de la diminution de la valeur du courant de court-circuit.

Le courant de fuite par l'effet de bord autour de la cellule solaire est caractérisé par la résistance shunt qui est, généralement, de valeur très élevée et son effet se manifeste surtout dans la partie génération du courant [3].

### III.8 Simulation numérique de la MASDE alimentée par le réseau électrique

Il est intéressant d'alimenter la machine via le réseau électrique, pour pouvoir étudier son comportement. En effet deux sources de tensions triphasées équilibrées décalées entre elles d'un angle «  $\alpha = 30^\circ$  », sont utilisées pour alimenter les deux étoiles de la machine (voir A4.3).

#### III.8.1 Sources de tension alimentant les deux étoiles de la machine

$$\left\| \begin{array}{l} V_{a1} = V_m \cdot \sin(\omega_s \times t) \\ V_{a2} = V_m \cdot \sin(\omega_s \times t - \pi/6) \\ V_{b1} = V_m \cdot \sin(\omega_s \times t - 2\pi/3) \\ V_{b2} = V_m \cdot \sin(\omega_s \times t - 5\pi/6) \\ V_{c1} = V_m \cdot \sin(\omega_s \times t - 4\pi/3) \\ V_{c2} = V_m \cdot \sin(\omega_s \times t - 3\pi/2) \end{array} \right. \quad (\text{III.23})$$

Les tensions sont illustrées par la figure (III.12). Dans ce qui suit, la machine, tout d'abord, tourne à vide, puis, est appliquée une charge d'une valeur du couple résistant égale à 14 Nm dans l'intervalle de temps [1s, 2.5s], ensuite la charge est déconnectée dans l'intervalle [2.5s, 3.5s] et au-delà de  $t = 3.5s$ , une charge d'une valeur négative de -14 Nm est connectée.

#### III.8.2 Vitesse de rotation

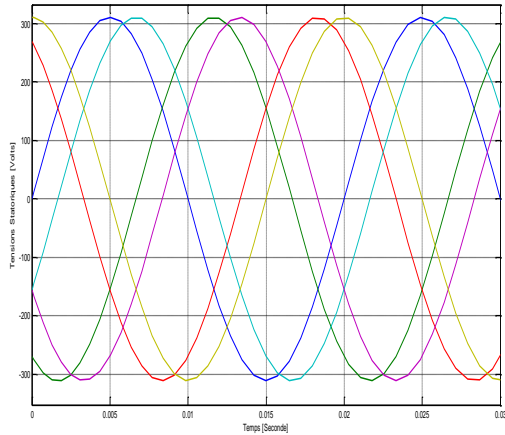
Au démarrage, la machine étant à vide, la vitesse augmente d'une manière presque linéaire pour atteindre la vitesse de '313.83 rd/s' très proche de la vitesse de synchronisme qui est de ' $\Omega_s = 314.159$  rd/s' (figure III.14).

Lors de la connexion de la charge ' $C_r = 14$  Nm', la machine fonctionne comme moteur et la vitesse de rotation glisse jusqu'à ' $\Omega = 298$  rd/s', puis, au moment où la charge est séparée, l'arbre de la machine retrouve sa vitesse proche de celle du synchronisme et immédiatement après l'application de la charge ' $C_r = -14$  Nm', la machine fonctionne comme génératrice et l'arbre de la machine est entraîné à une vitesse de rotation de '327.35 rd/s'.

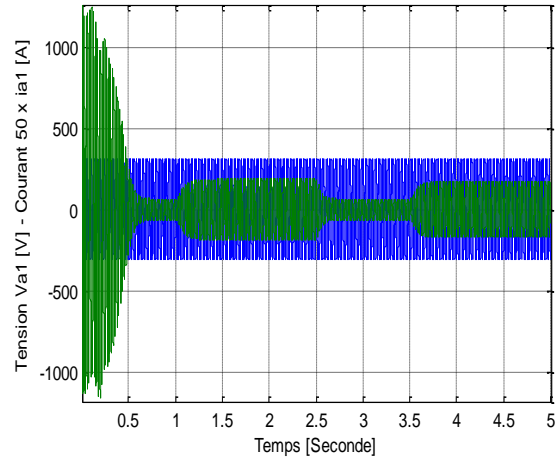
#### III.8.3 Couple électromagnétique

Au démarrage, le couple prend une forme vibratoire et atteint des valeurs proches de 80 Nm, puis s'estompent avant d'atteindre une valeur à vide de ' $C_r = 0.32$  Nm' qui correspond aux pertes mécaniques par frottement et par ventilation (figure III.15).

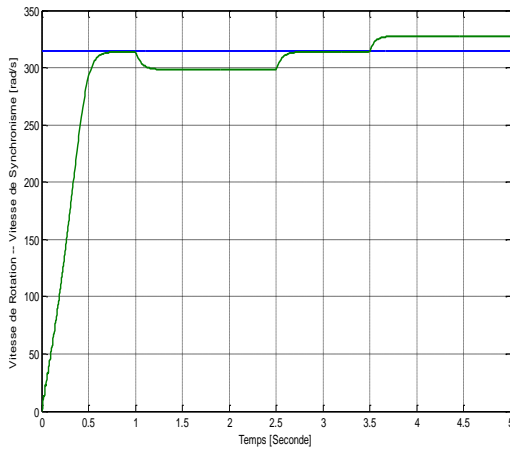
Lors de la connexion de la charge, le couple atteint '14.3 Nm' en suivant la valeur de la consigne. Le couple reprend sa valeur à vide, puis en entraînant la machine à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme, le couple suit de près la référence du couple résistant, ainsi le couple électromagnétique passe à ' -13.7 Nm ' lors du fonctionnement en mode génératrice.



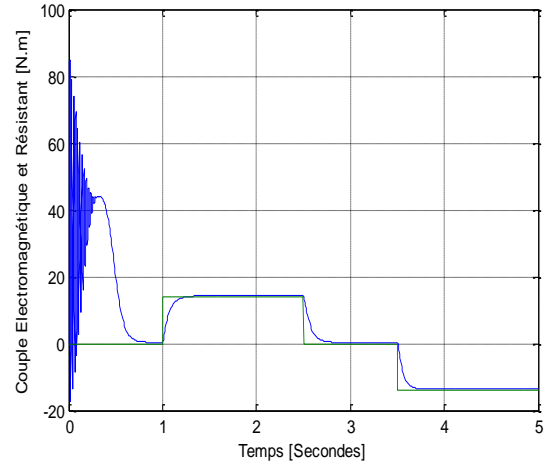
**Figure (III.12) :**  
Allure des deux sources de tensions triphasées décalées de 30°



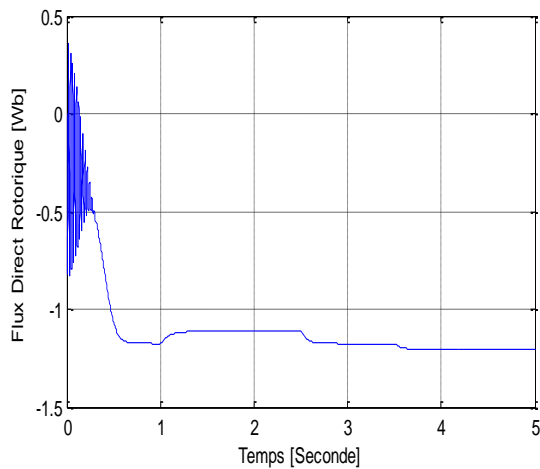
**Figure (III.13) :**  
Tension statorique et courant statorique  $V_{a1} - i_{a1}$



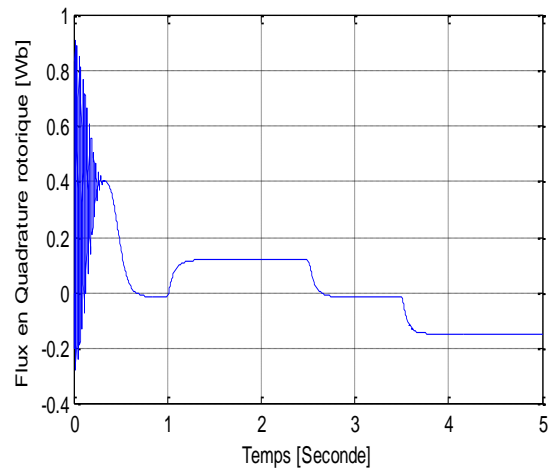
**Figure (III.14) :** Vitesse de rotation  $\Omega$  et Vitesse de synchronisme  $\Omega_s$  [rd/s]



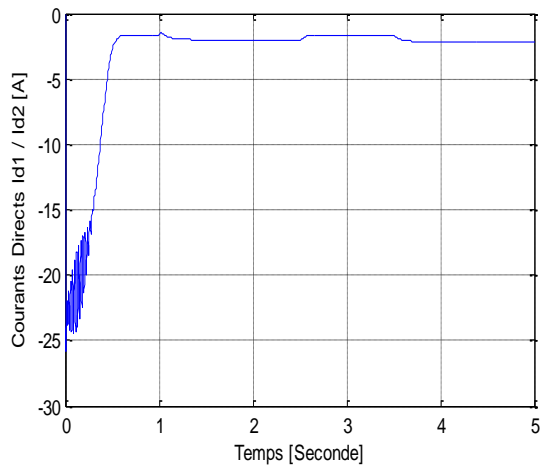
**Figure (III.15) :** Couple électromagnétique [Nm] et Couple résistant [Nm]



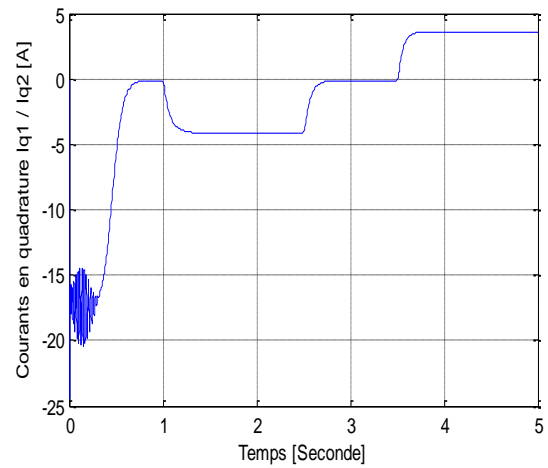
**Figure (III.16) :** Flux direct rotorique [Wb]



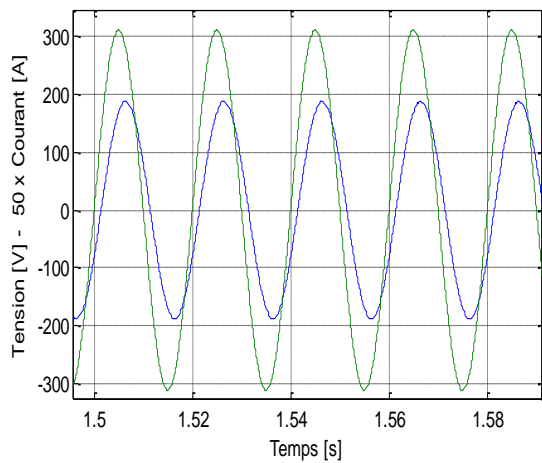
**Figure (III.17) :** Flux en quadrature rotorique [Wb]



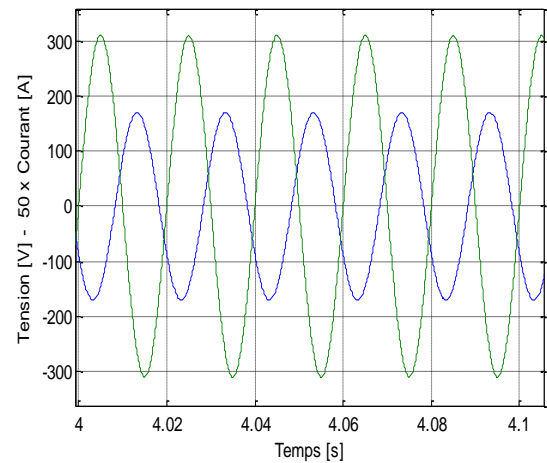
**Figure (III.18) :** Composante directe du courant  $I_{d1}$  &  $I_{d2}$



**Figure (III.19) :** Composante en quadrature du courant  $I_{q1}$  &  $I_{q2}$



**Figure (III.20) :**  
Allure du courant et de la tension en fonctionnement 'Moteur'



**Figure (III.21) :**  
Allure du courant et de la tension en fonctionnement 'Générateur'

### III.8.4 Flux rotorique

Selon les figures (III.16) et (III.17), l'allure du flux rotorique direct et du flux rotorique en quadrature ressemble de très près à l'allure du couple électromagnétique figure (III.15).

Les diverses valeurs des deux composantes du flux selon les différents modes de fonctionnement de la machine sont résumées par le tableau (III.5)

**Tableau (III.5) :** Diverses valeurs des composantes du flux rotorique

	Vide [0s ; 1s]	Moteur [1s ; 2.5s]	Vide [2.5s ; 3.5s]	Générateur [3.5s ; 5s]
Flux direct rotorique $\phi_{dr}$ [Wb]	-1.1753	-1.114	-1.1753	-1.2023
Flux en quadrature rotorique $\phi_{qr}$ [Wb]	-0.0157	0.1181	-0.0157	-0.1491

### III.8.5 Courants direct et en quadrature

Selon les figures (III.18) et (III.19), les allures des composantes directes et en quadrature du courant évoluent d'une manière analogue à l'évolution de la vitesse de rotation de la machine (figure III.14).

Au démarrage de la machine, quelques vibrations sont enregistrées pendant près de 0.4 seconde, atteignant pour les courants directs les valeurs de  $I_{d1} = I_{d2} = -24.4$  A et pour la valeur du courant selon l'axe en quadrature  $I_{q1} = I_{q2} = -20$  A, avant que les courants ne prennent des valeurs finales résumées dans le tableau (III.6) selon le mode de fonctionnement de la machine.

**Tableau (III.6) :** Valeurs des composantes du Courant selon l'axe «  $d - q$  »

	Vide [0s ; 1s]	Moteur [1s ; 2.5s]	Vide [2.5s ; 3.5s]	Générateur [3.5s ; 5s]
Courants directs $I_{d1} - I_{d2}$ [A]	-1.63	-2.00	-1.63	-2.13
Courants en quadrature $I_{q1} - I_{q2}$ [A]	-0.11	-4.14	-0.11	3.6

### III.8.6 Courants statoriques

Au démarrage, les courants absorbés par les deux étoiles du stator atteignent des valeurs de presque quatre fois le courant nominal soit '24 A'. Dans le cas des répétitions excessives, ces courants de démarrage peuvent être à l'origine de la destruction par échauffement des enroulements du stator de la machine. Le régime permanent est atteint après une période de '0.6 seconde ' et la machine absorbe un courant d'une valeur '1.33 A' à vide.

Lors de la connexion de la charge, la machine absorbe du réseau davantage de courant selon la nature de la charge. En mode moteur le courant oscille autour de '3.7 A', par contre, en fonctionnement générateur le courant passe à '3.4 A' environ.

L'effet inductif de la machine explique le déphasage en arrière du courant statorique  $i_{a1}$  par rapport à la tension d'alimentation  $v_{a1}$ . Le sens de transition de la puissance est positif du fait que les deux grandeurs sont de même signe, cela veut dire que la machine absorbe de l'énergie active et réactive nécessaire pour l'alimentation de la charge et pour sa magnétisation.

En mode générateur, le fait que la tension  $v_{a1}$  et le courant  $i_{a1}$  sont presque déphasés de  $\pi$ , la puissance produite est de signe négatif, cela veut dire que la machine fournit de l'énergie active à la source et absorbe une certaine portion de l'énergie réactive nécessaire pour sa magnétisation.

### III.9 Simulation numérique de la MASDE alimentée par des onduleurs de tension

Si la machine asynchrone est connectée directement au réseau électrique, un handicap sérieux apparaît, celui « de ne pouvoir varier sa vitesse de rotation ». C'est pour cette simple raison que les applications industrielles optent pour une alimentation via des onduleurs de tension qui permettent, ainsi, ce contrôle, par action simultanée sur la fréquence et l'amplitude de la tension statorique.

Un onduleur autonome est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une source d'énergie alternative de fréquence fixe ou variable. Par un jeu de commutations commandées d'une manière appropriée, généralement, par modulation de largeur d'impulsion, la source est modulée afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée [127, 142, 146, 174].

Après un démarrage à vide, la machine est testée comme moteur puis comme générateur dans les mêmes conditions utilisées dans l'alimentation par réseau électrique.

#### III.9.1 Performances de l'onduleur

En effet les deux systèmes d'enroulement logés dans la partie fixe de la machine sont alimentés par deux onduleurs triphasés commandés par la technique 'MLI' ayant comme indice de modulation ' $m = 21$ ' et ' $r = 0.8$ ' comme coefficient de réglage de tension.

Les figures (III.22) et (III.23) représentent les allures de la modulante et de la porteuse. Les points d'intersections de ces deux courbes représentent les instants de commutation.

#### III.9.2 Vitesse de rotation

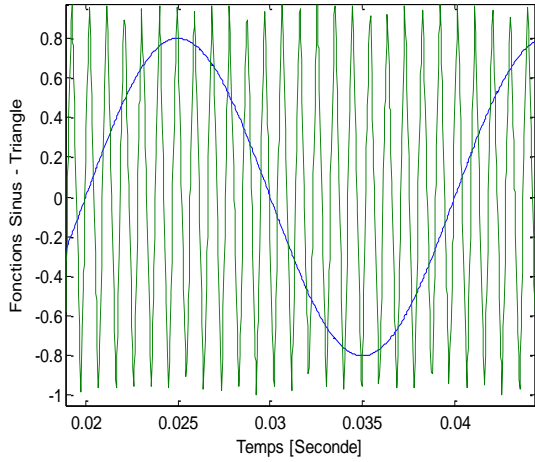
D'une manière analogue, la vitesse possède la même allure que pour l'essai effectué avec la machine alimentée directement par les sources de tension. La figure (III.24) montre qu'au démarrage, la vitesse atteint ' $313.8 \text{ rd/s}$ '.

Lors de la connexion de la charge, la vitesse de rotation glisse à ' $\Omega = 297 \text{ rd/s}$ ', puis reprend sa valeur à vide et l'arbre de la machine est entraîné à ' $328.15 \text{ rd/s}$ ' pour un fonctionnement en mode générateur.

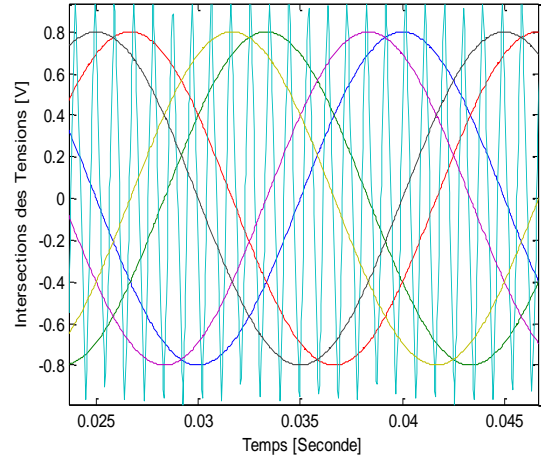
#### III.9.3 Couple électromagnétique

Le couple évolue exactement de la même manière que pour une alimentation par un réseau équilibré, mais présente par contre des ondulations autour de la valeur consignée par la charge comprises entre ' $-4 \text{ Nm}$ ' et ' $4 \text{ Nm}$ '. La présence d'harmoniques créées par les onduleurs de tension sont responsables de ces ondulations (figure III.25).

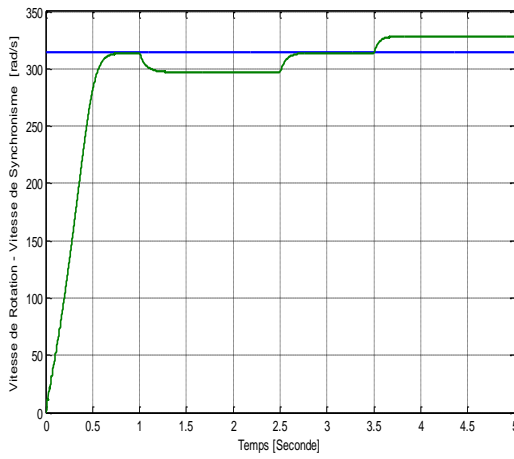




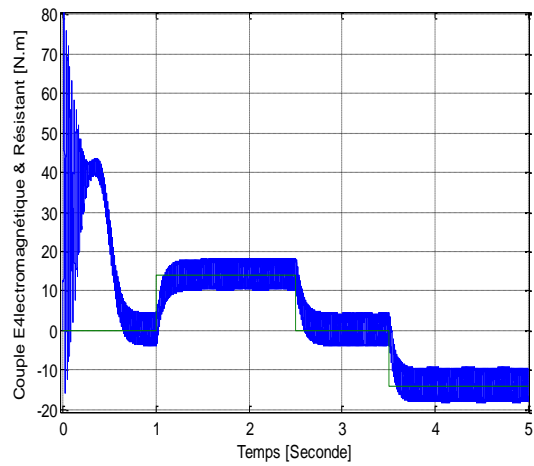
**Figure (III.22) :**  
Fonction sinus- Fonction triangle



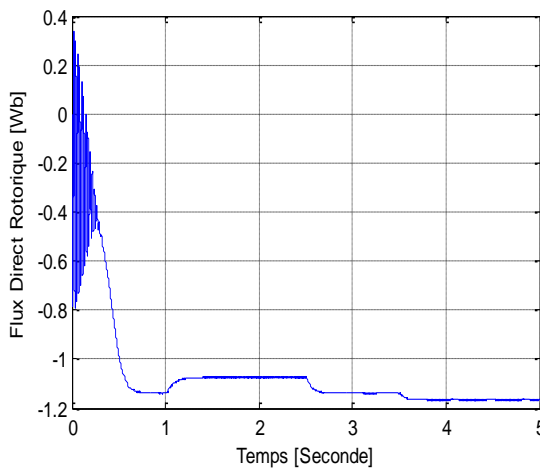
**Figure (III.23) :** Intersection tensions de référence et de la porteuse



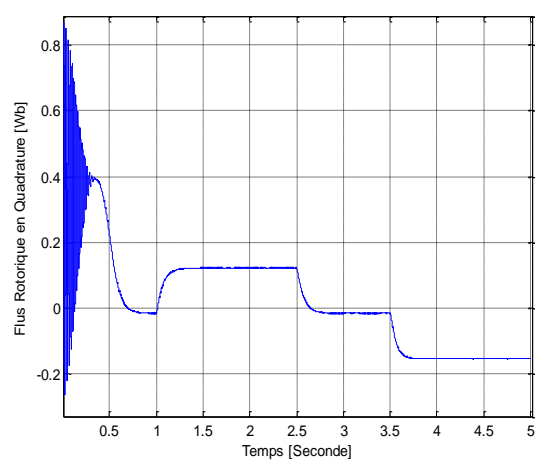
**Figure (III.24) :**  
Vitesse de rotation  $\Omega$  [rad/s] & Vitesse de synchronisme  $\Omega_s$  [rad/s]



**Figure (III.25) :**  
Couple électromagnétique [Nm] & Couple résistant [Nm]



**Figure (III.26) :** Flux direct rotorique [Wb]



**Figure (III.27) :** Flux en quadrature rotorique [Wb]

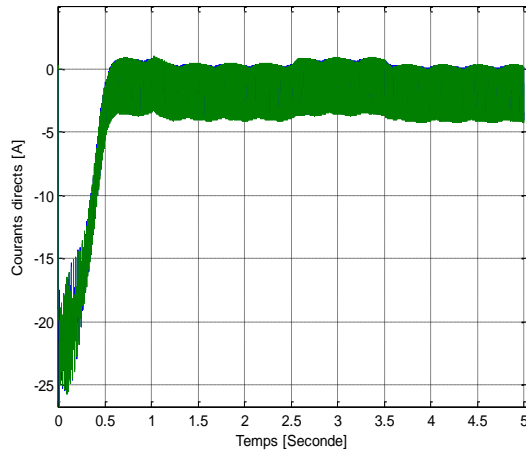


Figure (III.28) : Courants directs

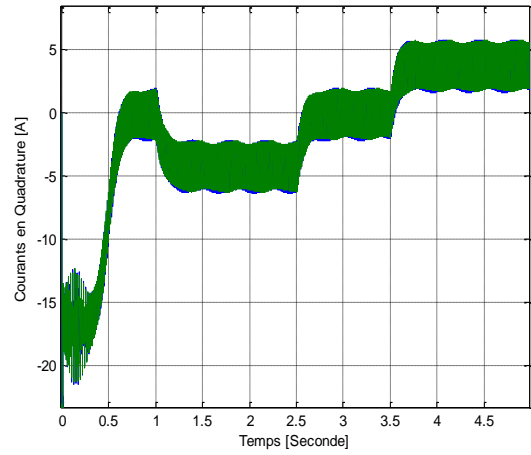


Figure (III.29) : Courants en quadratures

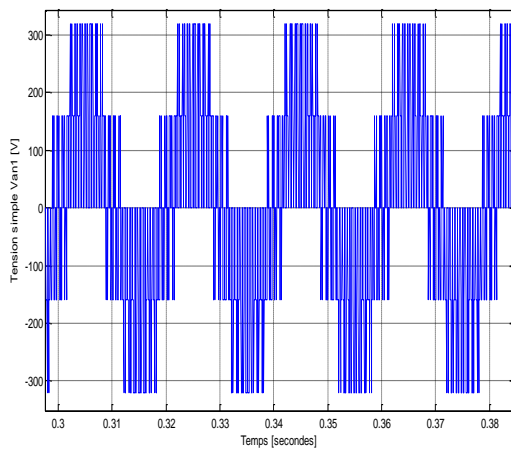


Figure (III.30) :  
Tension simple  $V_{an1}$

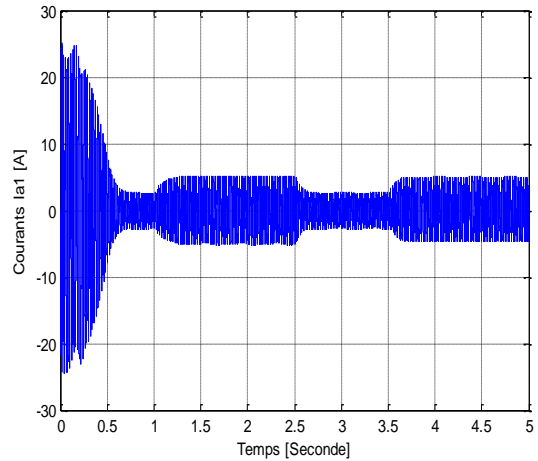


Figure (III.31) :  
Courant statorique  $i_{a1}$

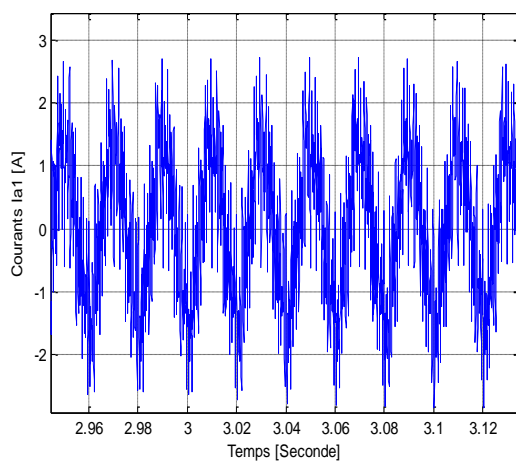


Figure (III.32) :  
Courant statorique  $i_{a1}$  'à vide'

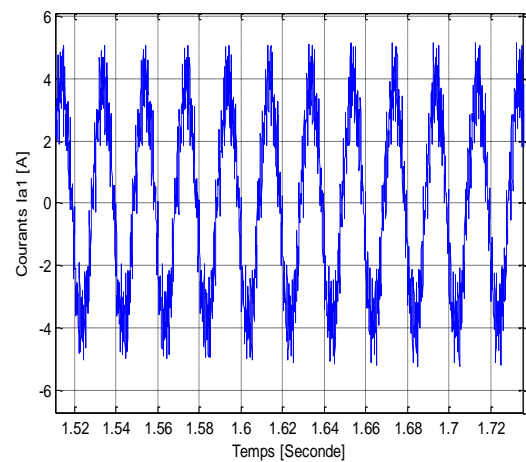


Figure (III.33) :  
Courant statorique  $i_{a1}$  'en charge'

### III.9.4 Flux rotorique & Courants directs et en quadrature

Selon les figures (III.26) et (III.27), l'apparence du flux rotorique direct et celle du flux rotorique en quadrature concordent de très près avec l'allure du couple électromagnétique.

Par contre les courants directs et en quadrature évoluent d'une manière similaire à celle de la vitesse de rotation. Les figures (III.28) et (III.29) où sont retracés les courants directs et en quadratures montrent d'une manière très claire les ondulations autour de la 'consigne'.

### III.9.5 Courants statoriques

Au démarrage, les courants absorbés par les deux étoiles du stator atteignent des valeurs de quatre à cinq fois les valeurs nominales, chose qui peut endommager la machine. Le régime permanent est rapidement atteint et les valeurs obtenues lors de cet essai sont un peu plus grandes que celles trouvées lors de l'alimentation directement par le réseau électrique.

Ainsi à vide, la machine absorbe un courant de presque « 2 A » figure (III.32) et en charge, le courant absorbé est de « 4 A » figure (III.33).

### III.10 Simulation numérique de la GASDE

La GASDE en fonctionnement autonome, c'est-à-dire en mode auto-excitée est simulée dans le but de déterminer ses performances et ses limites d'utilisation.

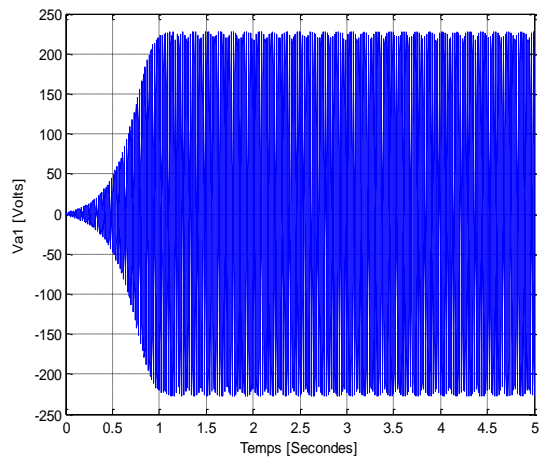
Ainsi, la génératrice est testée d'abord à vide, donc sans charge, puis testée avec des charges, généralement, des charges résistives ou bien encore des charges inductives avec des condensateurs de l'auto-amorçage d'une valeur  $C_1 = C_2 = 40\mu F$ .

La valeur de ces condensateurs influe sur la tension débitée, raison pour laquelle, un essai avec des différentes valeurs des condensateurs sera effectué en guise de comparaison

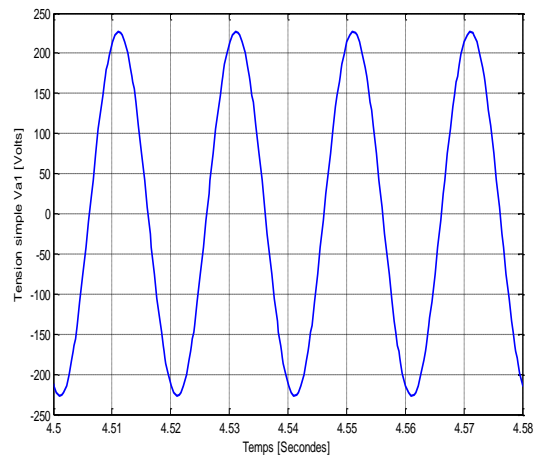
#### III.10.1 Fonctionnement de la GASDE à vide

Le rotor de la GASDE est entraîné à vide (Les étoiles du stator sont bouclées par les capacités) à une vitesse sensiblement supérieure à la vitesse de synchronisme et en présence d'un champ rémanent, il est observé aux bornes des deux étoiles du stator une tension simple et un courant qui évoluent exponentiellement avant d'atteindre une tension de valeur maximale de 227.5 Volts (fig. III.35) et un courant d'une valeur de 2.86 Ampères (fig. III.39).

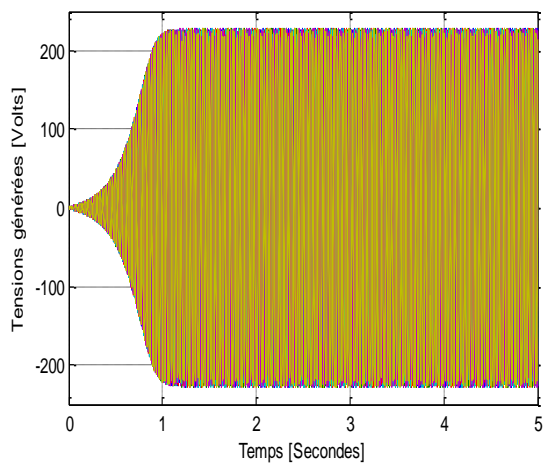
L'agrandissement des figures (III.36) et (III.40) montre clairement le déphasage de  $30^\circ$  existant entre les deux étoiles du stator ainsi que le déphasage de  $120^\circ$  existant entre les tensions et/ou les courants de la même étoile (figures III.37 et III.41), ainsi que la fréquence.



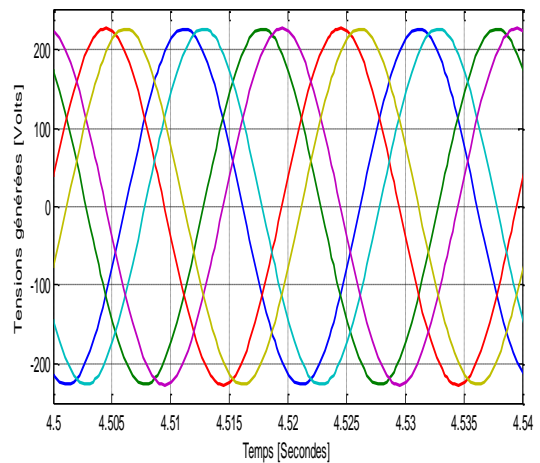
**Figure (III.34) :**  
*Tension débitée  $V_{a1}$  à vide*



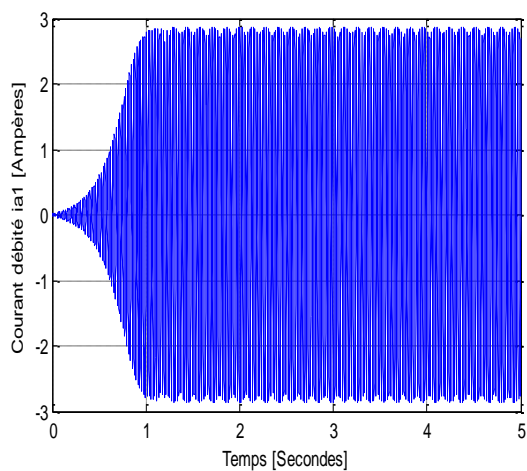
**Figure (III.35) :**  
*Zoom Tension débitée  $V_{a1}$  à vide*



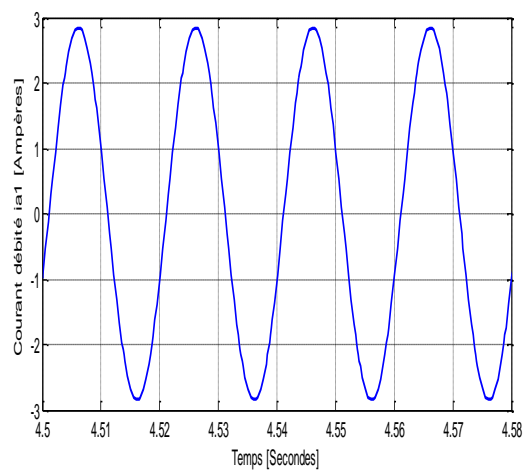
**Figure (III.36) :**  
*Allure des tensions débitées à vide*



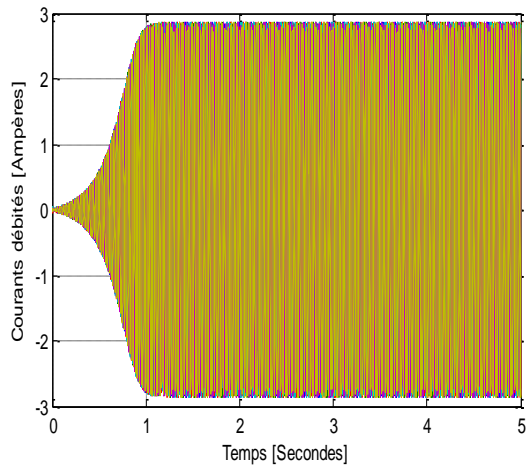
**Figure (III.37) :**  
*Zoom des tensions débitées à vide*



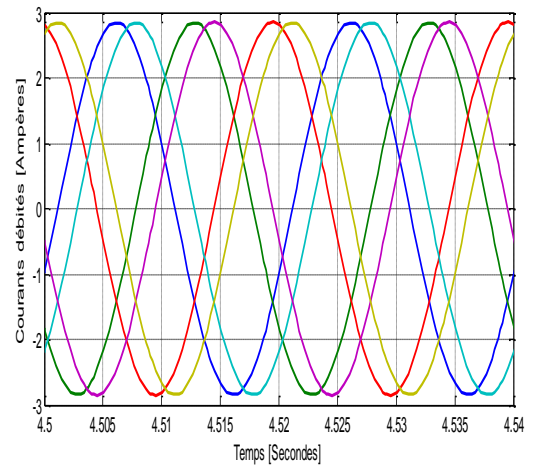
**Figure (III.38) :**  
*Allure du courant de l'étoile 1 à vide*



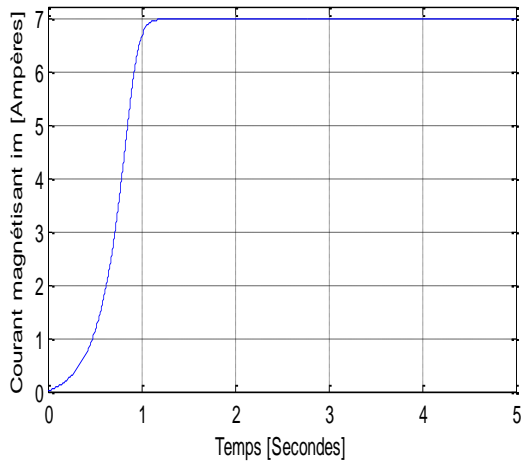
**Figure (III.39) :**  
*Zoom du courant  $i_{a1}$  de l'étoile 1 à vide*



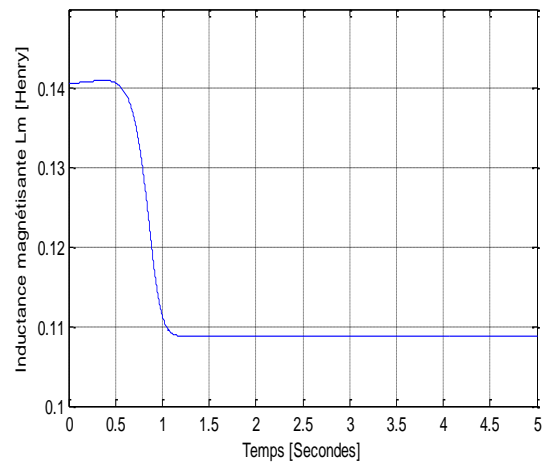
**Figure (III.40) :**  
*Allure des six courants débités à vide*



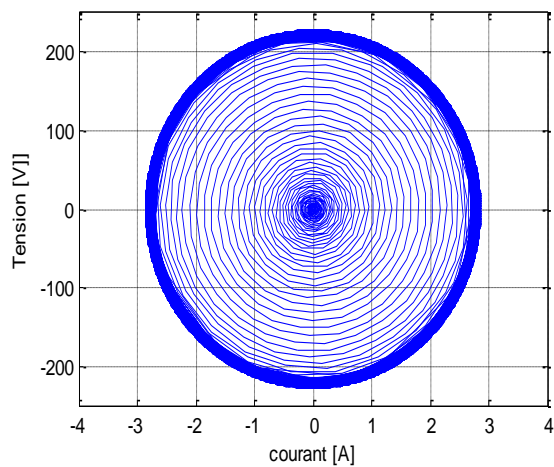
**Figure (III.41) :**  
*Zoom des six courants débités à vide*



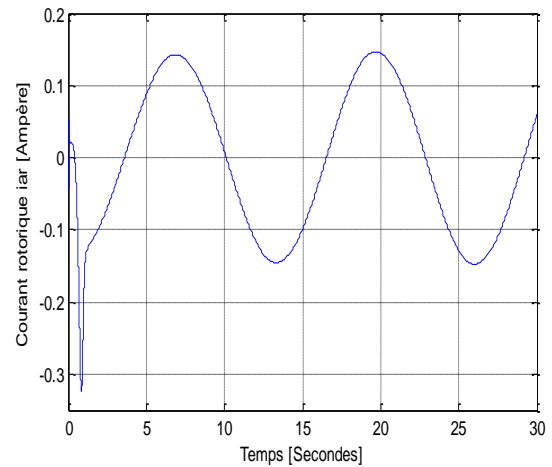
**Figure (III.42) :**  
*Courant magnétisant «  $i_m$  » à vide*



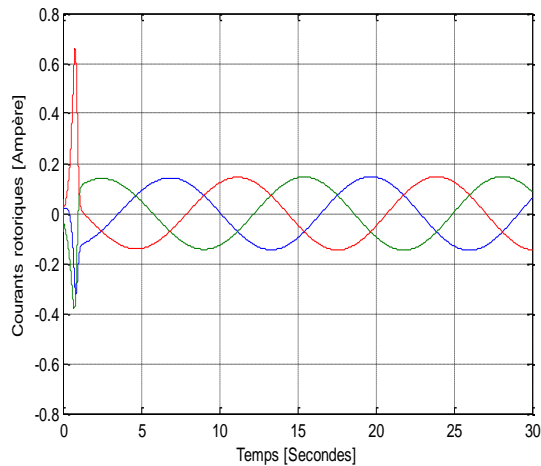
**Figure (III.43) :**  
*Inductance magnétisante «  $L_m$  » à vide*



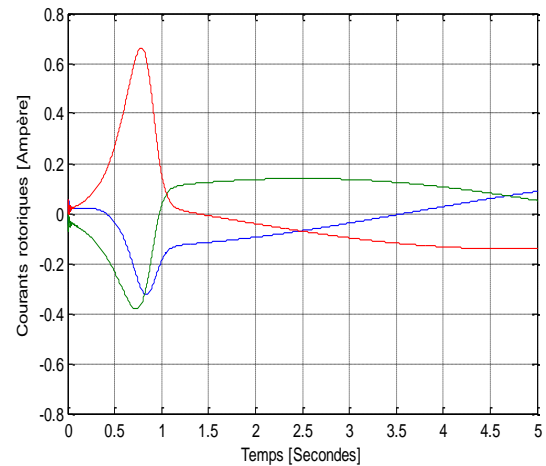
**Figure (III.44) :**  
*Courbe de Lissajous à vide*



**Figure (III.45) :**  
*Courant rotorique  $i_{ar}$  à vide*



**Figure (III.46) :**  
Allure des courants rotoriques à vide



**Figure (III.47) :**  
Zoom des courants rotoriques à vide

Au démarrage, l'inductance magnétisante  $L_m$  prend une valeur de 0.14 Henry, augmente légèrement puis décroît lorsque le régime permanent est établi après une seconde pour se stabiliser à une valeur de 0.108H (fig. III.43).

Le courant magnétisant, par contre, augmente de zéro jusqu'à atteindre une valeur de (7 A) après une seconde, c'est-à-dire, le moment où le régime permanent est atteint (fig.III.42).

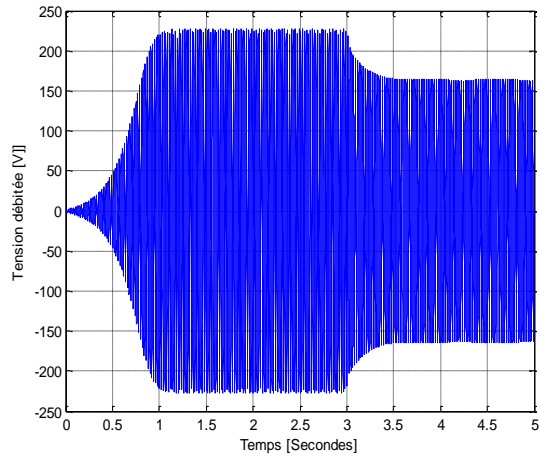
Le courant dans les bobines du rotor augmente aussi et dessine une allure sinusoïdale (fig.III.45) d'une valeur maximale de (0.14 A) avec une période ( $T_r = 12.46$  s) équivalent à une fréquence ( $f_r = 0.08$  Hz) dû essentiellement au glissement de faible valeur, d'environ ( $1,6 \cdot 10^{-3}$ ), proche de zéro, ce qui traduit le fonctionnement à vide.

La courbe de Lissajous (fig. III.44) de forme circulaire montre clairement le déphasage existant entre les tensions et les courants débités aux bornes des deux étoiles du stator. La forme circulaire indique que le déphasage est de  $90^\circ$ , ce qui confirme qu'étant donné que le fonctionnement est à vide, ce déphasage est dû essentiellement à la présence des capacités d'auto-amorçage.

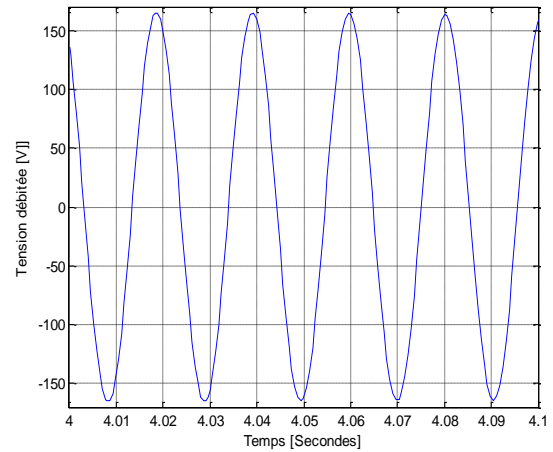
### III.10.2 Fonctionnement de la GASDE avec une charge purement résistive.

Dans cet essai, une charge équilibrée résistive montée en étoile est insérée à la sortie de la génératrice. La valeur choisie de la résistance étant de  $200 \Omega$  et à l'instant ( $t = 3$  s), cette charge est connectée et les résultats de la simulation sont donnés par les figures de (III.48) jusqu'à (III.59).

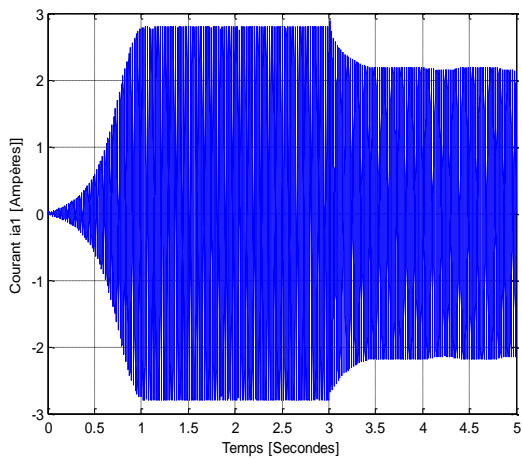
L'inductance magnétisante  $L_m$  augmente de 0.108 H pour atteindre une valeur fluctuante entre 0.126 H et 0.127 H (fig. III.53).



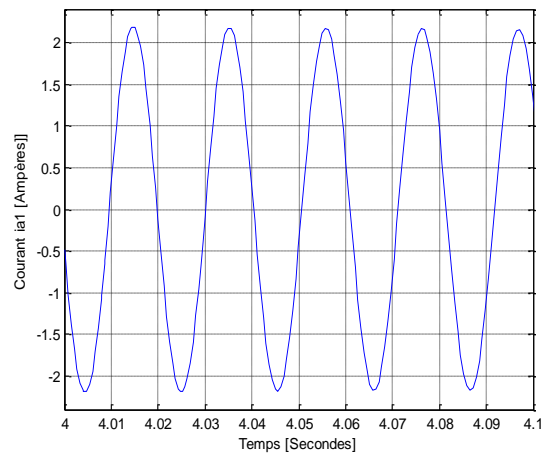
**Figure (III.48) :**  
Tension débitée «  $V_{a1}$  »  
en charge résistive



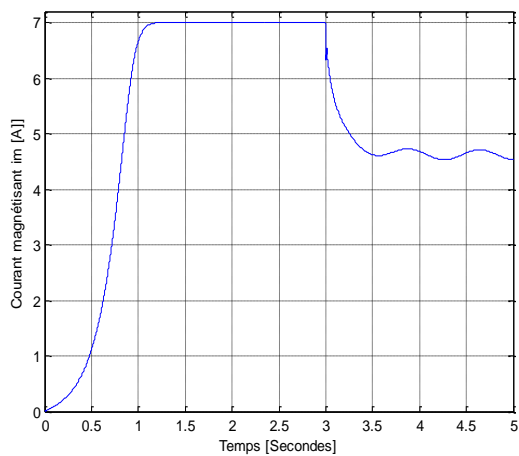
**Figure (III.49) :** Zoom  
de la tension débitée «  $V_{a1}$  »  
en charge résistive



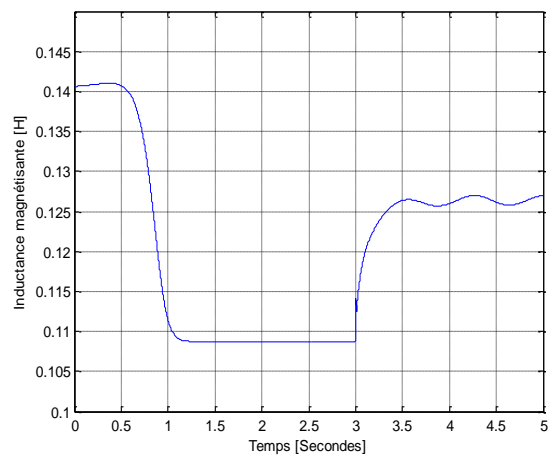
**Figure (III.50) :**  
Allure du courant débité «  $i_{a1}$  »  
en charge résistive



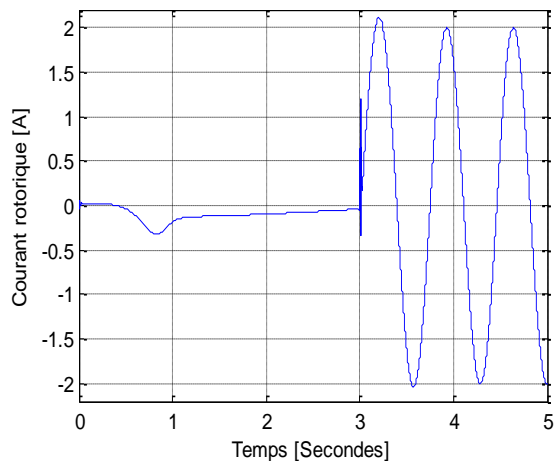
**Figure (III.51) :**  
Zoom du courant débité «  $i_{a1}$  »  
en charge résistive



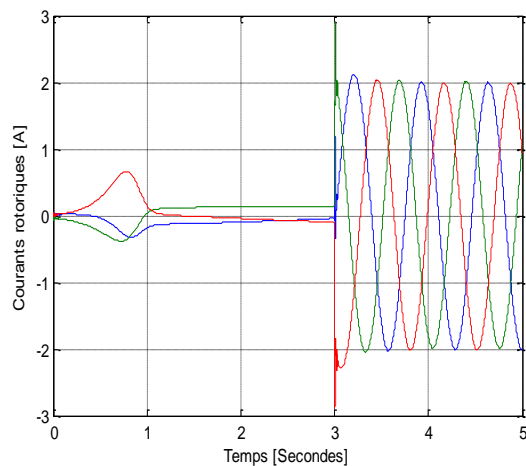
**Figure (III.52) :**  
Courant magnétisant «  $i_m$  »  
en charge résistive



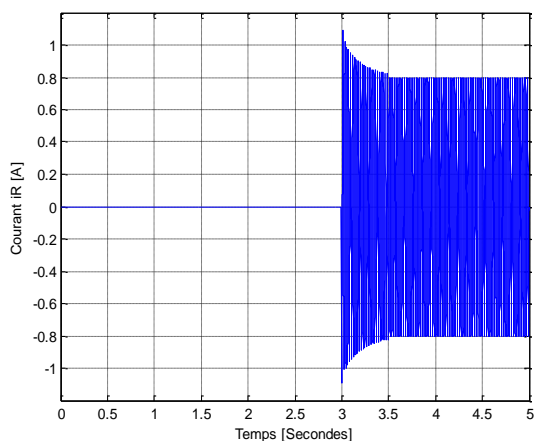
**Figure (III.53) :**  
Inductance magnétisante  
 $L_m$  en charge résistive



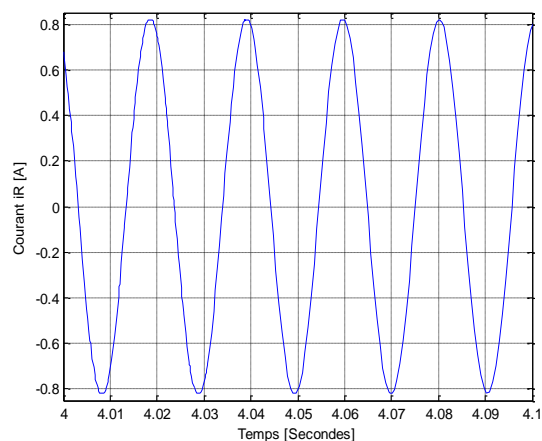
**Figure (III.54) :**  
*Courant rotorique en charge résistive*



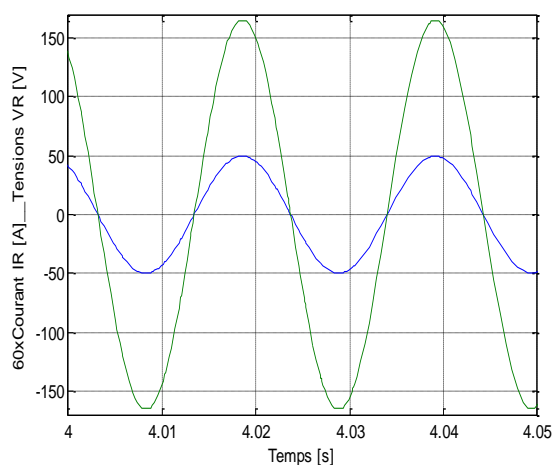
**Figure (III.55) :**  
*Allure des courants rotoriques en charge résistive*



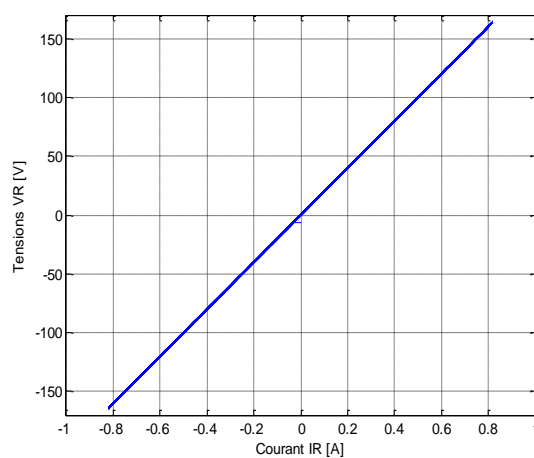
**Figure (III.56) :**  
*Allure du courant parcourant la charge résistive*



**Figure (III.57) :**  
*Zoom du courant parcourant la charge résistive*



**Figure (III.58) :**  
*Courant parcourant et tension aux bornes de la charge résistive*



**Figure (III.59) :**  
*Courbe de Lissajous lors d'une charge résistive*



Le même comportement est observé pour le courant magnétisant (fig. III.52), qui diminue de la valeur de 7 A pour atteindre une valeur flottante entre 4.53 A et 4.72 A.

Au moment de la connexion de la charge, la valeur de la tension simple aux bornes des deux étoiles du stator diminue pour atteindre une valeur maximale de 168.4 V (fig. III.49) avec une valeur du courant qui diminue de 2.86 A à une valeur de 2.22 A (fig. III.51). Les courants qui parcourent les trois résistances ont une valeur de 0.83 A (fig. III.57).

L'augmentation de la puissance active fournie par la génératrice est à l'origine de l'augmentation des courants dans les bobines du rotor qui dessinent une allure sinusoïdale (fig. III.54) ayant une valeur maximale de 2 A avec une période  $T_r = 0.71$ s équivalent à une fréquence  $f_r = 1.4$  Hz et un glissement d'une valeur de 2.8 %.

La figure (III.58) montre que la tension et le courant sont en phase et la ligne droite sur la courbe de Lissajous (fig. III.59) indique aussi ce déphasage nul pour cette charge résistive.

### III.10.3 Fonctionnement de la GASDE avec une charge inductive.

Dans cet essai, une charge équilibrée inductive montée en étoile (fig. II.20) est attelée à la sortie de la génératrice.

La valeur de la résistance étant de 200  $\Omega$  et la valeur de l'inductance est de  $L = 0.05$ H où à «  $t = 3$  s », cette charge est connectée. Les résultats de la simulation sont donnés par les figures de (III.60) jusqu'à (III.71).

De toutes évidences, l'augmentation de l'impédance de charge qui est due à l'adduction des inductances entrainera la diminution des grandeurs électriques régissant la machine.

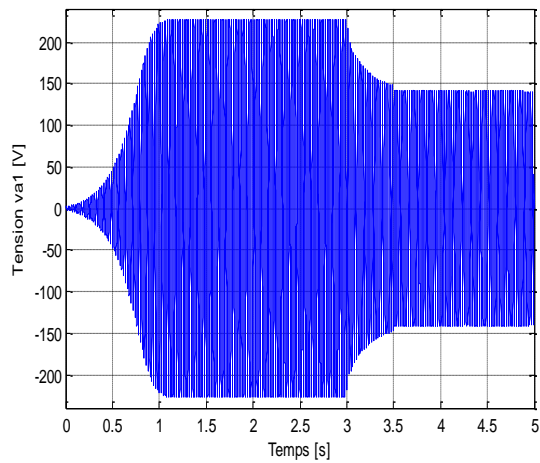
Cette fois-ci, la tension simple aux bornes des deux étoiles du stator diminue pour atteindre une valeur maximale de 148 V (fig. III.61) et un courant qui diminue de 2.86 A à une valeur de 1.82A (fig. III.63). Les courants qui parcourent la charge est d'environ 0.70A (fig. III.68 et III.69).

L'inductance magnétisante  $L_m$  augmente de 0.108 H pour atteindre une valeur de 0.13H (fig. III.65).

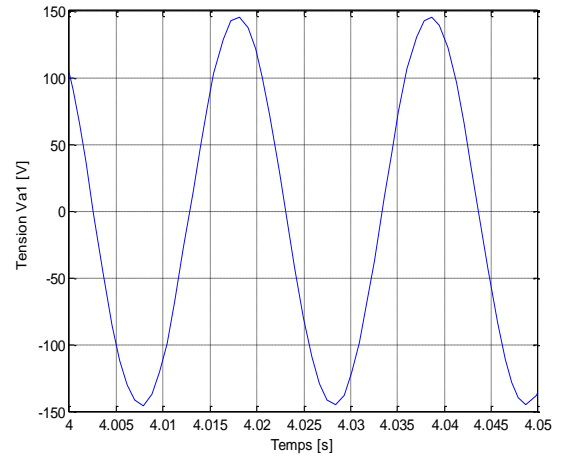
Le même comportement est observé pour le courant magnétisant (fig. III.64), qui diminue de la valeur de 7 A pour atteindre une valeur flottante entre 3.81 A et 3.97 A.

Les courants dans les bobines du rotor dessinent des allures sinusoïdales (fig. III.66, fig. III.67) ayant une valeur maximale d'environ 1.70 A avec une période  $T_r = 0.723$  s équivalent à une fréquence  $f_r = 1.38$  Hz et un glissement d'une valeur de 2.76 %.

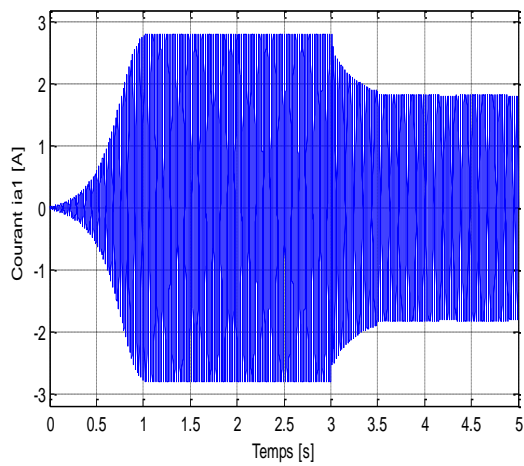
La figure (III.70) et la courbe de Lissajous figure (III.71) montre le déphasage entre la tension et le courant.



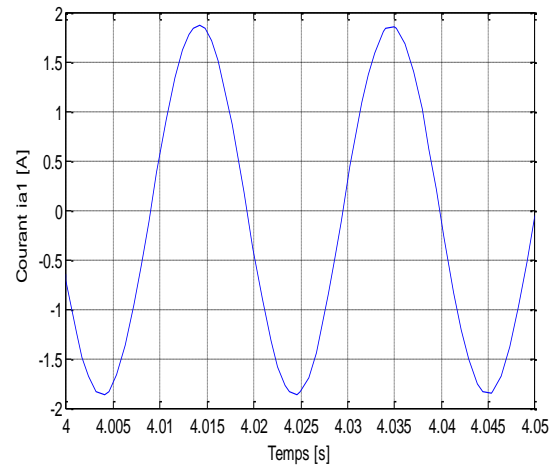
**Figure (III.60) :**  
Tension débitée «  $V_{a1}$  »  
en charge inductive



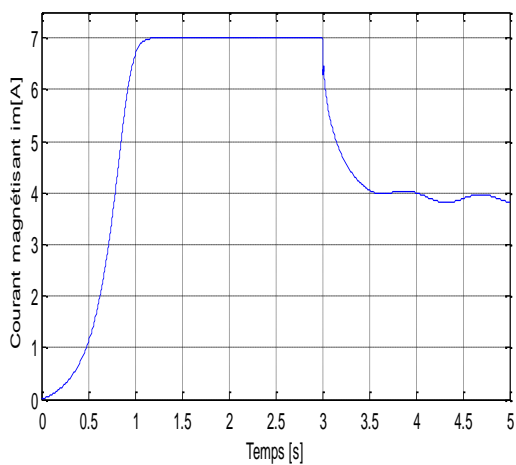
**Figure (III.61) :**  
Zoom de la tension débitée «  $V_{a1}$  »  
en charge inductive



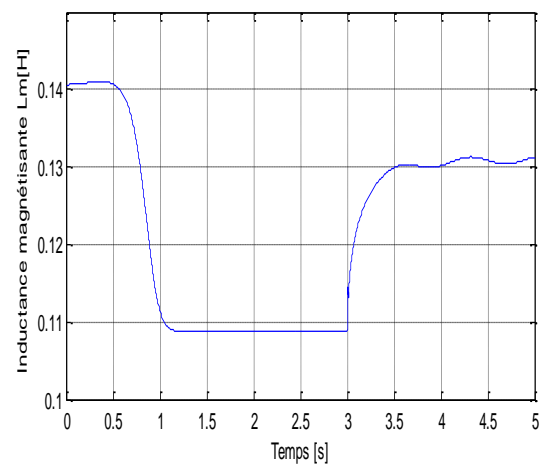
**Figure (III.62) :**  
Allure du courant débité  $i_{a1}$   
en charge inductive



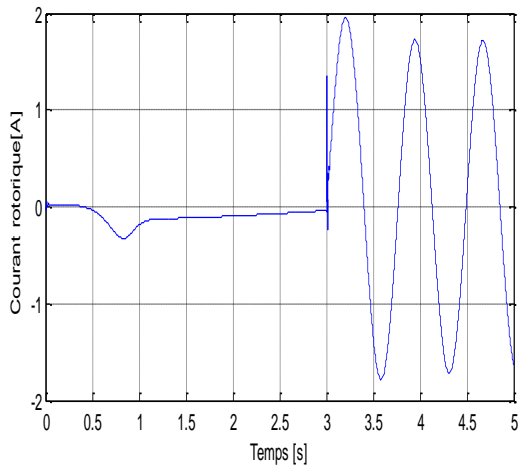
**Figure (III.63) :**  
Zoom du courant débité  $i_{a1}$   
en charge inductive



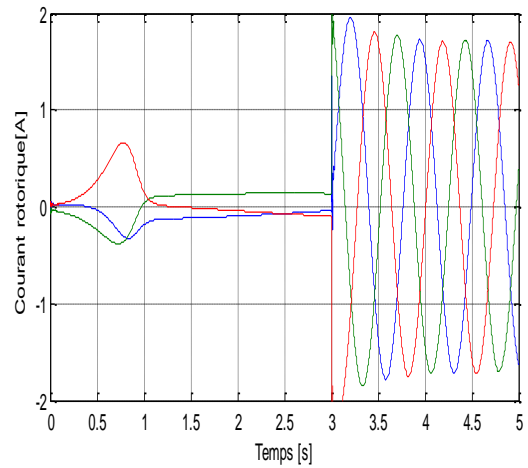
**Figure (III.64) :**  
Courant magnétisant «  $i_m$  »  
en charge inductive



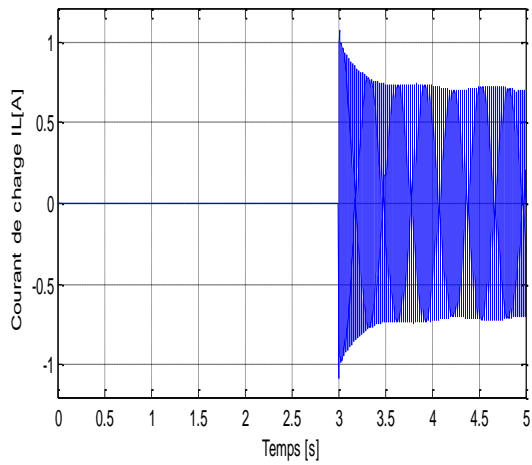
**Figure (III.65) :**  
Inductance magnétisante  $L_m$   
en charge inductive



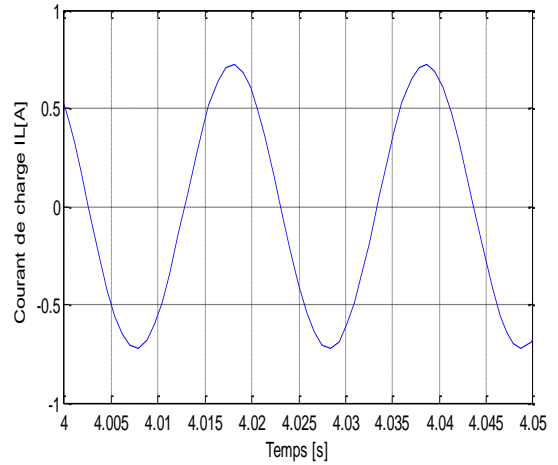
**Figure (III.66) :**  
*Courant rotorique en charge inductive*



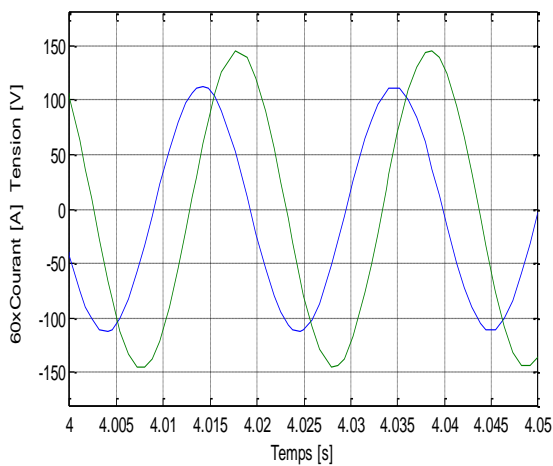
**Figure (III.67) :**  
*Allure des courants rotoriques en charge inductive*



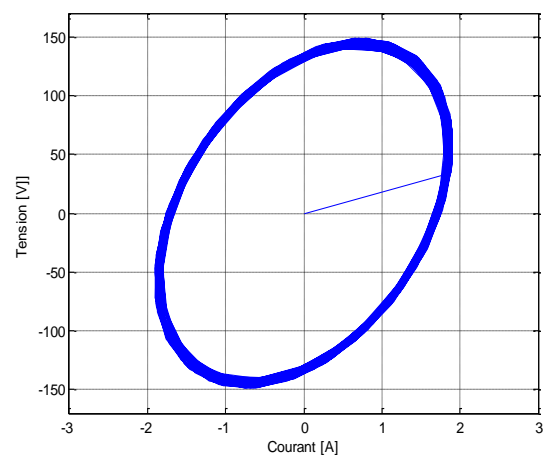
**Figure (III.68) :** *Allure du courant de charge  $I_L$  « charge inductive »*



**Figure (III.69) :** *Zoom du courant de charge  $I_L$  « charge inductive »*



**Figure (III.70) :** *Courant parcourant et tension aux bornes de la charge inductive*



**Figure (III.71) :** *Courbe de Lissajous Lors d'une charge inductive*

### III.10.4 Influence de la capacité d'auto-amorçage

Dans le souci d'établir l'influence des valeurs des condensateurs d'auto-amorçage sur les caractéristiques de la machine, nous avons effectué des simulations avec des capacités de  $35 \mu F$  à  $55 \mu F$  avec un pas de  $5 \mu F$ .

Le tableau (III.7) résume les différentes valeurs des diverses grandeurs régissant le fonctionnement de cette machine à vide.

*Tableau (III.7) : Influence du condensateur d'auto-amorçage*

Capacité d'auto-amorçage	Temps de réponse $t_r$ [s]	Inductance magnétisante $L_m$ [H]	Courant magnétisant $i_m$ [A]	Tension débitée $v_s$ [V]	Courant débité $i_s$ [A]	Courant rotorique $i_r$ [A]
$35 \mu F$	2.0	0.1260	04.63	171.50	1.89	0.099
$40 \mu F$	1.0	0.1087	07.00	228.00	2.86	0.142
$45 \mu F$	0.6	0.0950	08.67	250.50	3.54	0.186
$50 \mu F$	0.5	0.0845	10.05	262.50	4.10	0.32
$55 \mu F$	0.4	0.0754	11.29	268.00	4.61	0.42

La figure (III.72) résume les diverses allures du courant magnétisant. Au fur et à mesure que la valeur de  $C$  augmente, le courant magnétisant «  $i_m$  » augmente de  $4.63 A$  pour  $C = 35 \mu F$  à  $11.29 A$  pour  $C = 55 \mu F$ , contrairement à la valeur de l'inductance magnétisante qui diminue au fur et à mesure que la valeur de  $C$  augmente (fig. III.73).

La tension débitée, le courant débité et le courant rotorique augmentent avec le choix d'une valeur plus grande des condensateurs d'auto-amorçage.

Il est intéressant aussi, d'ajouter que le temps de réponse, pour que le régime permanent soit établi, diminue de  $t_r = 2 s$  pour  $C = 35 \mu F$  jusqu'à  $t_r = 0.4 s$  pour  $C = 55 \mu F$ .

Ces résultats démontrent clairement que les performances de la machine sont nettement influencées par les valeurs des capacités de l'auto-amorçage. Le choix effectué sur une valeur de  $C = 40 \mu F$  n'est pas fortuit mais est en relation directe avec la plaque signalétique de la GASDE, notamment le courant que doit fournir à une certaine vitesse de rotation.

### III.10.5 Influence de la valeur de la résistance

Dans le souci d'établir l'influence des valeurs de la résistance de charge sur les caractéristiques de la machine, nous avons effectué des simulations avec des résistances de  $150 \Omega$  à  $300 \Omega$  avec un pas de  $50 \Omega$ .

La figure III.74 résume les diverses allures du courant magnétisant. Au fur et à mesure que la valeur de R augmente, le courant magnétisant «  $i_m$  » augmente de 3.10 A pour R = 150  $\Omega$  à 5.78 A pour R = 300  $\Omega$ , contrairement à la valeur de l'inductance magnétisante qui diminue au fur et à mesure que la valeur de R augmente (fig. III.75).

La tension débitée et le courant débité augmentent avec l'augmentation de la valeur de la résistance, par contre le courant rotorique atteint un pic pour la valeur de R = 200  $\Omega$ .

**Tableau (III.8) : Influence de la résistance de charge**

Valeur de la résistance [ $\Omega$ ]	Inductance magnétisante $L_m$ [H]	Courant magnétisant (crête) $i_m$ [A]	Tension débitée (crête) $v_i$ [V]	Courant débité (crête) $i_i$ [A]	Courant rotorique (crête) $i_r$ [A]
<b>150 <math>\Omega</math></b>	0.1350	3.10	112.00	1.54	1.78
<b>200 <math>\Omega</math></b>	0.1270	4.72	168.40	2.22	2.00
<b>250 <math>\Omega</math></b>	0.1225	5.40	187.60	2.42	1.84
<b>300 <math>\Omega</math></b>	0.1198	5.78	194.80	2.48	1.65

Le tableau (III.8) résume les valeurs des diverses grandeurs régissant le fonctionnement de cette machine en charge résistive pour les diverses valeurs de résistance.

Ces résultats démontrent clairement que les performances de la machine sont nettement influencées par les valeurs de la résistance de charge.

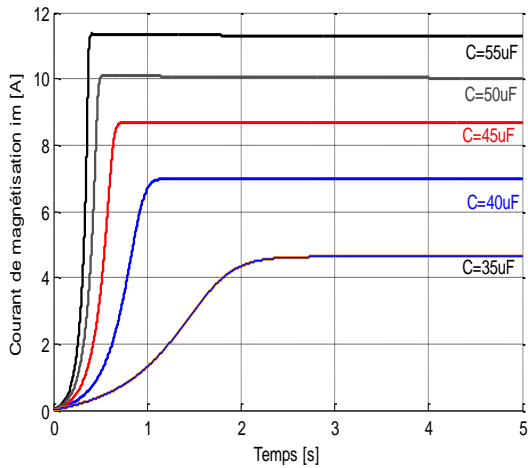
### III.10.6 Influence de la vitesse de rotation

Afin d'établir l'influence de la variation de la vitesse d'entraînement sur les caractéristiques de la génératrice, une simulation avec des vitesses proches de celle de synchronisme avec un pas de 5.5 rd/s est effectuée.

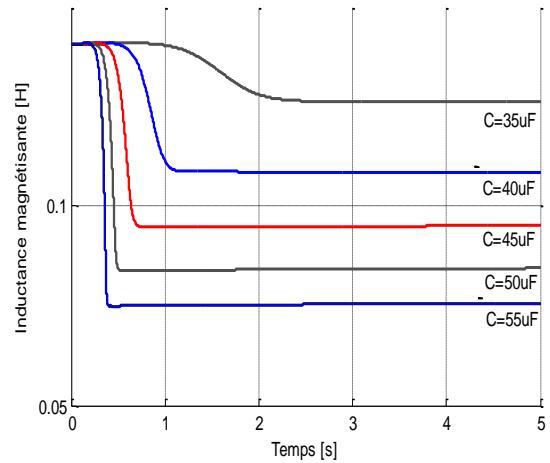
**Tableau (III.9) : Influence de la vitesse d'entraînement**

Valeur de la vitesse [rd/s]	Inductance magnétisante $L_m$ [H]	Courant magnétisant $i_m$ [A]	Tension débitée $v_s$ [V]	Courant débité $i_s$ [A]	Courant rotorique $i_r$ [A]	Fréquence [Hz]
<b>314.5</b>	0.1270	4.71	168.4	2.22	2.00	50.054
<b>320.0</b>	0.1226	5.44	190	2.55	2.30	50.929
<b>325.5</b>	0.1181	6.04	208	2.83	2.56	51.805

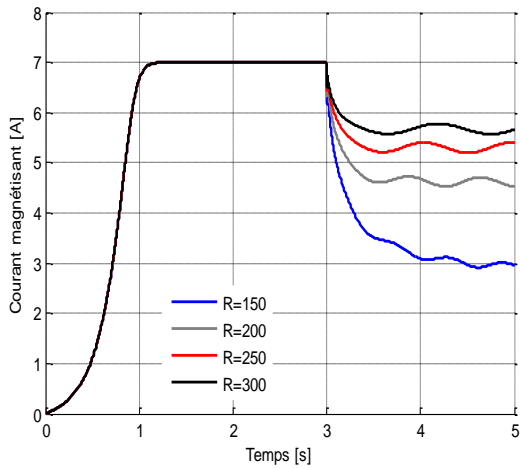
Le tableau III.9 résume les valeurs des diverses grandeurs régissant le fonctionnement de cette machine lors de la variation de la vitesse d'entraînement.



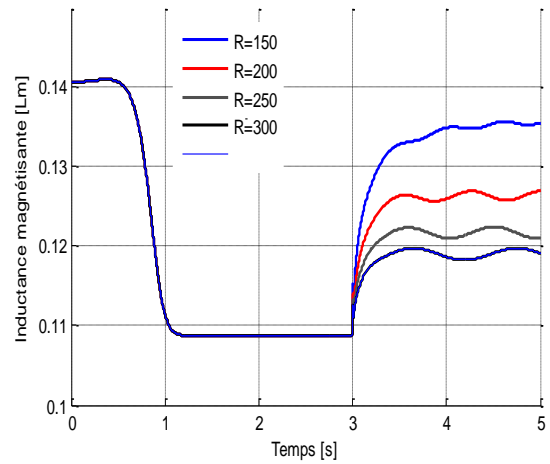
**Figure (III.72) :**  
Influence des capacités d'auto-amorçage sur le courant magnétisant



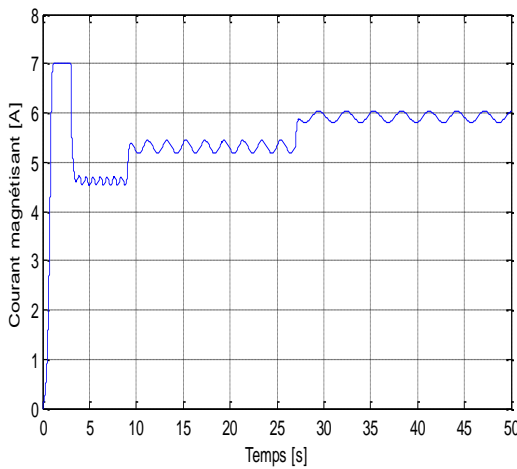
**Figure (III.73) :**  
Influence des capacités d'auto-amorçage sur l'inductance magnétisante



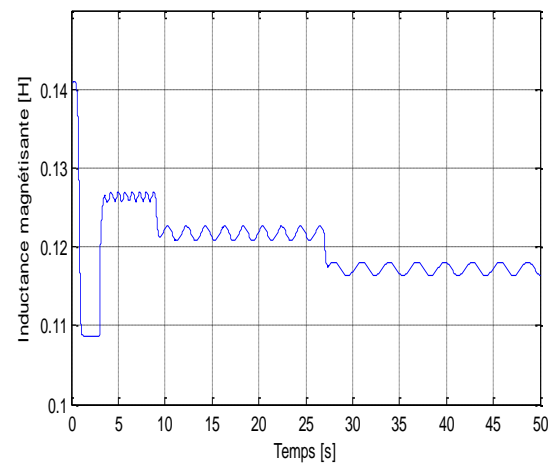
**Figure (III.74) :**  
Influence de la valeur de la résistance sur le courant magnétisant



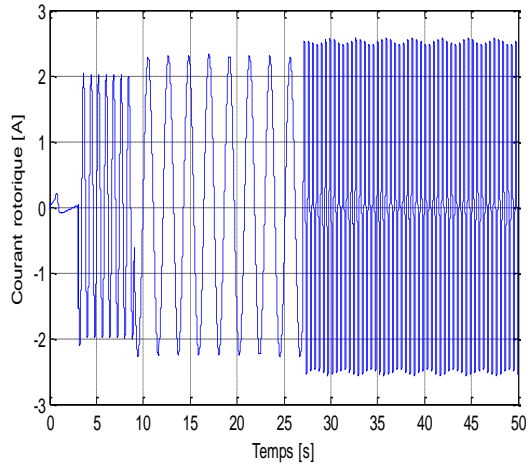
**Figure (III.75) :**  
Influence de la valeur de la résistance sur l'inductance magnétisante



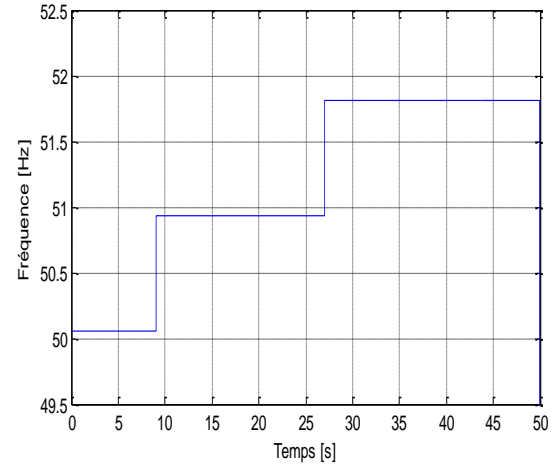
**Figure (III.76) :**  
Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant magnétisant



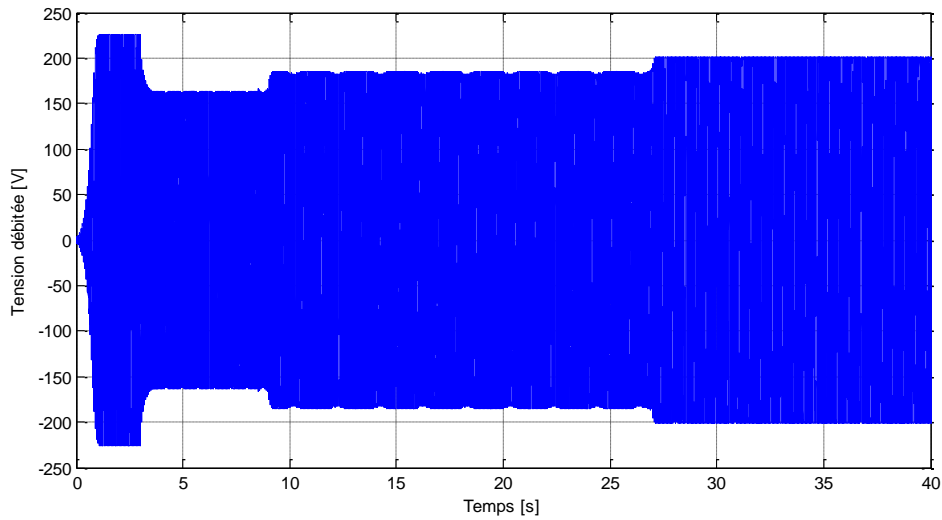
**Figure (III.77) :**  
Influence de la vitesse d'entraînement sur l'inductance magnétisante



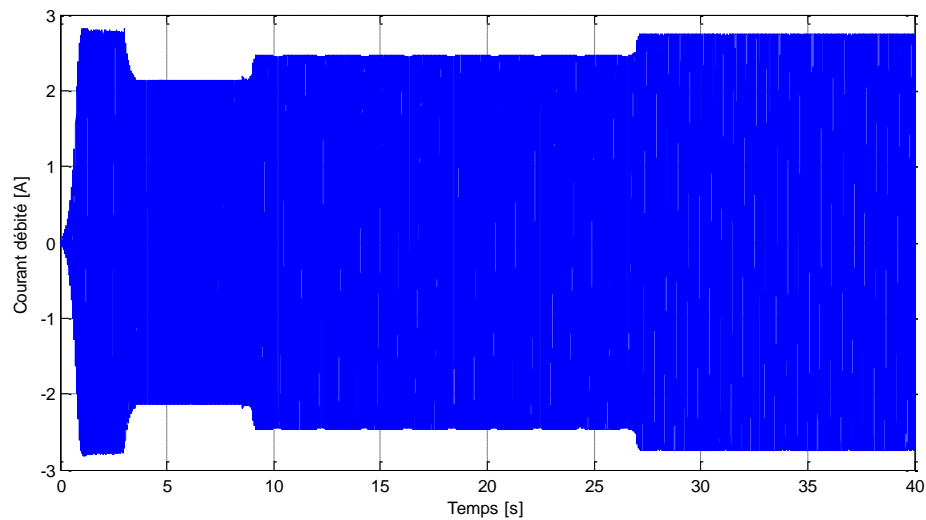
**Figure (III.78) :** Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant rotorique



**Figure (III.79) :** Variation de la fréquence



**Figure (III.80) :** Influence de la vitesse d'entraînement sur les tensions débitées



**Figure (III.81) :** Influence de la vitesse d'entraînement sur les courants débités

Dès que la vitesse d'entraînement est augmentée, le courant magnétisant augmente considérablement de 4.71 A pour une vitesse de 314.5 rd/s à une valeur de 6.04 A pour une vitesse de 325.5 rd/s (fig. III.76).

La figure (III.77) résume l'évolution de l'inductance magnétisante qui, contrairement au courant magnétisant, diminue au fur et à mesure que la vitesse augmente.

La tension débitée (figure III.80), le courant débité (figure III.81) et le courant rotorique (fig. III.78) augmentent avec l'augmentation de la vitesse d'entraînement du rotor.

Ces résultats démontrent clairement que les performances de la machine sont nettement influencées par les valeurs de la vitesse d'entraînement.

### III.11 Performances de la pompe

Pour certaines caractéristiques, il est judicieux d'effectuer deux simulations, la première consiste à coupler directement à  $t = 0$ , la pompe au moteur, dont les courbes sont notées par l'indice (a), puis la deuxième indiquée (b), où, la pompe est connectée après le démarrage du moteur avec une sorte d'embrayage à  $t = 1.8$  s (voir Annexe A4.4 et A4.5).

#### III.11.1 Couple du moteur – Couple résistant

Après le démarrage du moteur, le couple oscille autour d'une valeur de 40 Nm avant que le couple résistant, qui est proportionnel au carré de la vitesse de rotation, se coïncide autour d'une valeur de 12.83 Nm après un laps de temps de « 0.8s » (figure III.82).

Dans le cas où la charge est connectée à  $t = 1.8$  s, le couple de la pompe et celui du moteur, prennent soudainement des valeurs oscillantes autour de « 12.83 Nm » et si ce n'est pas le cas, le couple résistant évolue d'une manière douce avant d'atteindre la consigne.

#### III.11.2 Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation

Les figures (III.83) et les figures (III.84) représentent les allures de la vitesse de rotation et de la vitesse de synchronisme, en [tr/mn] et en [rad/s]. La vitesse de rotation de la pompe est de 297 rad/s correspondant à 2836 tr/mn.

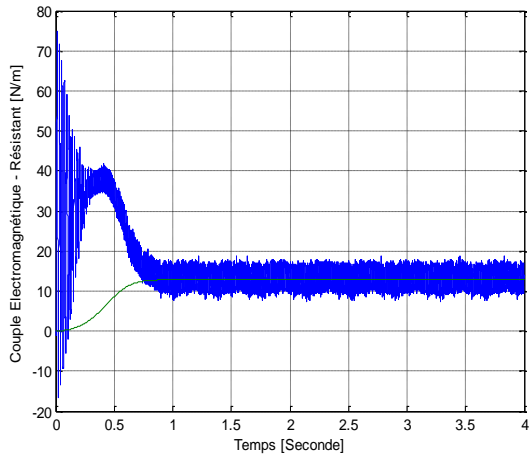
#### III.11.3 Caractéristique « Couple – Vitesse de rotation »

Le couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse de rotation du moteur. L'allure de la figure (III.86), montre l'évolution du couple en fonction de la vitesse.

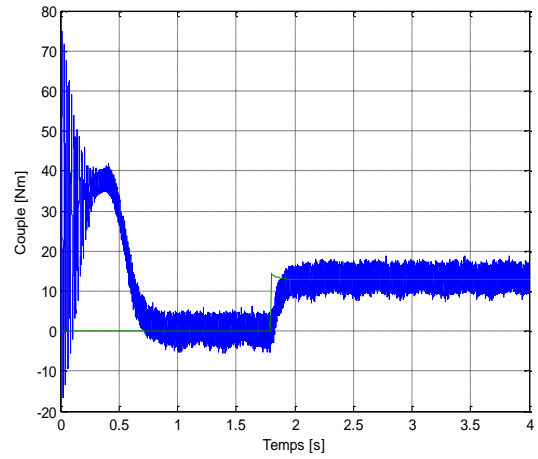
#### III.11.4 Caractéristique « Débit – Vitesse de rotation »

La pompe doit être entraînée à une certaine vitesse pour laquelle puisse fournir un débit comme est illustré par la figure (III.88).



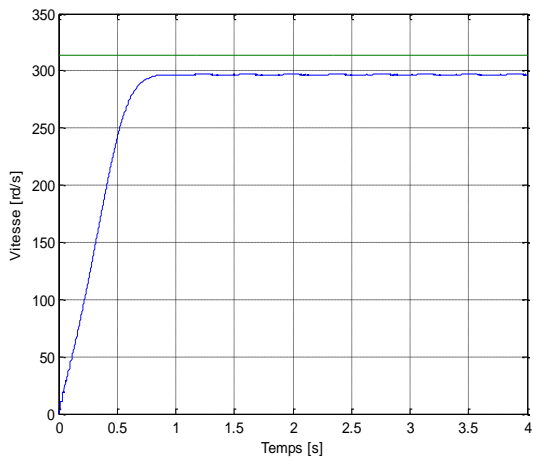


« a »

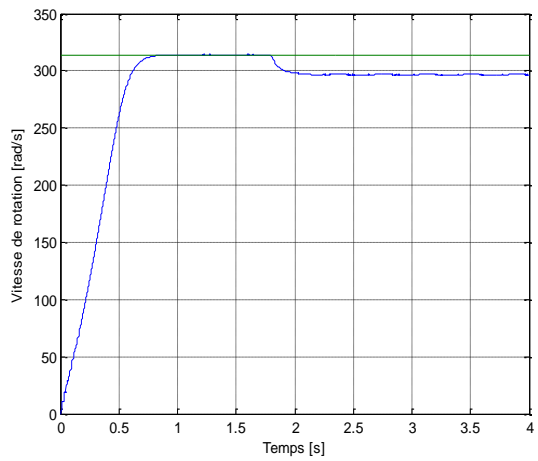


« b »

Figure (III.82) : Couple moteur – couple pompe (résistant)

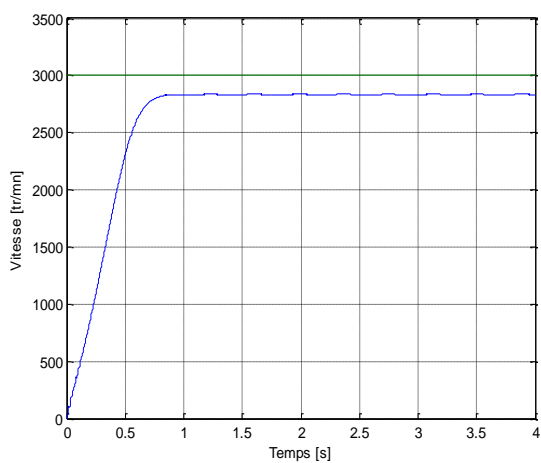


« a »

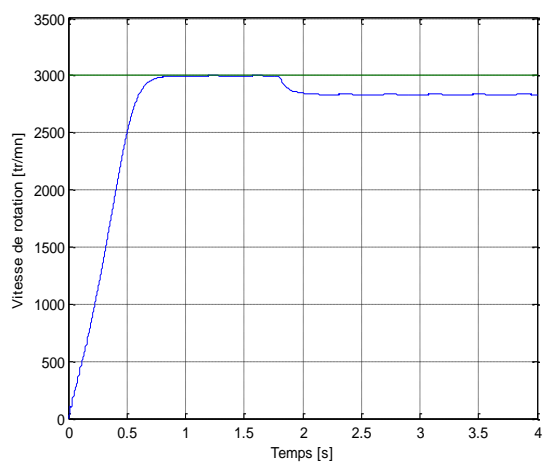


« b »

Figure (III.83) : Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation [rad/s]

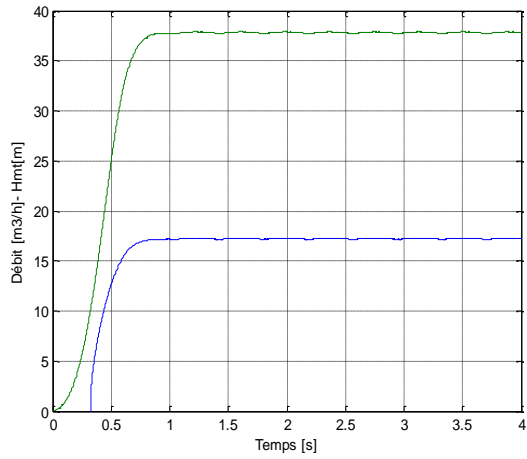


« a »

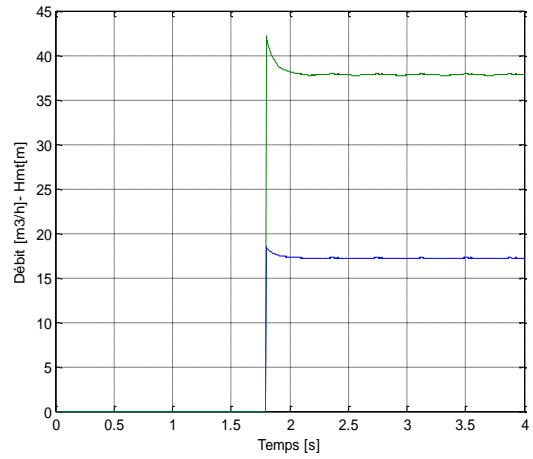


« b »

Figure (III.84) : Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation [tr/mn]



« a »



« b »

Figure (III.85) : Caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »

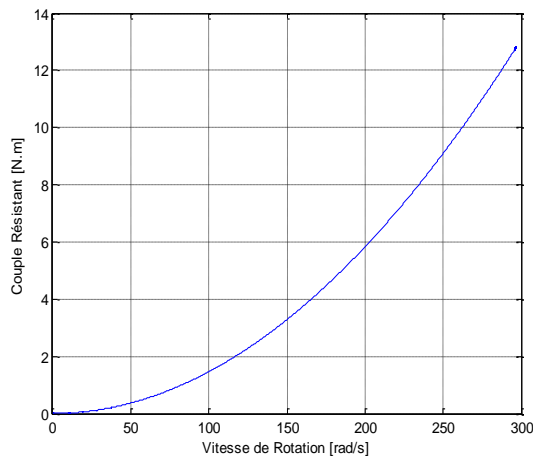


Figure (III.86) : Caractéristique « Couple-Vitesse de rotation »

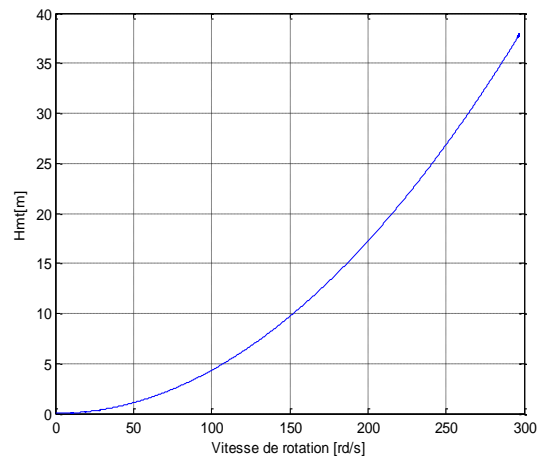


Figure (III.87) : Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »

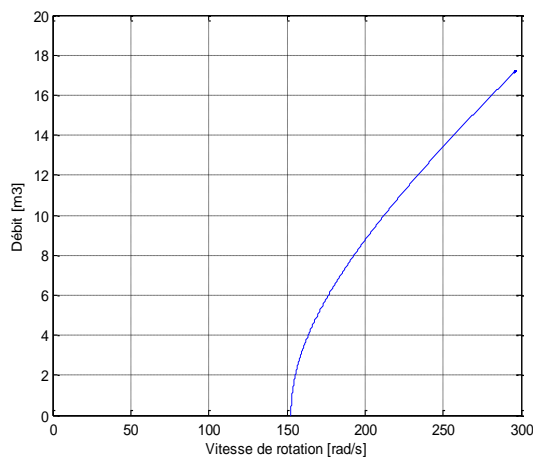


Figure (III.88) : Caractéristique « Débit-Vitesse de rotation »

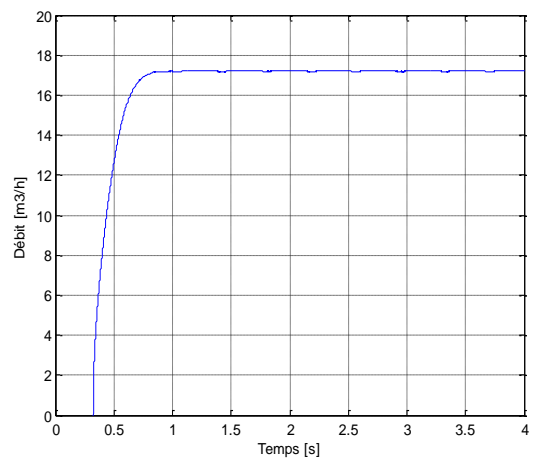


Figure (III.89) : Caractéristique du Débit

En effet, avant d'atteindre ce niveau de célérité, soit une valeur de 150 rad/s, la tuyauterie de la pompe ne fournit aucun débit, ensuite, le débit augmente avec l'élévation de la vitesse de rotation.

Le moteur atteint la vitesse de 150 rad/s en 0.3 seconde, un temps suffisant pour remplir la tuyauterie de refoulement.

### **III.11.5 Evolution du débit & caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »**

Le débit varie, proportionnellement, à la vitesse de rotation du moteur et atteint une valeur de 17,2. m<sup>3</sup>/h comme l'indiquent les figures (III.85).

Le débit évolue de la même manière que l'évolution de la HMT, et qui est semblable à l'allure de la vitesse de rotation (figures III.83).

### **III.11.6 Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation**

La hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur qui devra être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée est proportionnelle au débit et à la hauteur manométrique totale figure (III.87).

## **III.12 Conclusion**

Il est primordial, avant d'entamer un projet de pompage à énergies renouvelables, de connaître les conditions météorologiques, notamment, en ce qui concerne la durée d'insolation journalière, le rayonnement disponible au cours d'une année, ainsi que les vitesses du vent. Raison pour laquelle des cartographies du site susceptible d'accueillir la station de pompage doivent être établies au préalable.

L'évaluation des besoins en eau, la hauteur manométrique totale et le débit sont d'une très grande importance pour évaluer les diverses puissances permettant la détermination de la dimension des différents organes entrant dans la conception de la station de pompage.

L'utilisation des onduleurs de tension pour l'alimentation du MASDE, commandés par la technique MLI sinus-triangle, permet le contrôle de la vitesse de rotation. Des ondulations observées sur le couple, la vitesse, les flux rotoriques et les courants de la machine sont dus, essentiellement, à la présence d'harmoniques engendrés par les onduleurs.

La génératrice utilisée dans cette chaîne de pompage est la GASDE auto-excitée en fonctionnement autonome où l'auto-amorçage est réalisé par un banc de condensateur dont sa valeur est minutieusement choisie et par la présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer rotorique pour obtenir les performances estompées.

Les essais effectués à vide puis en charge montrent le comportement de la génératrice, notamment en ce qui concerne, le courant et l'inductance de magnétisation et les tensions et les courants débités quand le rotor est entraîné à des vitesses sensiblement supérieures à la vitesse de synchronisme.

L'influence des valeurs de condensateurs d'auto-amorçage, des charges résistives et des vitesses d'entraînement est étudiée avec les diverses simulations et le comportement de la machine est suivi, notamment en ce qui concerne les tensions et les courants débités, l'inductance et le courant de magnétisation, ainsi que les courants rotoriques.

A noter que les charges inductives consomment de l'énergie réactive au détriment de la magnétisation de la machine, raison pour laquelle il faudrait insérer des condensateurs de compensation pour y remédier aux insuffisances de l'énergie réactive.

Des différents types de pompes, la pompe centrifuge est la plus utilisée, ce qui favorise, sérieusement, l'étude de son comportement par l'analyse des diverses caractéristiques la régissant.

Le couple de la pompe, sa vitesse de rotation et le débit pompé obéissent à la variation de l'éclairement et de la vitesse du vent. Toutefois, l'usage de la technique d'hybridation permet de surmonter le handicap d'un faible éclairement ou d'un timide vent.

L'idée d'opter pour une hybridation des sources d'énergies renouvelables a germé dans le but d'assurer une continuité de service pour les applications érigées dans les zones isolées dépourvues d'alimentation classique en électricité.

Une étude plus approfondie, en ce qui concerne, le coût de tous les éléments intervenants dans la chaîne de pompage s'avère indispensable pour investir dans ce nouveau créneau.

Il en demeure que gérer les différents flux énergétiques doit être effectué avec une souplesse accrue, permettant d'avoir des meilleurs rendements tout en épargnant des contraintes supplémentaires dispensables au dispositif mis en jeu. Tous ces choix de fonctionnement en fonction des conditions climatiques et des besoins énergétiques feront l'objet d'étude du prochain chapitre.

# **CHAPITRE IV**

## **GESTION DU SYSTÈME DE POMPAGE HYBRIDE À ÉNERGIES RENOUVELABLES**

## **CHAPITRE IV**

### **GESTION DU SYSTÈME DE POMPAGE HYBRIDE À ÉNERGIES RENOUVÉLABLES**

---

#### **IV.1 Introduction**

Certes avec des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, les énergies dites renouvelables, telle que l'éolienne, le photovoltaïque, la petite centrale hydroélectrique ou bien encore la pile à combustible s'imposent du jour en jour. L'option de jumeler ces sources dans un système d'hybridation peut contrecarrer les désagréments d'une mono-source qui obéit à la nature stochastique de ces énergies.

Il est nécessaire d'élaborer un algorithme de gestion capable de « choisir » la source ou les sources à utiliser pour satisfaire la demande de la charge ou des charges pour permettre la régulation du niveau d'eau dans le réservoir ainsi que le remplissage des bouteilles d'hydrogène par le procédé d'électrolyse afin de les utiliser pour le fonctionnement de la pile à combustible.

#### **IV.2 Alimentation de la station de pompage**

La nature intermittente du rayonnement solaire et des vitesses fluctuantes du vent au cours d'une journée, d'un mois ou d'une saison est une raison convaincante pour combiner le photovoltaïque et l'éolienne afin de satisfaire les besoins de la charge et de réduire les impacts environnementaux. L'hybridation se repose sur le principe de la pluralité des sources, contrairement aux systèmes mono sources.

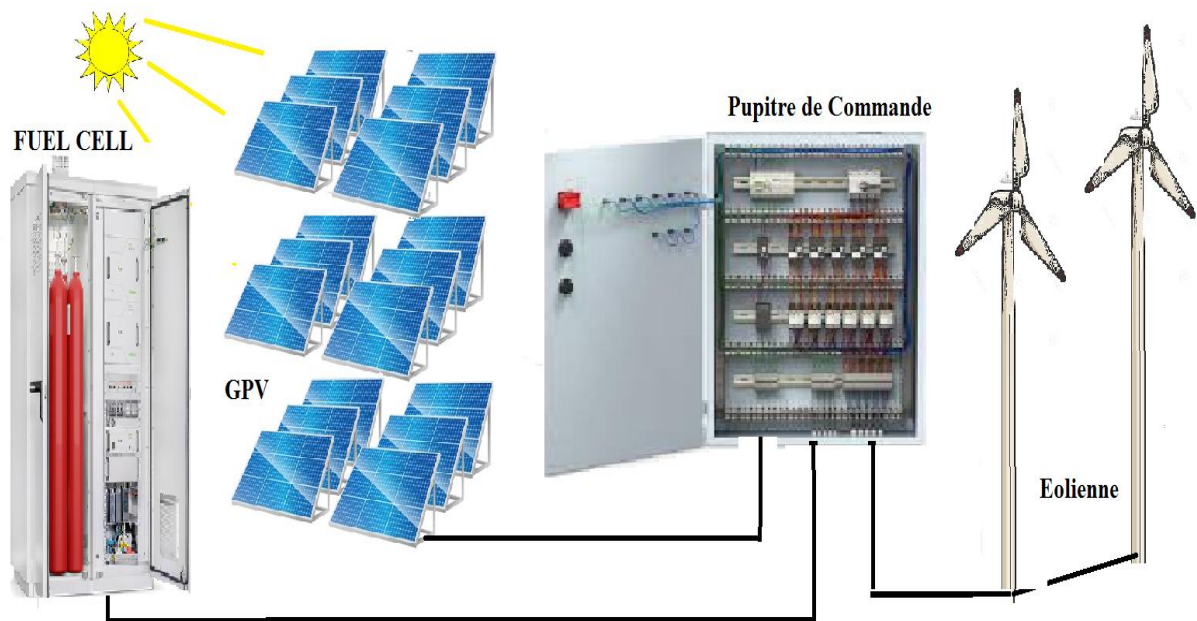
Les cartographies établies de l'ensoleillement et du vent (chapitre III) de cette station de pompage située dans une zone du Sahara algérien permettent de désigner le photovoltaïque comme source principale.

Le réservoir utilisé pour stocker l'eau pompée doit être dimensionné d'une manière à avoir une autonomie de 72 heures et de répondre aux besoins de la localité lors des conditions climatiques les plus défavorables. En cas de besoin, l'eau sera distribuée par gravité, ce qui permet d'écarter le stockage électrochimique qui s'avère être coûteux.

Mais se contenter de cette manière pour alimenter les charges, peut être un handicap lors des faibles éclaircissements et lors d'absence des manifestations d'Éole et aura des conséquences sur le débit pompé.

Au moment où l'hydrogène est considéré comme étant le vecteur énergétique du futur et afin d'éviter le stockage électrochimique, le recours à la pile à combustible demeure une

aubaine certaine, dans le cas d'absence de vent et de l'ensoleillement, malgré le faible rendement du processus de conversion électricité-hydrogène-électricité [176, 177].



*Figure IV.1 : Hybridation des sources renouvelables présentes dans la station de pompage*

### IV.3 Stratégies de gestion d'un système hybride

Dans un système hybride d'énergie, la stratégie de fonctionnement, qui n'est qu'un algorithme, demeure l'élément clé, relatif à la gestion du stockage et est primordiale au fonctionnement optimal de la station de pompage. C'est le centre de prise de décisions continue, concernant la source ou les sources à connecter et la charge ou les charges à atteler à l'échelle de plusieurs heures ou de plusieurs jours [76].

Le souci principal d'un système de gestion n'est que de fournir la puissance demandée par la charge malgré les fluctuations de l'énergie produite et d'assurer un approvisionnement constant en eau potable, nécessaire à la survie de la localité.

Vu la nature stochastique des énergies renouvelables, notamment, le solaire et l'éolien, les prises des décisions, concernant la gestion de ces sources demeurent le talon d'Achille de ces systèmes hybrides.

La station de pompage est constituée d'un générateur photovoltaïque (GPV), constitué de 36 panneaux photovoltaïques (Chapitre III) et actionné par un contacteur «  $K_{PV}$  », d'une éolienne que le contacteur «  $K_W$  » permet sa connexion. La génératrice à double étoile fournit une tension alternative que grâce à un redressement multiphasé offre la tension du bus continu nécessaire au fonctionnement des onduleurs.

Le contacteur «  $K_{pmp}$  » permet l'attelage de la pompe et «  $K_{lyz}$  » celui de l'électrolyseur. Le système de stockage à base d'hydrogène est mis en œuvre par le biais du contacteur «  $K_{FC}$  ».

**Tableau IV.1** : Contacteurs du choix des sources et des charges

Sources renouvelables						Charges			
Générateur photovoltaïque		Eolienne		Pile à combustible		Pompe centrifuge		Electrolyseur	
$K_{PV}$		$K_W$		$K_{FC}$		$K_{Pmp}$		$K_{lyz}$	
= 0	= 1	= 0	= 1	= 0	= 1	= 0	= 1	= 0	= 1
Inactif	Actif	Inactive	Active	Inactive	Active	Dételée	Attelée	Dételé	Attelé

Un système de gestion optimale est nécessaire pour prendre les bonnes décisions pour assurer une continuité de service et une meilleure utilisation de l'énergie avec une efficacité et une fiabilité à moindre coût.

La stratégie de fonctionnement sera établie en se basant sur des scénarios probables à chaque variation de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire et en tenant compte de l'état de charge des bouteilles d'hydrogène, ainsi que du niveau de remplissage du réservoir d'eau.

L'objectif de toute stratégie de gestion est d'optimiser l'échange d'énergie entre les différents éléments, tout en garantissant la stabilité du système.

#### IV.4 Scénario probable de gestion du système hybride proposé

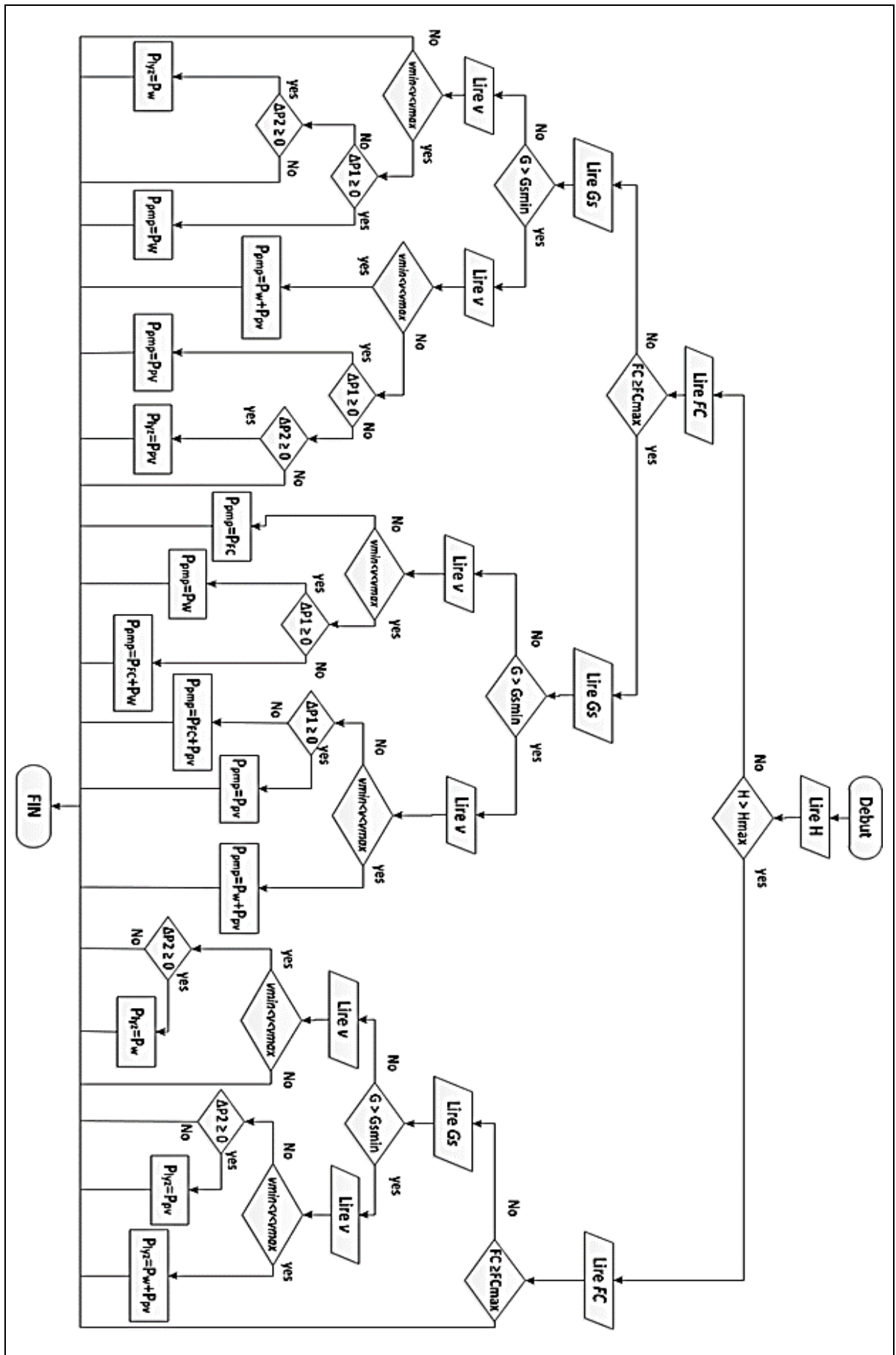
##### IV.4.1 Nomenclature utilisée

**Tableau IV.2** : Présentation des entrées, des sorties et des capteurs

Les Capteurs			
$G_s$	Ensoleillement	$v$	Vitesse où l'éolienne produit
$G_{min}$	Faible ensoleillement	$v_{max}$	Décrochage de l'éolienne
$FC_{max}$	Bouteilles d'hydrogène pleines	$v_{min}$	L'éolienne ne produit pas
$H$	Niveau du réservoir	$H_{max}$	Réservoir plein
Les Entrées		Les Sorties	
$P_W$	Puissance de l'éolienne	$P_{lyz}$	Puissance de l'électrolyseur
$P_{PV}$	Puissance du panneau photovoltaïque	$P_{pmp}$	Puissance de la pompe
$P_{FC}$	Puissance de la pile à combustible	$P_{SEH}$	Puissance du système hybride



IV.4.2 Organigramme de gestion du système hybride



### IV.4.3 Principe de fonctionnement de l'hybridation des sources

La gestion du système hybride se repose sur deux axes primordiaux, à savoir l'état de remplissage du château d'eau et celui des bouteilles d'hydrogène.

Pour entreprendre la gestion de ces sources hybrides, il est utile de définir quelques paramètres qui permettront de réaliser les divers modes de fonctionnement qui s'imposent pour assurer une bonne gestion de la station de pompage.

Selon les conditions préétablies, les coefficients  $K_i$  présélectionnent les générateurs renouvelables à activer et la puissance du système hybride est donnée par :

$$P_{SEH} = K_{pv} \times P_{pv} + K_w \times P_w + K_{FC} \times P_{FC} \quad (IV.1)$$

De la même manière, la charge à atteler est donnée par :

$$P_{Load} = K_{pmp} \times P_{pmp} + K_{lyz} \times P_{lyz} \quad (IV.2)$$

Pour les besoins de gestion, la différence entre la puissance disponible du système hybride et le besoin en puissance de la charge est définie comme étant :

$$\| \Delta P_i = P_{SEH} - (2 - i) \times P_{pmp} - (i - 1) \times P_{lyz} \quad (IV.3)$$

Si «  $i=1$  », le choix se portera sur l'attelage de la pompe centrifuge pour remplir le réservoir d'eau et si «  $i=2$  », le choix sera porté sur l'électrolyseur.

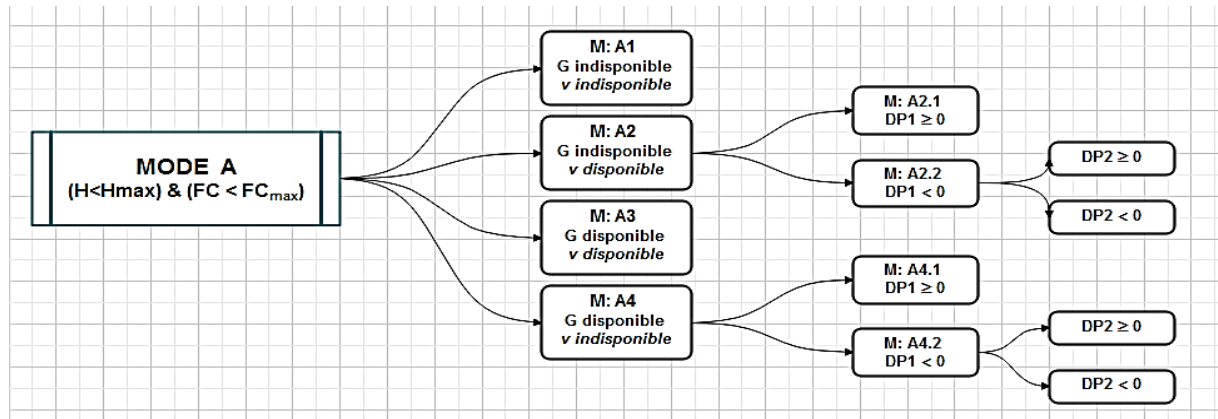
### IV.4.4 Différents modes et scénarios probables du fonctionnement

D'abord, avant la conception de ce cahier de charge, il est nécessaire de classer les besoins selon la nécessité de fonctionnement.

- Quel que soient les conditions présentes, la priorité est au remplissage du réservoir d'eau, nécessaire à la survie de la localité.
- Utiliser toujours l'hybridation des sources tant que les conditions le permettent.
- Procéder au remplissage des bouteilles d'hydrogène par électrolyse de l'eau une fois que le réservoir d'eau est rempli ou exclusivement, dans le cas où l'énergie disponible n'est pas suffisante pour le pompage.
- Ne jamais atteler la pompe et l'électrolyseur ensemble.
- Utiliser l'excédent énergétique pour les circuits tertiaires d'éclairage par LED.

#### IV.4.4.1 Mode A « $H < H_{max}$ & $FC < FC_{max}$ »

Logiquement le premier mode noté « Mode A », est le mode où le réservoir d'eau et les bouteilles d'hydrogène sont vides.



*Figure IV.2 : Schéma synoptique du mode « A »*

Dans ce cas, quatre combinaisons sont possibles entre l'insolation et la vitesse du vent.

**a) Mode A1 :**  $(G < G_{smin}) \& (v < v_{min} \text{ ou } v > v_{max})$

L'ensoleillement est indisponible et la vitesse du vent est inadéquate pour avoir un fonctionnement de l'éolienne. Aucune puissance n'est mise en jeu. La station de pompage est à l'arrêt.

**b) Mode A2 :**  $(G < G_{smin}) \& (v_{min} \leq v \leq v_{max})$

Les panneaux solaires ne fournissent pas d'énergie, par contre l'éolienne génère une puissance qui est en fonction de la vitesse du vent.

- **Mode A2.1 :**  $(\Delta P_1 = P_w - P_{pmp} \geq 0)$

Dans ce cas, il faut s'assurer que l'énergie disponible est suffisante pour faire tourner la pompe centrifuge. L'énergie d'Eole à travers la GASDE fournit la tension du bus continu des onduleurs de la MASDE.

- **Mode A2.2 :**  $(\Delta P_1 = P_w - P_{pmp} < 0)$

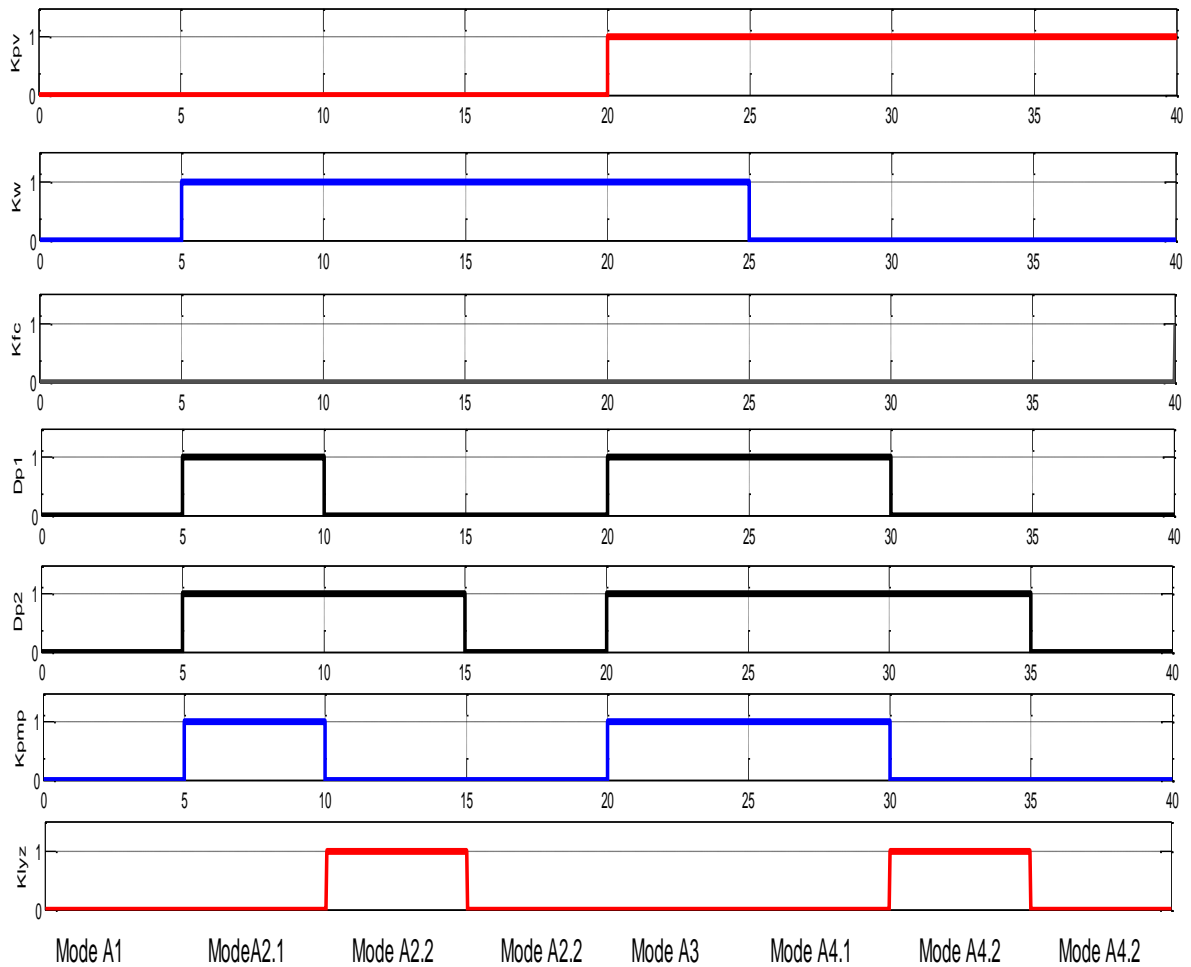
Dans ce cas, l'énergie disponible est insuffisante pour puiser l'eau, où maintenant il est nécessaire de vérifier si cette énergie est suffisante pour produire de l'hydrogène.

- **Cas 1 :**  $\Delta P_2 = P_w - P_{lyz} \geq 0$

Dans ce cas, l'énergie fournie par l'éolienne servira à produire de l'hydrogène par électrolyse et à remplir les bouteilles d'hydrogène.

- **Cas 2 :**  $\Delta P_2 = P_w - P_{lyz} < 0$

L'énergie produite par l'éolienne n'est suffisante ni pour le pompage ni pour la génération de l'hydrogène. Une idée d'utiliser cette énergie pour l'alimentation d'un circuit tertiaire composé de lampes rechargeables à LED qui serviront à l'éclairage de la station a germé lors de cette rédaction.



**Figure IV.3 :** Chronogramme de fonctionnement du mode « A »

**c) Mode A3 :**  $(G \geq G_{smin}) \ \& \ (v_{min} \leq v \leq v_{max})$

Les deux sources renouvelables fournissent de l'énergie. L'hybridation est alors réalisée en alimentant la pompe par la combinaison du photovoltaïque et de l'éolienne.

**d) Mode A4 :**  $(G \geq G_{smin}) \ \& \ (v < v_{min} \ \text{ou} \ v > v_{max})$

Les panneaux solaires fournissent de l'énergie et la vitesse du vent ne permet pas à l'éolienne de générer une tension.

- **Mode A4.1 :**  $(\Delta P_1 = P_{PV} - P_{pmp} \geq 0)$

Dans ce cas, l'énergie disponible du soleil est suffisante pour faire tourner la pompe centrifuge. Le GPV fournit la tension du bus continu des onduleurs de la MASDE.

- **Mode A4.2 :**  $(\Delta P_1 = P_{PV} - P_{pmp} < 0)$

L'énergie disponible est insuffisante pour puiser l'eau mais peut être utilisée pour produire de l'hydrogène.

- **Cas 1** :  $\Delta P_2 = P_{PV} - P_{lyz} \geq 0$

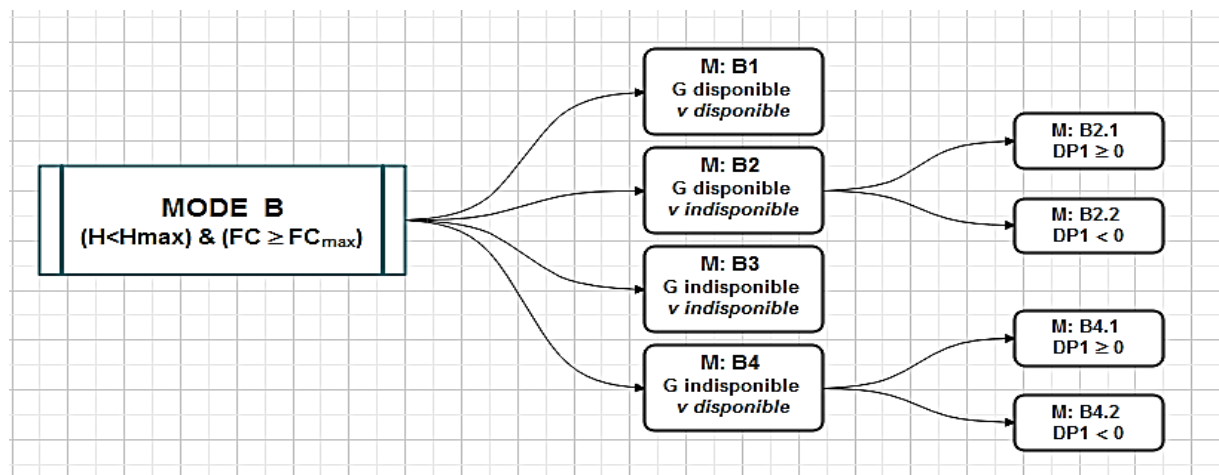
Dans ce cas, l'énergie fournie par les panneaux en silicium servira à produire de l'hydrogène par électrolyse.

- **Cas 2** :  $\Delta P_2 = P_{PV} - P_{lyz} < 0$

L'énergie produite par le bombardement de photons n'est suffisante ni pour le pompage ni pour la génération de l'hydrogène. Le circuit tertiaire de l'éclairage de la station, sera ainsi alimenté.

#### IV.4.4.2 Mode B « $H < H_{max}$ & $FC > FC_{max}$ »

Le réservoir n'est pas encore plein et les bouteilles d'hydrogène sont pleines. Quatre possibilités entre l'insolation et la vitesse du vent sont à dénombrer.



*Figure IV.4 : Schéma synoptique du mode « B »*

- a) Mode B1** :  $(G > G_{smin}) \& (v_{min} \leq v \leq v_{max})$

L'ensoleillement disponible et la vitesse du vent sont convenables pour une hybridation de ces deux sources. De la relation (IV.1), la puissance du système hybride devient :

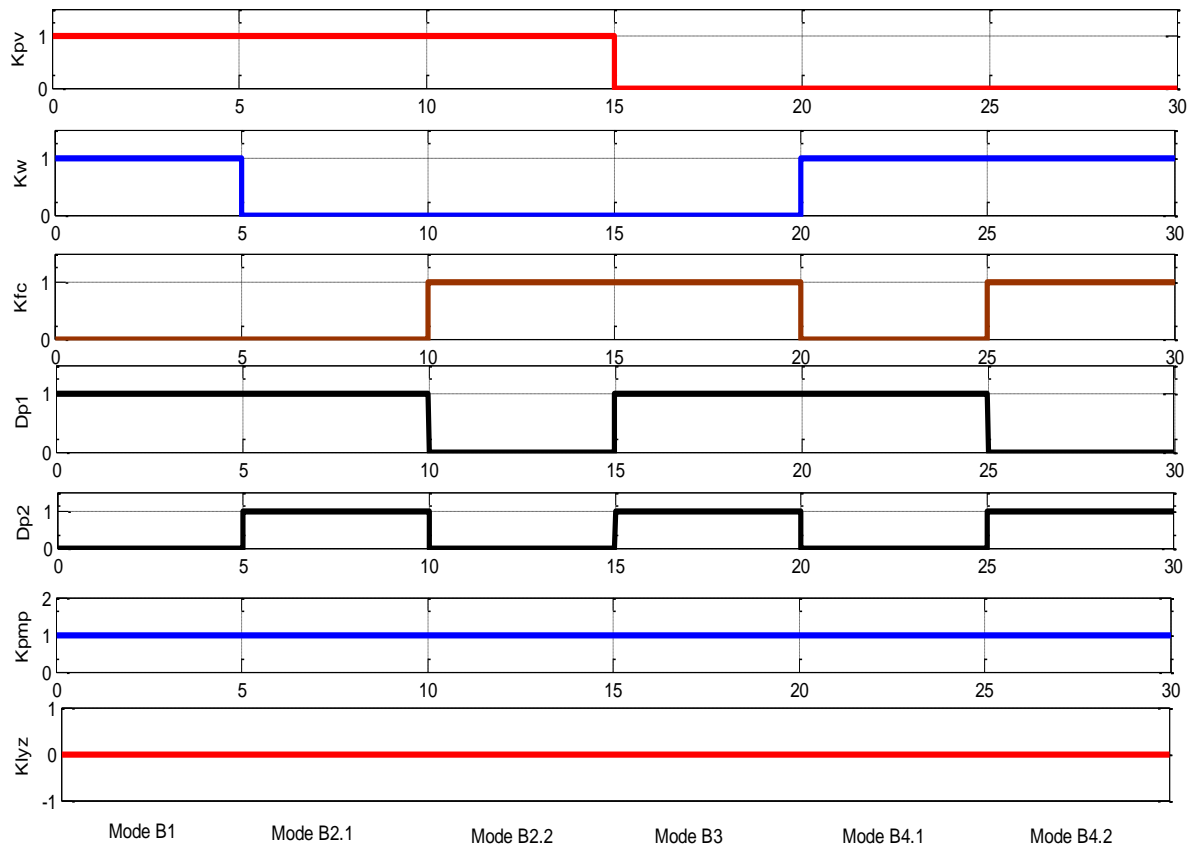
$$P_{SEH} = P_{pv} + P_w$$

- b) Mode B2** :  $(G \geq G_{smin}) \& (v < v_{min} \text{ ou } v > v_{max})$

Les panneaux solaires fournissent de l'énergie, par contre l'éolienne, pour des raisons d'adaptation, ne génère aucune puissance. La mesure des puissances mises en jeu, permet entre autre de vérifier si l'énergie disponible est suffisante pour alimenter les enroulements de la MASDE ou bien de compenser le manque de puissance par l'enclenchement de la FC.

- **Mode B2.1** :  $(\Delta P_1 = P_{PV} - P_{pmp} \geq 0)$

L'énergie du soleil permet de fournir la tension du bus continu des onduleurs de la MASDE.



**Figure IV.5 : Chronogramme de fonctionnement du mode « B »**

- **Mode B2.2** : ( $\Delta P_1 = P_w - P_{pmp} < 0$ )

Dans ce cas, l'énergie disponible est insuffisante pour puiser l'eau, où maintenant il est nécessaire de mettre en action la pile à combustible pour fournir le manque en puissance. De l'équation (IV.1), la puissance du système hybride devient :  $P_{SEH} = P_{pv} + P_{FC}$

- c) **Mode B3** : ( $G < G_{smin}$ ) & ( $v < v_{min}$  ou  $v > v_{max}$ )

Les deux sources renouvelables ne fournissent aucunes énergies. Pour puiser l'eau, le recours à la pile à combustible demeure l'unique moyen pour assouvir les besoins en eau de cette localité. La puissance du système hybride devient alors  $P_{SEH} = P_{FC}$ .

- d) **Mode B4** : ( $G < G_{smin}$ ) & ( $v_{min} \leq v \leq v_{max}$ )

Les panneaux solaires ne fournissent pas de l'énergie et la vitesse du vent permet de générer une tension.

- **Mode B4.1** : ( $\Delta P_1 = P_w - P_{pmp} \geq 0$ )

Dans ce cas, l'énergie disponible issue de l'éolienne est suffisante pour faire tourner la pompe centrifuge.

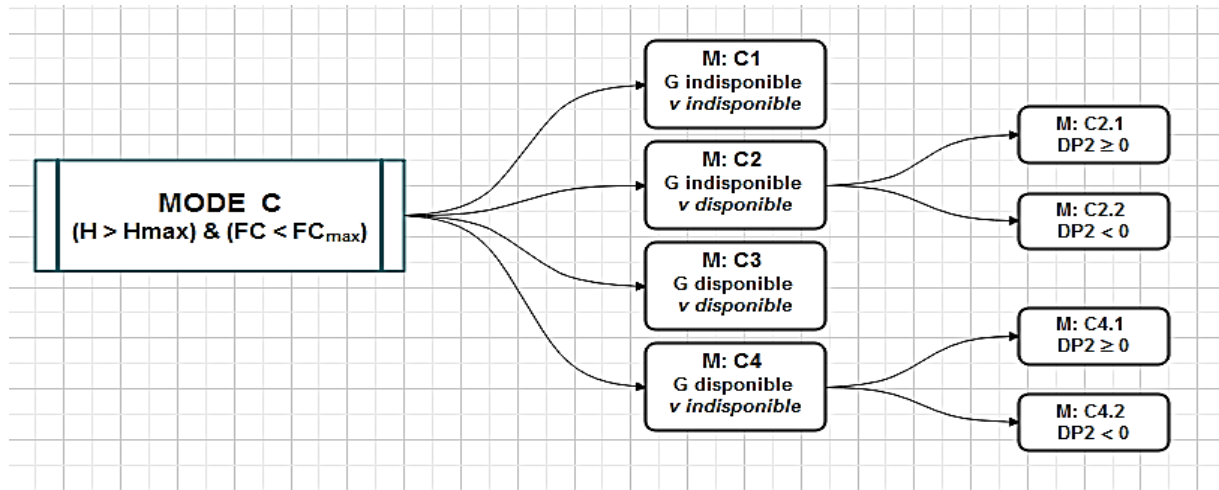
- **Mode B4.2** : ( $\Delta P_1 = P_W - P_{pmp} < 0$ )

L'énergie disponible est insuffisante pour puiser l'eau mais elle peut être jumelée avec la FC pour faire actionner la pompe.

De l'équation (IV.1), la puissance du système hybride devient :  $P_{SEH} = P_W + P_{FC}$ .

#### IV.4.4.3 Mode C « $H > H_{max}$ & $FC < FC_{max}$ »

Quatre combinaisons déterminent quatre modes de fonctionnement.



*Figure IV.6 : Schéma synoptique du mode « C »*

- a) Mode C1** : ( $G < G_{smin}$ ) & ( $v < v_{min}$  ou  $v > v_{max}$ )

La station de pompage est à l'arrêt du fait qu'aucunes sources renouvelables n'est disponibles dans ses conditions climatiques hostiles.

- b) Mode C2** : ( $G < G_{smin}$ ) & ( $v_{min} \leq v \leq v_{max}$ )

Les panneaux solaires ne fournissent pas d'énergie, par contre l'éolienne génère une puissance qui est en fonction de la vitesse du vent.

- **Mode C2.1** : ( $\Delta P_2 = P_w - P_{lyz} \geq 0$ )

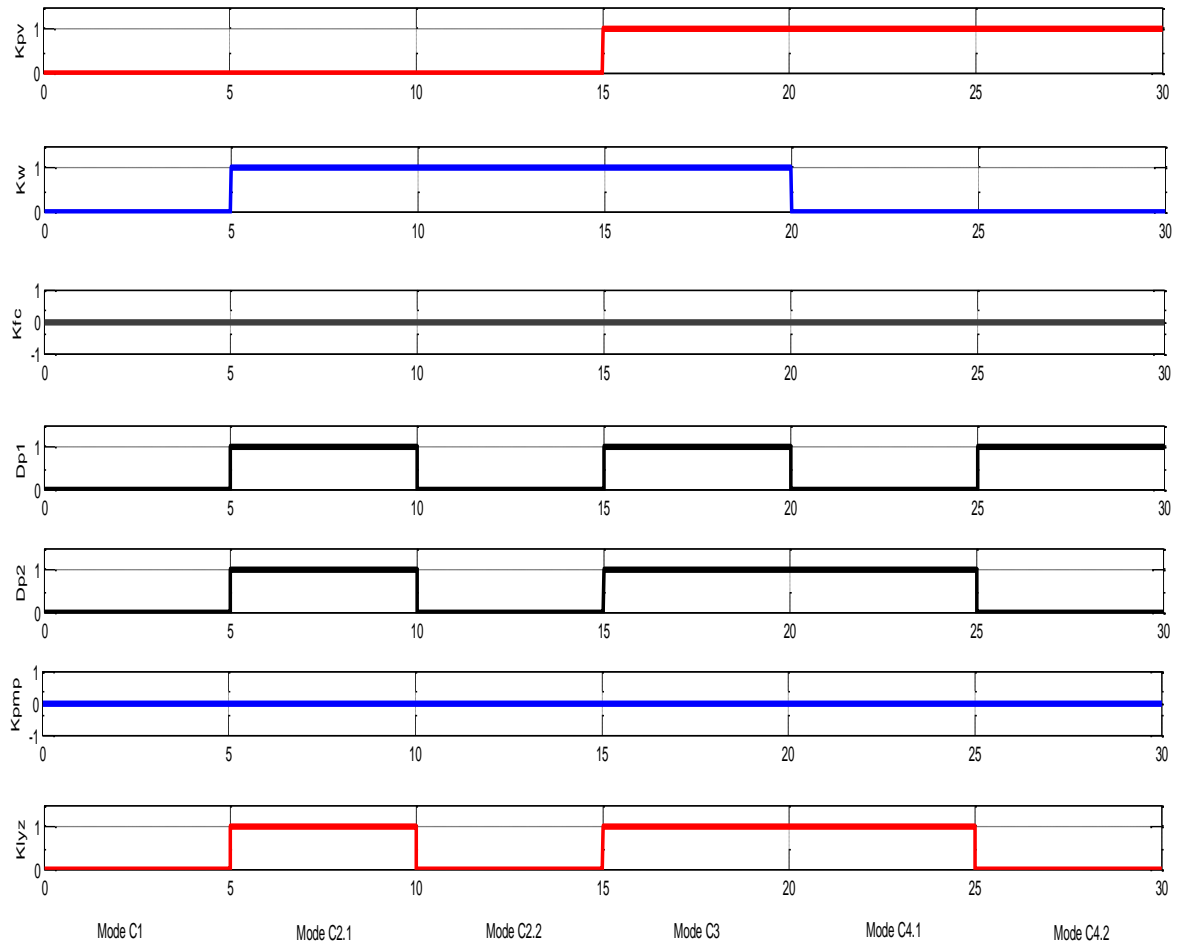
Dans ce cas, il faut s'assurer que l'énergie disponible est suffisante pour la génération de l'hydrogène. L'énergie d'Eole fournit la tension continue nécessaire à l'électrolyseur.

- **Mode C2.2** : ( $\Delta P_2 = P_w - P_{lyz} < 0$ )

Dans ce cas, l'énergie disponible est insuffisante pour produire de l'hydrogène pour la pile à combustible. L'excédent énergétique sera utilisé pour l'éclairage.

- c) Mode C3** : ( $G \geq G_{smin}$ ) & ( $v_{min} \leq v \leq v_{max}$ )

Les deux sources renouvelables fournissent de l'énergie. L'hybridation est alors réalisée en alimentant l'électrolyseur par la combinaison du photovoltaïque et de l'éolienne.



**Figure IV.7 :** Chronogramme de fonctionnement du mode « C »

**d) Mode C4 :** ( $G \geq G_{smin}$ ) & ( $v < v_{min}$  ou  $v > v_{max}$ )

Les panneaux solaires fournissent de l'énergie et la vitesse du vent ne permet pas à l'éolienne de générer une tension.

- **Mode C4.1 :** ( $\Delta P_2 = P_{PV} - P_{pmp} \geq 0$ )

Dans ce cas, l'énergie disponible du soleil est suffisante pour faire alimenter l'électrolyseur. Le GPV fournit la tension continue nécessaire.

- **Mode C4.2 :** ( $\Delta P_2 = P_{PV} - P_{pmp} < 0$ )

L'énergie disponible est insuffisante pour l'électrolyseur. L'énergie ainsi disponible, soit elle sera utilisée pour le circuit tertiaire de l'éclairage, soit on procède à l'arrêt de la station.

**IV.4.4.4 Mode D «  $H > H_{max}$  &  $FC > FC_{max}$  »**

Dans ce cas de figure, le niveau haut du réservoir d'eau est atteint et les bouteilles de l'hydrogène sont pleines. La station de pompage est à l'arrêt.





Figure IV.8 : Schéma synoptique de la gestion de la station de pompage

Tableau IV.3 : Etats des contacteurs « Ki » lors des différents modes de fonctionnement.

MODE	$K_{PV}$	$K_w$	$K_{FC}$	$\Delta P_1 \geq 0$	$\Delta P_2 \geq 0$	$K_{pmp}$	$K_{lyz}$	$P_{SEH}$
<b>A1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>A2</b>	<b>A2.1</b>	0	1	0	1	$\phi$	1	$P_w = P_{pmp}$
	<b>A2.2</b>	0	1	0	0	1	0	$P_w = P_{lyz}$
<b>A3</b>	0	1	0	0	0	0	0	0
<b>A4</b>	<b>A4.1</b>	1	1	0	$\phi$	$\phi$	1	$P_{PV} + P_w = P_{pmp}$
	<b>A4.2</b>	1	0	0	1	$\phi$	0	$P_{PV} = P_{pmp}$
<b>A4.2</b>	1	0	0	0	1	0	1	$P_{PV} = P_{lyz}$
<b>A4.2</b>	1	0	0	0	0	0	0	0
<b>B1</b>	1	1	0	1	$\phi$	1	0	$P_{PV} + P_w = P_{pmp}$
<b>B2</b>	<b>B2.1</b>	1	0	0	1	$\phi$	1	$P_{PV} = P_{pmp}$
	<b>B2.2</b>	1	0	1	0	$\phi$	1	$P_{PV} + P_{FC} = P_{pmp}$
<b>B3</b>	0	0	1	1	$\phi$	1	0	$P_{FC} = P_{pmp}$
<b>B4</b>	<b>B4.1</b>	0	1	0	1	$\phi$	1	$P_w = P_{pmp}$
	<b>B4.2</b>	0	1	1	0	$\phi$	1	$P_{FC} + P_w = P_{pmp}$
<b>C1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>C2</b>	<b>C2.1</b>	0	1	0	$\phi$	1	0	$P_w = P_{lyz}$
	<b>C2.2</b>	0	1	0	$\phi$	0	0	0
<b>C3</b>	1	1	0	$\phi$	1	0	1	$P_{PV} + P_w = P_{lyz}$
<b>C4</b>	<b>C4.1</b>	1	0	0	$\phi$	1	0	$P_{PV} = P_{lyz}$
	<b>C4.2</b>	1	0	0	$\phi$	0	0	0
<b>D</b>	0	0	0	0	0	0	0	0

### IV.5 Système GPV-FC

L'utilisation du photovoltaïque devient une aubaine pour les populations isolées et l'association des piles à combustible au système assure la continuité de l'approvisionnement en énergie électrique [47].

Cette énergie obtenue sera notamment utilisée pour pomper l'eau, élément vital à la survie humaine, à celles des cheptels et des plantations.

Le pompage solaire est une technologie intéressante pour l'alimentation en eau des sites isolés, avec des débits qui peuvent atteindre  $100 \text{ m}^3/\text{j}$  et une hauteur manométrique totale de 10 mètres maximum. Au-delà de ces valeurs, la surface des panneaux solaires à installer devient vite importante et l'installation très onéreuse [3, 7, 178, 179].

#### IV.5.1 Composants du système hybride GPV-FC

Cette combinaison comporte deux sources d'énergie renouvelable, le GPV et une FC, deux convertisseurs DC/DC, deux onduleurs qui alimentent les deux étoiles du MASDE qui entraînent l'arbre d'une pompe centrifuge qui puise l'eau d'un puits ou d'un forage vers un réservoir pour la distribuer par gravité [47].

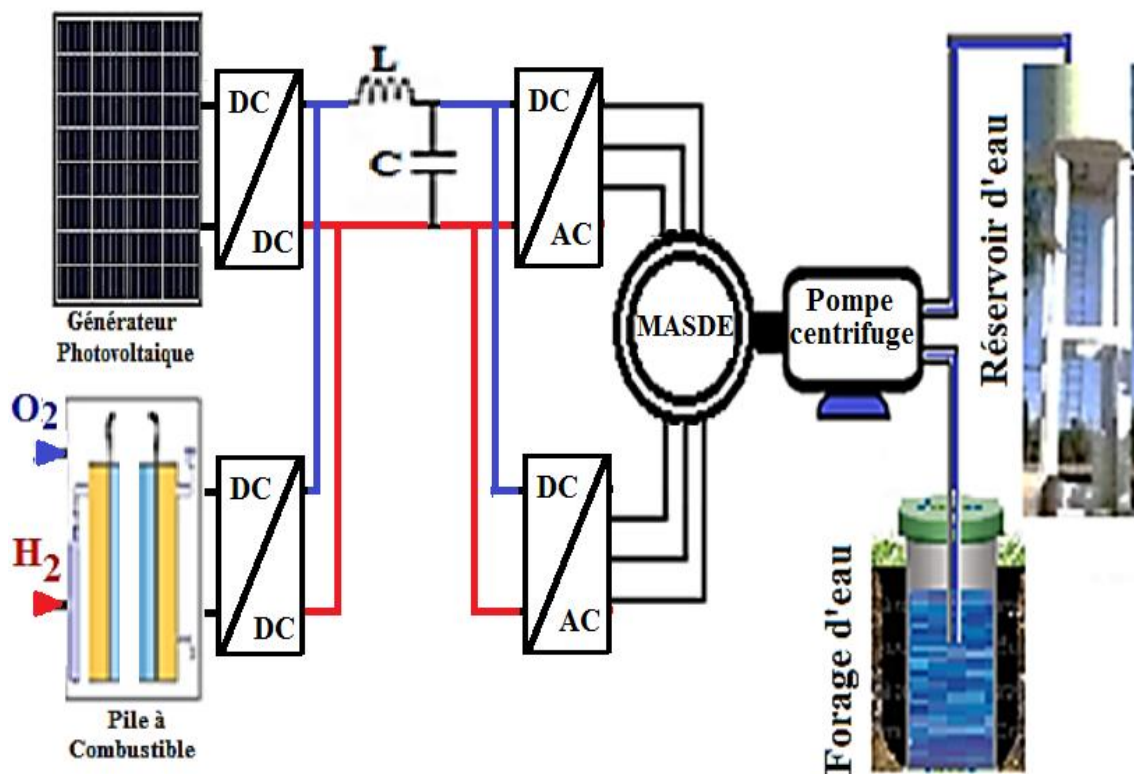


Figure IV. 9 : Installation hybride Photovoltaïque – Pile à combustible [47]

### IV.5.2 Dimensionnement du système hybride GPV-FC

Dans cette station de pompage hybride, le GPV est considéré comme source d'énergie fondamentale et la pile à combustible comme une source de secours. Elle est implantée pour assouvir les besoins en eau potable de la localité située dans une zone désertique non raccordée au réseau conventionnel [47].

Pour le besoin en eau potable de cette localité, le recours au pompage photovoltaïque s'avère une solution intéressante à long terme et le dimensionnement des éléments constituant le champ photovoltaïque est effectué au chapitre III [3, 47].

### IV.5.3 Résultats & commentaires

Lors de la simulation, réalisée par le logiciel Matlab Simulink, dans l'intervalle [0 ; 3s], le générateur photovoltaïque fournit la tension du bus continu nécessaire à l'alimentation des deux onduleurs du MASDE, puis dans l'intervalle [3 ; 5s] où les panneaux solaires n'assurent plus la récolte d'électron, la pile à combustible prend le relais en offrant la tension du bus continu nécessaire au fonctionnement de la pompe.

La figure (IV.10) illustre la tension simple du premier bras du premier onduleur alimentant la première étoile du stator de la MASDE.

Au démarrage du moteur, la pompe centrifuge oppose un couple variant avec le carré de la vitesse de rotation (figure IV.11) puis à l'instant  $t=3s$ , le GPV est déconnecté et la pile à combustible est actionnée pour subvenir aux besoins de la charge. Il ressort clairement de cette figure que le moteur suit exactement le couple de charge de la pompe avec une bande d'hystérésis égale à 4 N.m. Certaines fluctuations du couple de la pompe sont également observées.

Le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à l'arrêt qui s'avère plus important qu'en rotation [47].

La figure (IV.12) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la MASDE en fonction du temps. Le zoom de la figure (IV.13) illustre la période d'activation de la FC. Il est à noter que la réponse en vitesse est lisse et sans aucun dépassement et il ressort également que le MASDE suit sa vitesse de référence qui est égale à 288 rad/s.

Au moment de la transition entre le GPV et la FC, la vitesse du moteur baisse de 287 rad/s à 252 rad/s et la vitesse de conduite est recouvrée dans un laps de temps de récupération  $T_{rec}$  égal à 0,4 seconde.

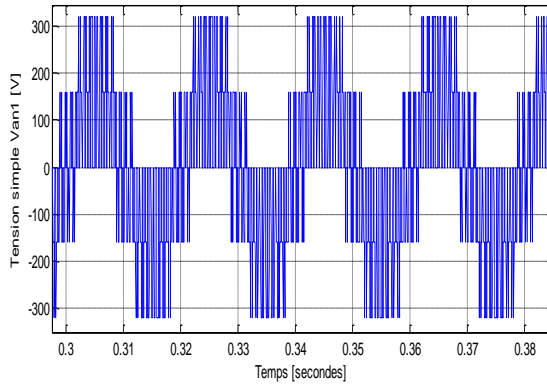


Figure IV. 10 : Tension « va1 » de l'onduleur

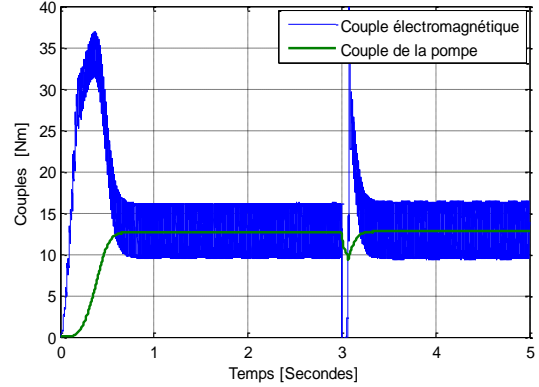


Figure IV. 11 : Couple électromagnétique & couple résistant de la pompe

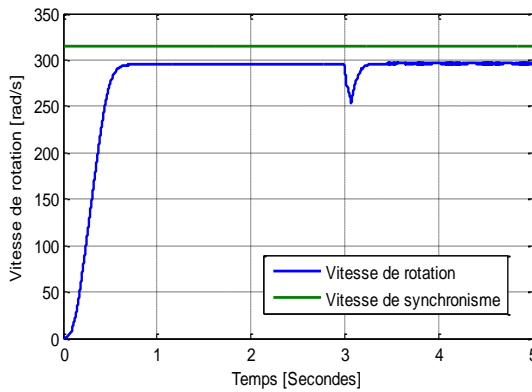


Figure IV. 12 : Vitesse de rotation du moteur

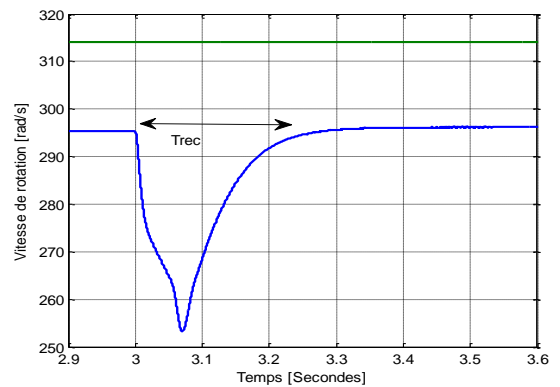


Figure IV. 13 : Vitesse de rotation (Zoom)

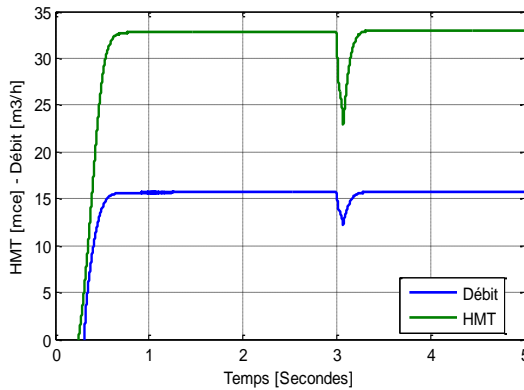


Figure IV. 14 : Caractéristique de la hauteur manométrique totale HMT et du débit.

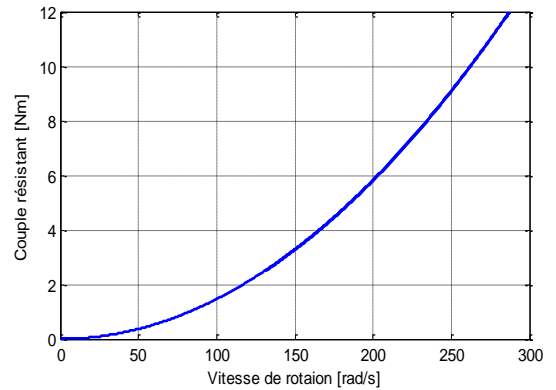


Figure IV. 15 : Caractéristique du couple résistant et de la vitesse de rotation du moteur

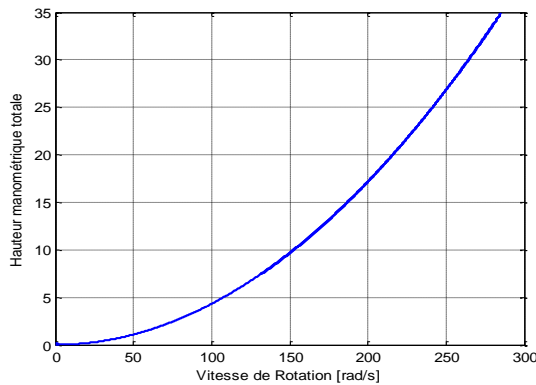


Figure IV. 16 : Caractéristique de la HMT en fonction de la vitesse de rotation du moteur

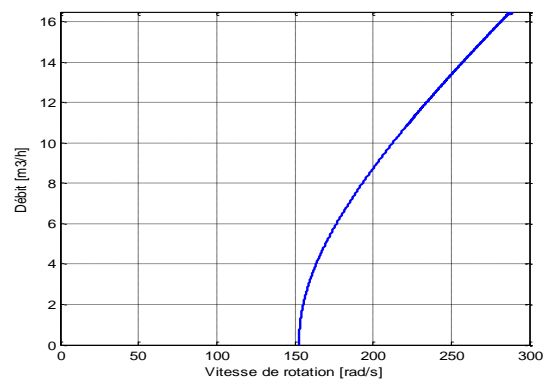


Figure IV. 17 : Caractéristique débit en fonction de la vitesse de rotation du moteur

Au démarrage, le couple de la machine oscille, atteignant 26 Nm (Fig. IV.11), avant de se stabiliser, avec quelques ondulations, autour d'une valeur de 12,5 Nm. La pompe, à son tour, s'oppose à un couple résistant, qui augmente rapidement, pendant une période de 0,8 s, avant de suivre l'évolution du couple moteur.

La figure (IV.14) montre l'évolution du débit d'eau et de la hauteur manométrique totale (HMT). On peut noter, à partir de cette figure, que les deux caractéristiques ont la même allure que la vitesse de rotation du moteur.

Il est à affirmer que, pour avoir un débit dans les tuyaux, il faudrait que la pompe atteigne une certaine vitesse de rotation obtenue après quelques instants.

Les figures (IV.15) et (IV.16) confirment respectivement la relation quadratique qui existe entre le couple de la pompe et sa vitesse de rotation comme décrit par l'équation (II.114) et entre le HMT et la vitesse de rotation comme décrit par l'équation (II.115).

A partir de la figure (IV.17), on peut affirmer que la pompe commencera à pomper de l'eau si et seulement si la vitesse de rotation est au-delà de la vitesse de seuil qui est égale à 151 rad/sec. Il est également intéressant de noter que la vitesse de rotation du moteur et le débit d'eau sont directement proportionnels.

Le couple de la pompe, la vitesse de rotation, le débit pompé et la HMT dépendent de la variation de l'ensoleillement. Cependant, l'utilisation de la technique de recherche de puissance maximale permet de surmonter le handicap d'un faible éclairage [3, 47].

Dans le cas d'absence du soleil et d'une sollicitation d'un pompage après diminution du niveau du réservoir, la pile à combustible assurera le relais en offrant une tension continue aux deux onduleurs qui serviront à alimenter le moteur asynchrone à double étoile, entraînant ainsi la pompe, pour subvenir aux besoins du manque d'eau.

#### IV.5.4 Synthèse d'une combinaison GPV-FC

Avec un bon rendement, une fiabilité excellente et une autonomie de fonctionnement, le «pompage photovoltaïque» peut fonctionner avec des batteries de stockage, ou bien, directement, au fil du soleil dit « fil de l'eau ». Ce dernier est considéré comme un système plus simple, plus fiable et moins coûteux, où l'eau est pompée dans un réservoir, similaire à un accumulateur, avant de la distribuer par gravité en cas de besoin [3, 178].

Les performances dépendent de l'ensoleillement, de la température ambiante, ou bien encore, du rendement des modules photovoltaïques, des différents convertisseurs, du moteur et de la pompe utilisés. La continuité de service est garantie par l'utilisation de la FC qui assurera la pérennité du système surtout que l'hydrogène est certainement le vecteur du futur prometteur d'un développement assuré.

## IV.6 Système Photovoltaïque-Eolienne

En plein essor, le pari réel des pays industrialisés est, sans aucun doute, la recherche de nouvelles sources d'énergie, de préférence renouvelables, en remplacement des sources dites conventionnelles habituelles. Une combinaison des deux énergies disponibles et inépuisables, y compris l'énergie du soleil et celle du vent, sera une excellente alternative pour électrifier des sites isolés et alimenter des stations de pompage pour puiser l'eau [101].

Dans cette combinaison, le MASDE est utilisé pour faire tourner la pompe centrifuge et la GASDE est utilisée pour la génération de l'électricité. La raison de ce choix est sans aucun doute la fiabilité et la robustesse accrue des machines asynchrones à double étoile qui peuvent toujours tourner même en cas de perte de phases d'alimentation ou de court-circuit dans les enroulements du stator et fournir le couple nécessaire pour pomper l'eau dans des conditions dégradées [101, 175].

Outre le fait que le pompage hybride permet d'obtenir des débits nettement significatifs, la proposition de combiner ces deux énergies renouvelables se justifie par le fait que le photovoltaïque (PV) et l'éolienne ne sont pas en concurrence, mais au contraire, ils peuvent se renforcer mutuellement, tout en économisant le coût supplémentaire des batteries qui sont simplement remplacées par un réservoir de grande capacité [101].

### IV.6.1 Composants du système hybride GPV – Turbine éolienne

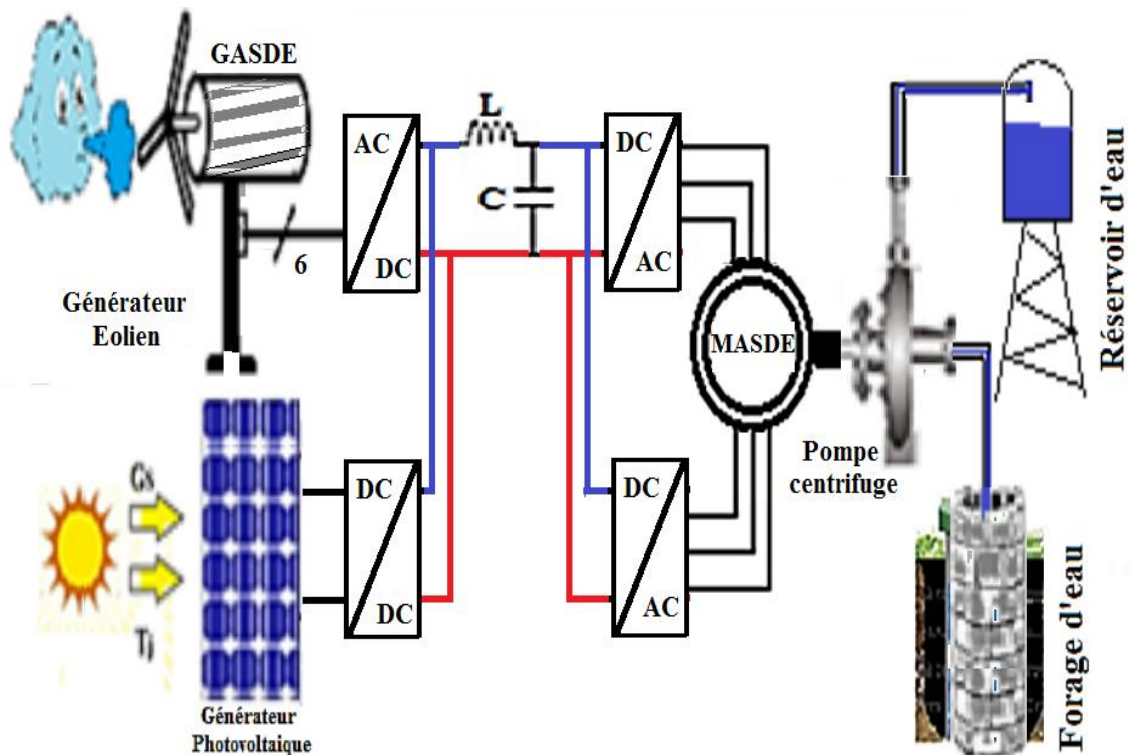


Figure IV. 18 : Installation hybride photovoltaïque – turbine éolienne [101]

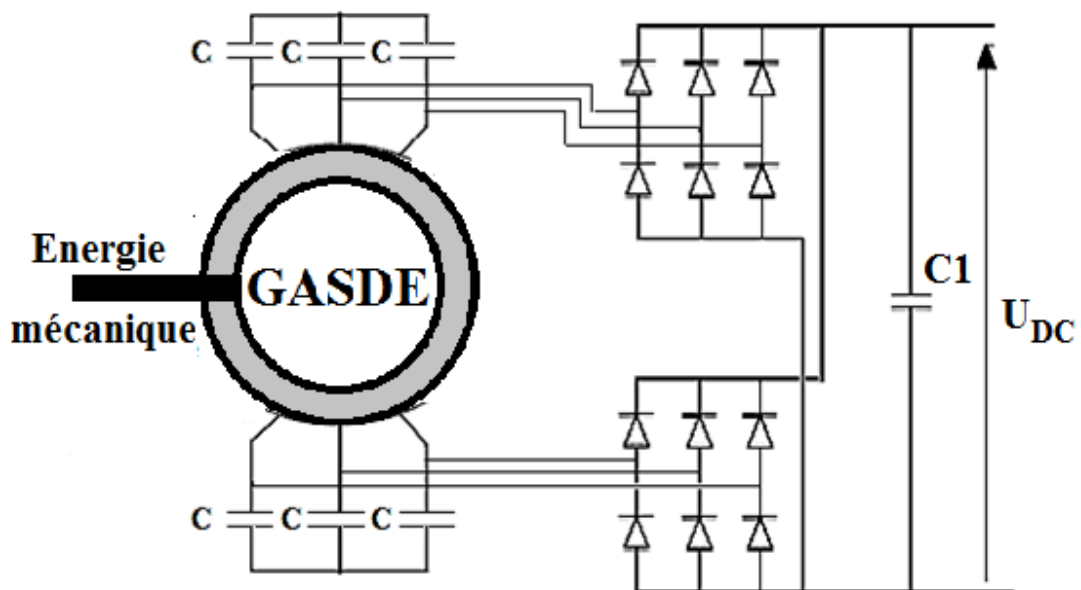


Comme le montre la figure (IV.18), ce système se compose d'une source photovoltaïque et d'une éolienne équipée d'une GASDE, d'un convertisseur AC/DC, de deux convertisseurs DC/DC, deux onduleurs DC/AC qui alimentent le MASDE qui entraîne une pompe centrifuge qui puise l'eau d'un forage vers un réservoir d'eau afin de la distribuer par gravité [101].

#### IV.6.2 Redressement des tensions générées par la GASDE

Les condensateurs utilisés pour l'auto-amorçage de la GASDE, représentés par la figure (IV.19) ont une valeur de  $40\mu F$ . Les tensions générées par la GASDE représentées par la figure IV.20 doivent être redressées afin de pouvoir alimenter les onduleurs de la MASDE.

Le redresseur est un montage en pont, ou parallèle double PD3 dit aussi montage en pont de Graëtz. Deux redresseurs sont utilisés pour les deux étoiles de la GASDE. Ce montage peut être considéré comme résultant de l'association convenablement menée d'un montage à anodes communes et d'un montage à cathodes communes [180].



**Figure IV. 19 :** Redressement double PD3 de la tension générée par la GASDE

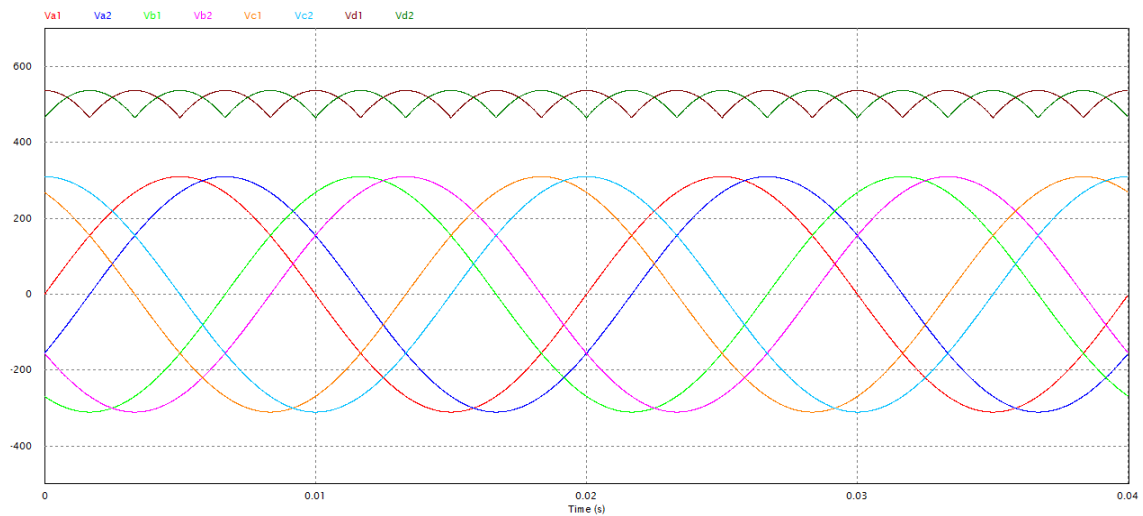
La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$U_{dc} = \sqrt{3} \times V_m \times \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} \quad (\text{IV.4})$$

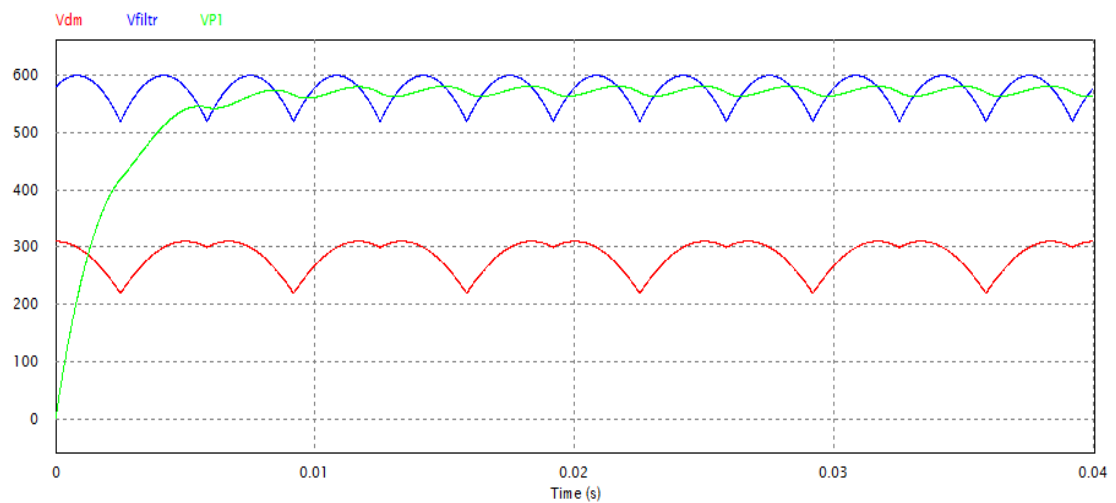
Et la valeur efficace de la tension redressée est donnée par :

$$U_{eff} = V_m \times \sqrt{\frac{3 \times \left(1 + \sin \frac{2\pi}{6}\right)}{2 \times \frac{2\pi}{6}}} \quad (\text{IV.5})$$

La figure (IV.20) montre que la tension de sortie du redresseur est composée de la somme des deux tensions redressées de fréquence égale à 6 fois la fréquence de la source.



**Figure IV. 20 :** Allure des tensions à l'entrée et à la sortie du redresseur (PSIM)



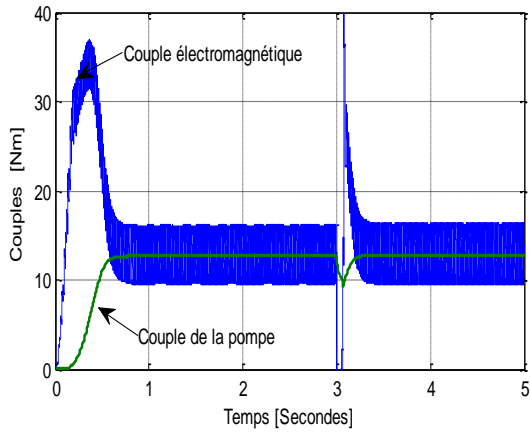
**Figure IV. 21 :** Allure des tensions redressées (PSIM)

### IV.6.3 Résultats & commentaires

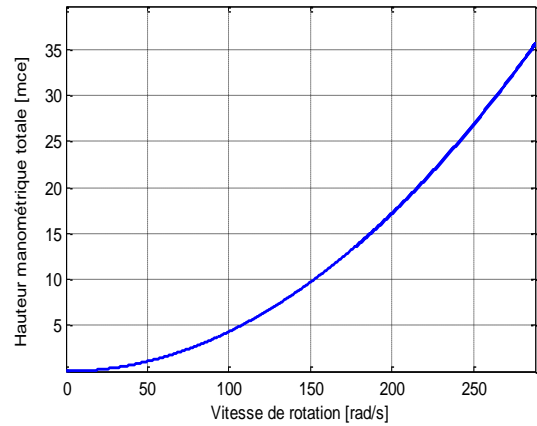
Dans l'intervalle [0s ; 3s], le GPV assure la tension du bus DC des deux onduleurs utilisés pour alimenter le MASDE pour entrainer la pompe centrifuge.

Dans l'intervalle [3s ; 5s], la puissance nécessaire n'est plus garantie par le GPV, d'où la nécessité de recourir au générateur éolien en proposant une tension du bus DC nécessaire après un redressement électrique des tensions générées par le GASDE avec un vent d'une vitesse de composante moyenne de 6,5 m/s.

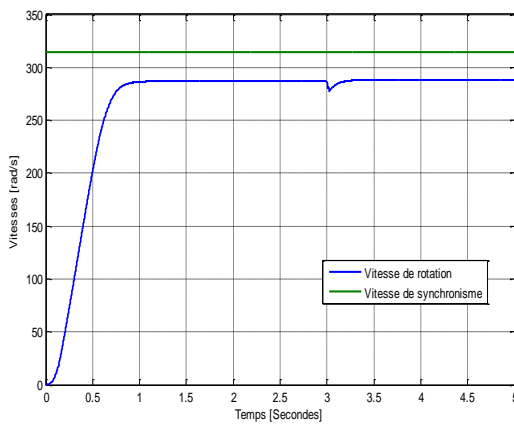




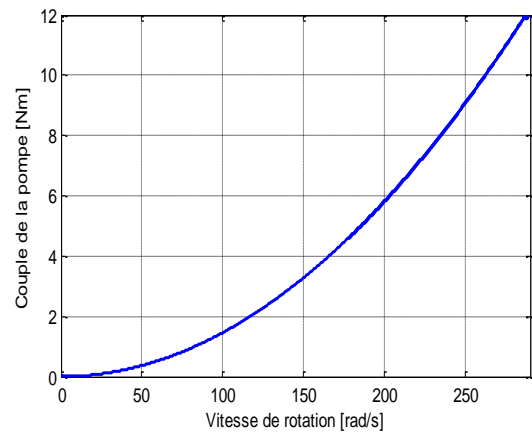
**Figure IV. 22 :** Evolution du couple électromagnétique et du couple résistant



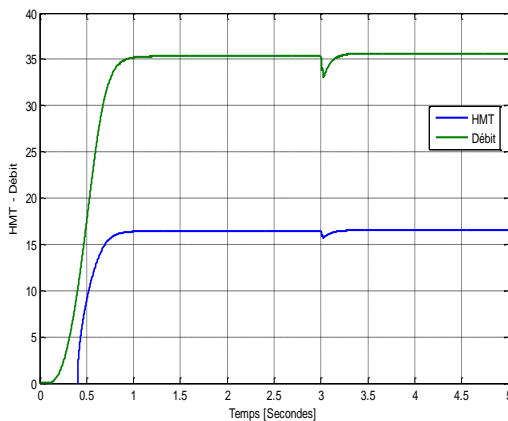
**Figure IV. 23 :** Caractéristique Hauteur manométrique totale – vitesse de rotation



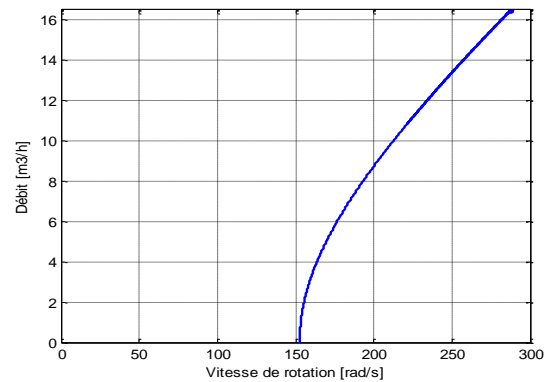
**Figure IV. 24 :** Vitesse de rotation et vitesse de synchronisme



**Figure IV. 25 :** Caractéristique couple de la pompe – vitesse de rotation



**Figure IV. 26 :** Caractéristique HMT & du débit



**Figure IV. 27 :** Caractéristique du débit en fonction de la vitesse de rotation

Au démarrage, la figure (IV.22) montre que le couple électromagnétique atteint un pic de 36 Nm avant d’atteindre le couple résistif de la pompe avec une valeur oscillante de 2 Nm autour du couple de la pompe qui est de 12 Nm.

La figure (IV.26) montre que le débit évolue de la même manière que la HMT évolue et que cette ascension est similaire à celle de la vitesse.

D'autre part, la figure (IV.23) montre que la variation de la hauteur manométrique totale est similaire à celle du couple résistantif (fig. IV.25) qui obéit, convenablement, à une variation en fonction du carré de la vitesse de rotation qui reflète la relation (II.114) et (II.115).

La figure (IV.27) montre qu'avant d'atteindre une vitesse de 150 rad/s, la tuyauterie de la pompe ne fournit aucun débit, puis le débit croît avec l'augmentation de la vitesse de rotation.

#### **IV.6.4 Synthèse d'une combinaison « Photovoltaïque-Eolienne »**

Pour répondre aux besoins énergétiques dans les zones isolées, le vent est l'un des vecteurs énergétiques promoteurs pour remplacer les combustibles fossiles à long terme et l'introduction de l'énergie photovoltaïque devient une exigence. L'utilisation du système hybride devient une nécessité absolue pour parvenir à combler les lacunes de chaque source renouvelable du système hybride.

Les résultats obtenus indiquent clairement que la combinaison de ces deux sources dans cette région, nous permet de répondre aux besoins en eau potable de la localité, soit pendant la journée où le soleil fournit suffisamment d'énergie pour pomper l'eau ou à la tombée de la nuit quand le vent souffle suffisamment pour obtenir les débits désirés.

#### **IV.7 Système Eolienne – Pile à combustible**

Cette combinaison met en exergue une éolienne qui convertit l'énergie récupérée par ses pales en une énergie électrique via la génératrice asynchrone à double étoile (GASDE)

Ne pas prévoir, au préalable, de système de stockage serait un handicap certain pour le SEH, raison pour laquelle la pile à combustible (FC) peut faire face au caractère stochastique du vent.

Cette pile à combustible sera utilisée lors des vitesses de vent inférieures à la vitesse d'amorçage où l'éolienne ne produit pas d'électricité, ou bien supérieure à la vitesse de décrochage de l'éolienne, faute de quoi, les enroulement de la GASDE seront grillés.

La fiabilité et la robustesse du MASDE et la possibilité d'un fonctionnement en mode dégradé est une raison convaincante de l'introduire dans la chaîne de pompage, tout en cherchant un compromis entre les différents éléments [181].

Cette combinaison sera une solution de remplacement par perfection pour électrifier les sites isolés non connectés aux réseaux électriques et alimenter les stations de pompage afin de puiser l'eau [76].

### IV.7.1 Composants du système hybride « Turbine éolienne – Pile à combustible »

Cette éolienne associée à la pile à combustible assure un pompage hybride. Cette chaîne est constituée d'un convertisseur AC/DC, un convertisseur DC/DC, une génératrice asynchrone à double étoile et deux onduleurs triphasés qui alimentent les deux étoiles du moteur asynchrone à double étoile qui entraîne l'arbre d'une pompe centrifuge qui puise de l'eau à partir d'un puits ou d'un forage vers un réservoir en vue de la distribuer par gravité [65].

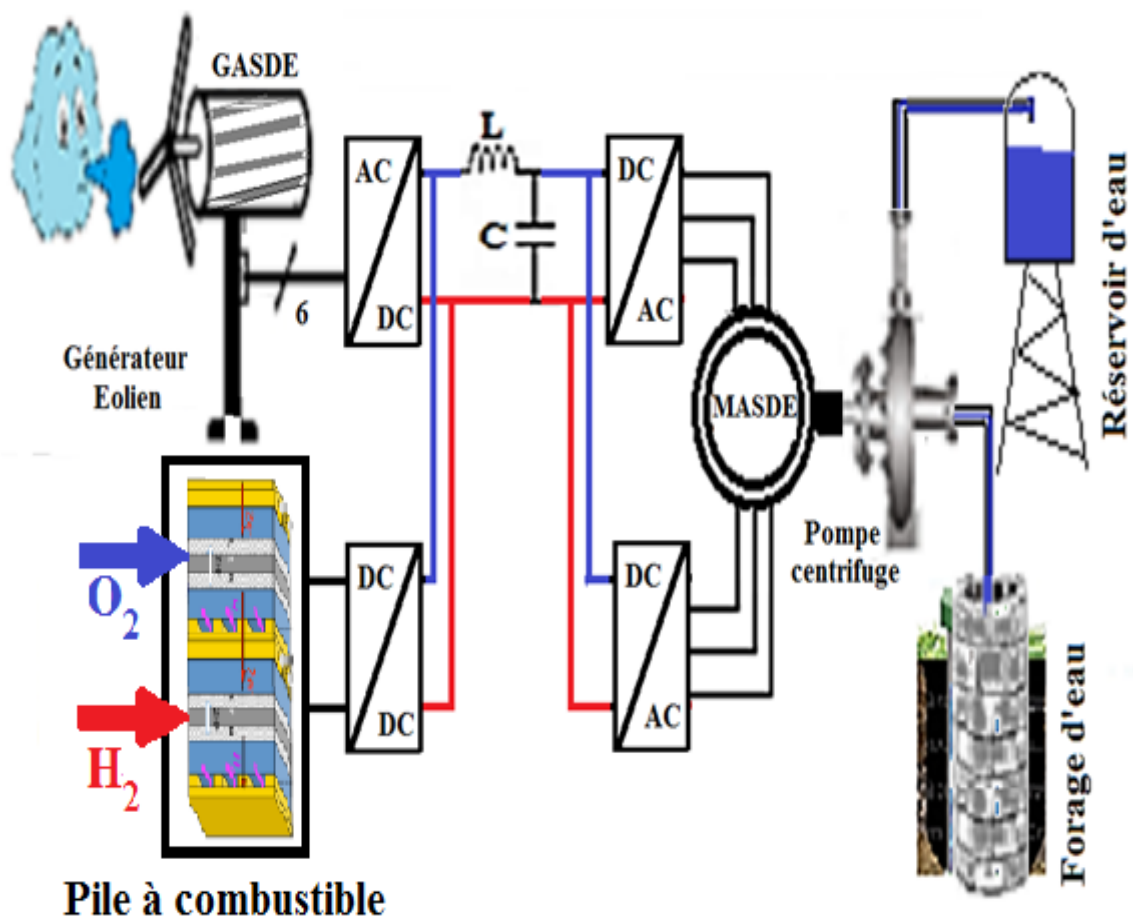
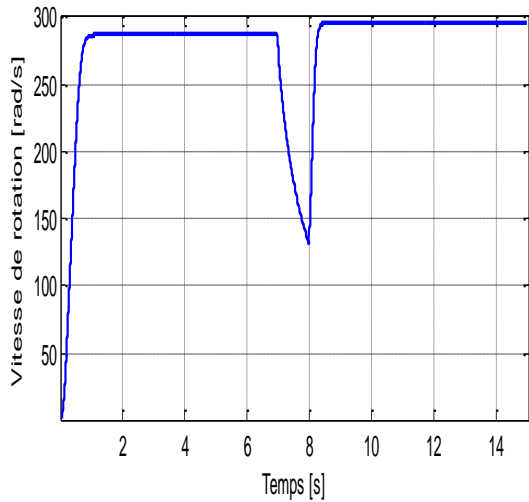


Figure (IV.28) : Système hybride éolien-Pile à combustible

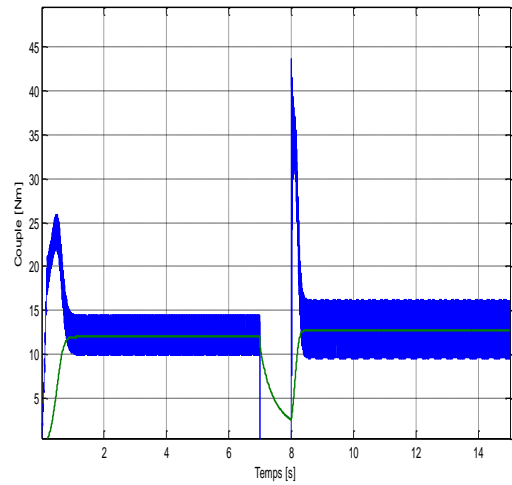
Le principe de production de l'énergie éolienne consiste à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique pour tourner le rotor d'une génératrice asynchrone à double étoile qui va produire une énergie électrique.

Dans cette station de pompage hybride, l'éolienne est considérée comme source d'énergie fondamentale et la pile à combustible comme une source de secours où le dimensionnement est effectué au chapitre III.

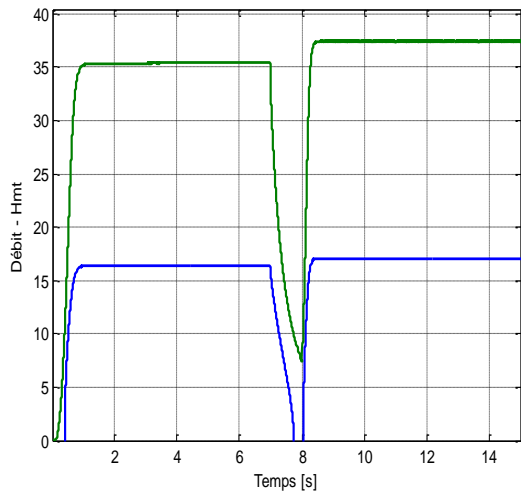
**IV.7.2 Résultats et commentaires**



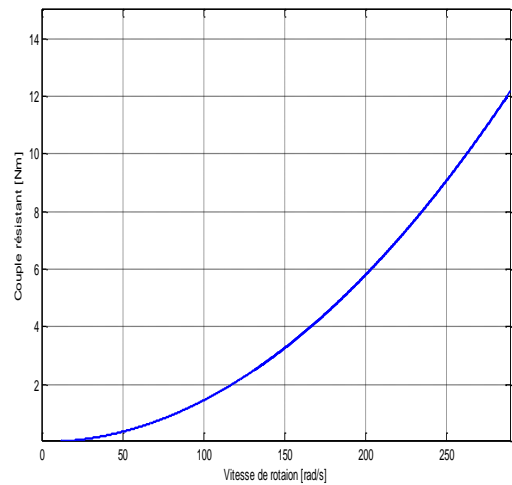
**Figure (IV.29) : Caractéristique de la Vitesse de Rotation**



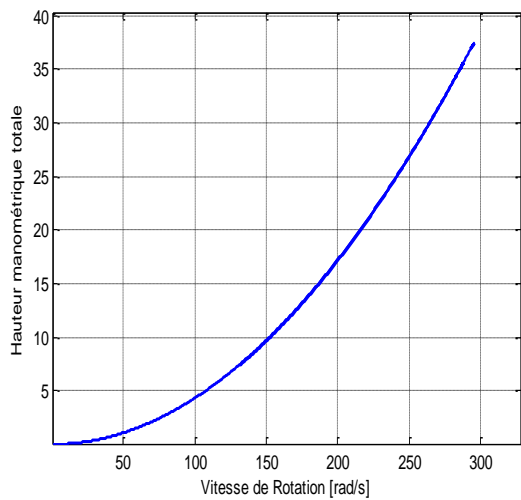
**Figure (IV.30) : Couple électromagnétique & Couple résistant**



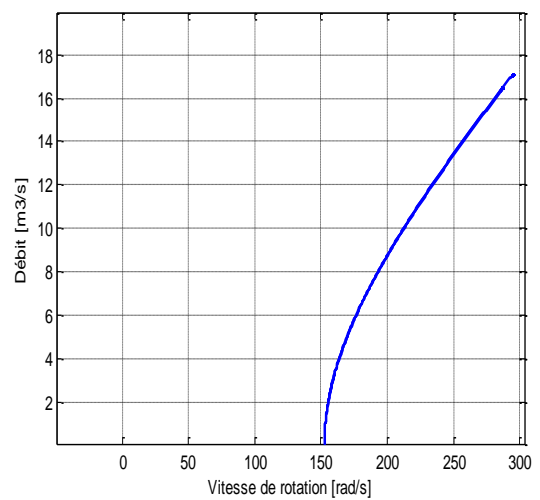
**Figure (IV.31) : Hauteur manométrique totale & Débit**



**Figure (IV.32) : Caractéristique Couple résistant & Vitesse de rotation**



**Figure (IV.33) : Hauteur manométrique totale & Vitesse de rotation**



**Figure (IV.34) : Caractéristique Débit & Vitesse de rotation**

Pour des puits profonds à grand débits, le pompage éolien électrique s'avère le plus adéquat pour les sites isolés et assez bien ventés, avec une compétitivité par rapport à d'autres sources d'énergie. L'utilisation de ces aérogénérateurs isolés sert surtout à alimenter des zones d'habitation ou des systèmes de télécommunication isolés.

Il est impératif d'effectuer sur ce site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que sa direction, sur une longue durée.

Soit un profil de vent imposé comme une entrée du système, constitué d'une composante d'une valeur moyenne de 6 m/s.

Dans l'intervalle [0 ; 7s], l'éolienne fournit la tension du bus continu nécessaire à l'alimentation des deux onduleurs de la MASDE, puis dans l'intervalle [8 ; 15s], la FC prend le relais en offrant cette tension continue nécessaire au bus continu.

Le débit évolue de la même manière que l'évolution de la hauteur manométrique totale, et qui est semblable à l'allure de la vitesse de rotation.

L'allure de la variation de la hauteur manométrique totale est semblable à l'allure de la variation du couple résistant qui obéit, convenablement, à la variation en fonction du carré de la vitesse de rotation.

La pompe doit être entraînée à une certaine vitesse pour laquelle puisse fournir un débit. En effet, avant d'atteindre ce niveau de célérité, soit une valeur de 150 rad/s, la tuyauterie de la pompe ne fournit aucun débit, ensuite, le débit augmente avec l'élévation de la vitesse de rotation. Le débit est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois, il faut une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir un débit.

#### **IV.7.3 Synthèse d'une combinaison « Eolienne – Pile combustible »**

Pour subvenir aux besoins énergétiques dans les zones isolées, le vent est l'un des vecteurs énergétiques idéal pour remplacer à long terme les énergies fossiles et la FC sera comme une énergie de secours dans les cas les plus défavorables.

Les résultats obtenus montrent que le vent et l'hydrogène peuvent répondre aux besoins en eau potable de cette localité.

#### **IV.8 Système « Photovoltaïque – Eolienne – Pile à combustible »**

En tenant compte des performances obtenues lors des combinaisons, à chaque fois de deux sources renouvelables, il s'avère que la combinaison de ces trois sources va combler toutes les lacunes et les insuffisances obtenues. Notre idée d'hybridation des trois sources sera bénéfique pour la station de pompage et va apporter des débits de pompage plus importants.

### IV.8.1 Composants du système « Photovoltaïque – Eolienne – Pile à combustible »

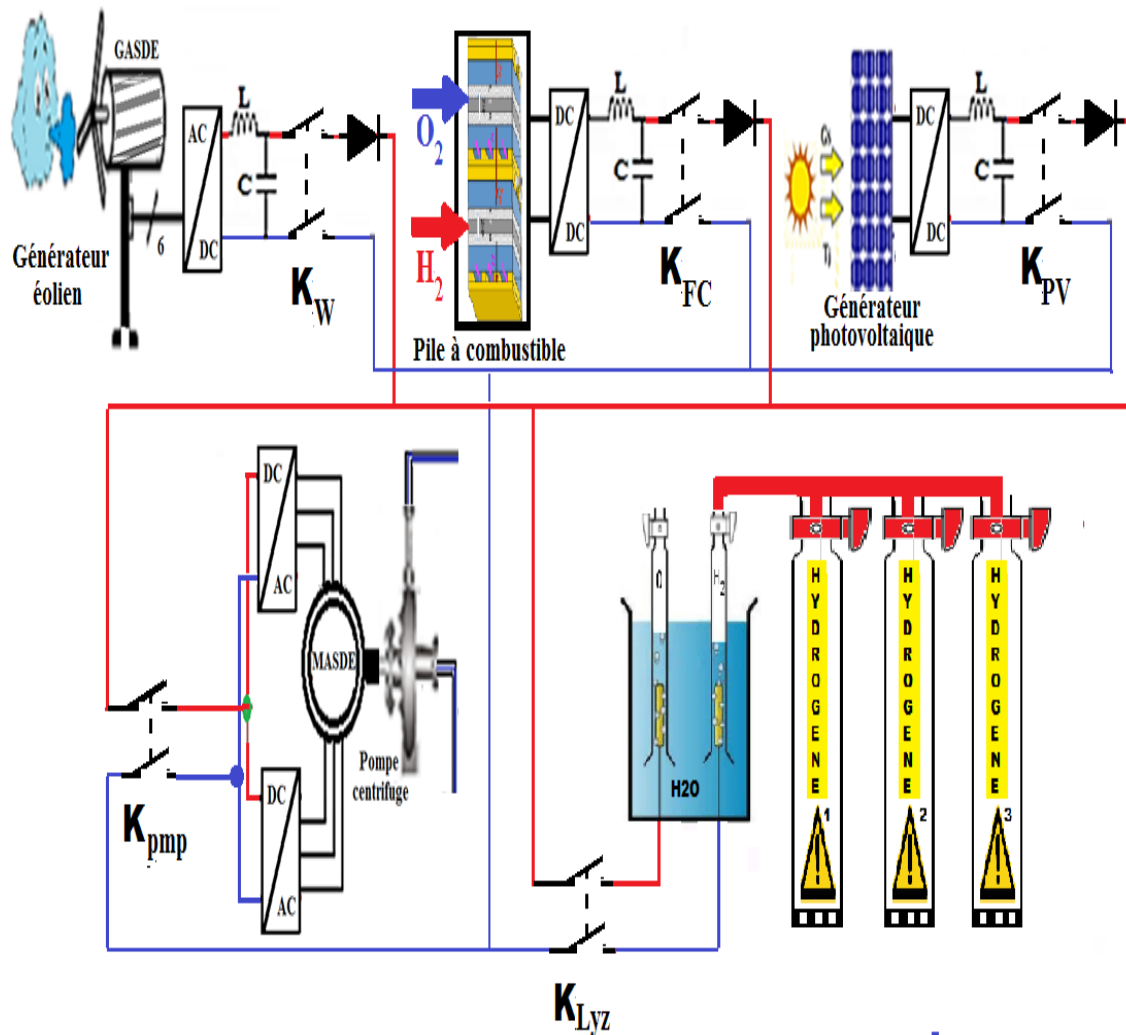


Figure IV.35 : Installation de la station de pompage

Ne pouvant simuler et étudier les 21 cas de fonctionnement illustrés dans le tableau (IV.3), nous allons y remédier par le traitement de quelques cas de fonctionnement de quelques paliers d'éclairage du générateur photovoltaïque combinés à trois niveaux de vitesse de vent.

### IV.8.2 Combinaison « Photovoltaïque – Eolienne – Pile à combustible »

D'après le tableau (III.2), qui recense les vitesses du vent au cours d'une année et la figure (I.8), qui résume les zones de fonctionnement de l'éolienne, le fonctionnement de la turbine s'effectuera dans la zone II avec un fonctionnement à puissance optimale.

La puissance fournie est proportionnelle au cube de la vitesse du vent, tel que d'après la relation (II.29) et après calculs, la puissance de la turbine sera déduite par la relation suivante :

$$P_t = 23 \times v^3 \quad [W] \quad (IV.6)$$

La vitesse de rotation des pales est donnée après calculs effectués sur la relation (III.17) par :

$$\Omega = 15.28 \times v \quad [tr/mn] \quad (IV.7)$$

**Tableau IV.4 :** Quelques caractéristiques en fonction de la vitesse du vent

Vitesse du vent $v$ [m/s]	Puissance de la turbine $P_t$ [w]	Vitesse de rotation des pales [tr/mn]	Puissance électrique $P_{elec}$ [W]
6	4968	91.68	3935
5	2875	76.4	2277
4	1472	61.12	1166

Les relations (IV.6) et (IV.7) permettent le calcul de quelques caractéristiques de la production éolienne en fonction de la vitesse du vent et sont inscrites dans le tableau (IV.4).

Nous allons aborder le cas où le réservoir d'eau et les bouteilles d'hydrogène sont supposés encore pas pleins. Les divers calculs des puissances récoltées en fonction de l'ensoleillement et de la vitesse du vent, ainsi que l'état des contacteurs actionnant la pompe centrifuge et l'électrolyseur sont résumés par le tableau (IV.5).

**Tableau IV.5 :** Production combinée « Photovoltaïque – éolienne »

$G_s$ [W/m <sup>2</sup> ]	$P_{PV}$ [W]	$v$ [m/s]	$P_w$ [W]	$P_{SEH}$ [W]	$K_{pmp}$	$K_{Lyz}$
250	833.70	6	3935	4768.70	1	0
		5	2277	3110.70	0	1
		4	1166	1999.70	0	0
500	1891.70	6	3935	5826.70	1	0
		5	2277	4168.70	1	0
		4	1166	3057.70	0	1
750	2940.80	6	3935	6875.80	1	0
		5	2277	5217.80	1	0
		4	1166	4106.80	1	0
1000	3960	6	3935	7895.00	1	0
		5	2277	6237.00	1	0
		4	1166	5126.00	1	0

Donc, d'après l'organigramme (page 132), il s'agit du mode A de fonctionnement.

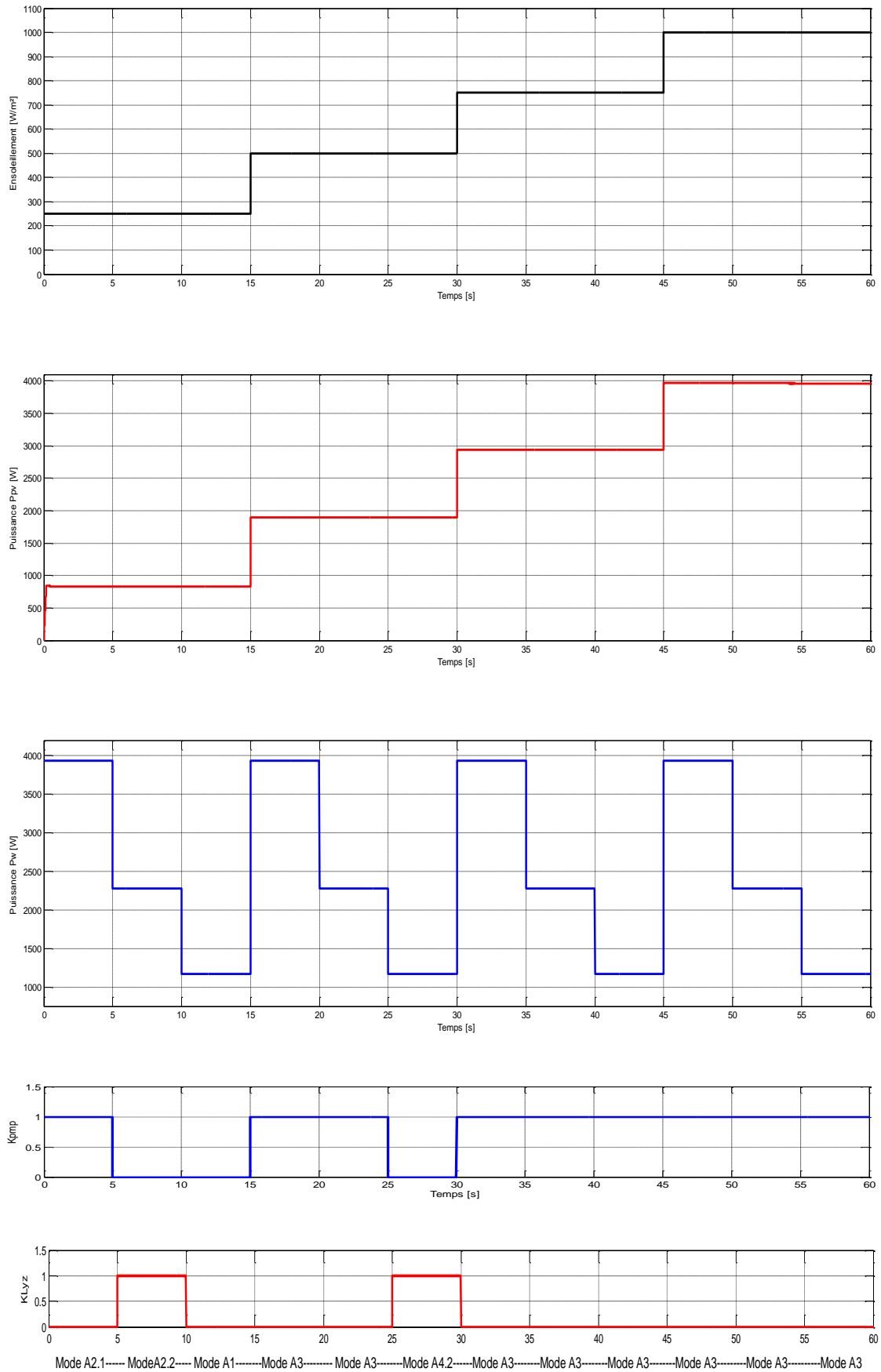


Figure IV.36 : Puissance de quelques modes de fonctionnement



### IV.8.3 Synthèse d'une combinaison « Photovoltaïque – Eolienne – Pile combustible »

Une autonomie est ainsi réalisée avec la combinaison des deux sources renouvelables, qui se trouvent être complémentaires au lieu d'être concurrentielle, et l'ajout d'une énergie de secours par l'adoption de l'hydrogène ne sera qu'un réconfort certain pour la station de pompage.

A chaque instant, ce système hybride doit fournir l'énergie nécessaire demandée par la charge et assurer une meilleure qualité de l'énergie fournie. Le suivi strict en temps-réel des règles d'exploitation préconçues ne peut se réaliser qu'avec une gestion automatisée des éléments qui permettra de garantir une stabilité de fonctionnement, notamment lors des transitions entre les différents modes de fonctionnement.

Evidemment, le dimensionnement des éléments du système hybride et le choix de la stratégie de fonctionnement influencent directement sur les performances, le rendement et la durée de vie de l'installation.

### IV.9 Conclusion

Assurer l'approvisionnement en énergie électrique conventionnelle est parfois très difficile ou impossible compte tenu des conditions topographiques difficiles des terres.

L'avancée spectaculaire de l'emploi des énergies dites « renouvelables » au niveau mondial, est le catalyseur principal pour tester les performances et exploiter les multiples avantages qu'offrent les machines multiphasées dans l'entraînement de la pompe centrifuge.

Du fait de leur caractère inépuisable, les énergies renouvelables permettent un développement durable et constituent une solution économique viable pour les populations rurales isolées et éloignées notamment dans cette région du Grand Sud où le coût de l'électrification est prohibitif.

La configuration du SEH consiste à dimensionner, selon les contraintes d'utilisation, les ressources énergétiques obtenues à partir de la conversion éolienne et photovoltaïque qui peuvent remplacer à long terme les énergies fossiles et l'introduction d'une FC devient une nécessité absolue pour parvenir à combler les lacunes de chaque source renouvelable du système hybride.

Les systèmes de commande ont pour objectifs la récupération au maximum de l'énergie du vent et du rayonnement solaire et une gestion du système de stockage.

Le choix de la pompe doit être basé sur l'analyse de la demande et de ses fluctuations quotidiennes et saisonnières et sur la possibilité d'expansion à l'avenir.

La stratégie de fonctionnement qui est développée pour le système autonome hybride doit s'adapter aux variations de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire. Des cartographies du site d'implantation de la station de pompage doivent être établies au préalable, faute de quoi un surdimensionnement risque d'augmenter les fonds nécessaires à la réalisation de la station et un sous dimensionnement risque d'influencer négativement et directement sur la puissance espérée pour alimenter les équipements de la station de pompage.

Les scénarios établis par nos soins ne sont que des propositions que nous avons jugées utile pour le bon fonctionnement de la station. Des modifications peuvent être envisageables en fonction des besoins de la localité. Prévoir une pompe de secours ou bien une deuxième pompe pour un fonctionnement en série peut être aussi un degré de liberté supplémentaire quant à la durée de service du dispositif de pompage.

L'utilisation d'automates programmables industriels dans la gestion des différents flux énergétiques permet un suivi et un fonctionnement en temps réel des différents niveaux des réservoirs ainsi que l'état des instruments constituant la station de pompage.

Pour plus de sécurité de fonctionnement et compte tenu que le site de Timimoune est situé au fin fond du désert Algérien, le dépannage et la réparation des pannes ne peuvent être effectués dans les délais, raisons pour lesquelles un fonctionnement en mode exceptionnel nommé mode dégradé est envisagé où une étude de ce mode fera l'objet du prochain et dernier chapitre de ce travail.

# **CHAPITRE V**

## **ÉTUDE DU POMPAGE HYBRIDE EN MODE DÉGRADÉ**

## CHAPITRE V

### ÉTUDE DU POMPAGE HYBRIDE EN MODE DÉGRADÉ

---

#### V.1 Introduction

Auparavant, un intérêt particulier est porté sur l'emploi de la machine asynchrone à double étoile pour sa flexibilité et sa souplesse. Elle est de plus en plus utilisée dans les sites isolés, la mécanisation navale, les applications militaires ou tout autre système embarqué étant donné que le dépannage n'est pas évident dans le court laps de temps [3, 182].

Actuellement, après le « déclenchement » de la pandémie COVID 19 et en raison du confinement imposé à presque tous les pays du monde, une réparation immédiate ou rapide ne peut être possible, d'où une marche en mode dégradé devient nécessaire lorsque ce genre d'actionneurs est utilisé pour remplir des réservoirs d'eau servant à approvisionner les ménages en eau potable, un liquide si précieux dans ce genre de circonstances [181].

Les fabricants et les utilisateurs des machines électriques ont initialement mis en œuvre une protection simple telle que la protection contre la surintensité, contre la surtension et la protection contre les défauts de terre pour assurer un fonctionnement sûr et fiable [3].

Toutefois, le système d'entraînement n'est pas à l'abri d'une défaillance où il est devenu très important de diagnostiquer les défauts dès leurs naissances, parce qu'une panne dans l'un des corps constitutifs de la machine peut arrêter tout le processus de production, ce qui cause soit des pertes financières évidentes, soit des dangers imminents [183].

C'est pour cette raison qu'il est important de fortement s'intéresser au fonctionnement de la machine en présence d'une anomalie afin de pouvoir surpasser le défaut et assurer la continuité de service et un fonctionnement le plus satisfaisant possible.

#### V.2 Description du fonctionnement en mode « dégradé »

Le fonctionnement est en mode dégradé, lorsque pour une raison quelconque, le fonctionnement est altéré au niveau des alimentations ou au niveau des actionneurs ou au niveau des dispositifs de l'électronique de puissance, que ce soient des hacheurs, des onduleurs ou des redresseurs, la marche du processus n'est plus satisfaisante [184].

Ce mode de marche est connu sous le nom du « mode dégradé » qui n'est autre qu'un fonctionnement exceptionnel où un ou plusieurs éléments du système d'entraînement soient en dysfonctionnement [185].

L'expression « fonctionnement en mode dégradé » qualifie la situation d'un système dont on maintient l'exploitation sans pour autant disposer de toutes les ressources fonctionnelles nécessaires. A défaut d'une réparation pour retrouver au plus vite une situation normale ou « restaurée », le fonctionnement en mode dégradé, le fonctionnement partiel ou a contrario au ralenti peuvent entraîner la perte de « maîtrise du procédé ».

La poursuite même temporaire de l'exploitation dans ces conditions, sans études des implications par l'analyse des risques, ni définition et mise en œuvre de mesures compensatoires spécifiques expose le processus à des risques dont on ignore les conséquences.

Dans le cas d'un mode dégradé, pour les machines asynchrones à double étoile, si aucune mesure n'est prise, l'entraînement de la pompe ou la génération de tension risquent de ne plus être assurés et des oscillations du couple apparaissent. Si ces dernières sont, le plus souvent simplement, gênantes, elles sont parfois nocives pour des systèmes embarqués et sensibles [3].

Les études ont révélé qu'en cas d'ouverture d'une phase statorique, plus la machine dispose de phases, moins la perturbation sur le couple est importante et que les ondulations engendrées s'accroissent avec le nombre de phases défectueuses [185].

Quand le nombre de phases est important, de quinze à dix-huit phases par exemple, aucun traitement particulier n'est effectué, excepté celui d'assurer un taux d'ondulation du couple acceptable et des courants limités dans les phases saines.

Par contre, pour les machines disposant de cinq à neuf phases d'alimentation environ, le traitement d'une ouverture de phase suit deux stratégies principales, soit par action sur une seule phase encore saine pour chaque phase ouverte, soit par action sur chacun des courants dans les phases encore saines [181, 186].

Une étude de fiabilité fait appel à la statistique et le résultat est une probabilité que le système opère un certain temps  $T$  dans des conditions données sans rencontrer de défaillances. Quel que soit l'échelle choisie, elle se doit d'être révélatrice du mode de défaillances considéré et les outils statistiques utilisés réfèrent au temps [137].

Pour un GPV, ce temps peut être quantifié par le temps d'exposition au soleil, le cycle thermique avec l'alternance jour/nuit ou ombre/lumière, ou encore la densité de puissance.

### **V.3 Causes de fonctionnement en mode « dégradé »**

Les causes d'un dysfonctionnement d'une chaîne d'énergie sont multiples et peuvent être rassemblées en quelques groupes selon la partie atteinte par la dégradation [185].

### **V.3.1 Dégradation au niveau des connectiques**

La connectique regroupe toutes les techniques liées aux connections physiques des liaisons électriques. Le connecteur industriel ou d'électrotechnique est un type de connecteur pouvant tolérer de fortes contraintes. Ces connecteurs ont la particularité d'être extrêmement robustes et de tolérer de fortes tensions.

Les défauts liés à la connectique peuvent être un contact desserré, une fusion d'un fusible de protection [187], ... etc.

### **V.3.2 Dégradation au niveau de la MASDE et de la GASDE**

La machine peut avoir des anomalies telles que la destruction d'un enroulement d'une phase statorique, un court-circuit inter spires qui peut s'aggraver et évoluer vers un court-circuit phase-phase ou phase-terre, ou encore une barre cassée, une rupture de l'anneau, un court-circuit dans les enroulements rotoriques, un problème de roulement à billes, une excentration rotorique [188, 189]...etc.

### **V.3.3 Dégradation au niveau des sources d'énergies**

La tension du bus continu utilisée pour l'alimentation de l'onduleur est obtenue, soit à partir d'un redressement des tensions alternatives générées par l'éolienne, soit par les hacheurs mis à la sortie du générateur photovoltaïque ou de la pile à combustible.

#### **V.3.3.1 Dégradation au niveau du générateur photovoltaïque**

En pratique, les problèmes rencontrés sont liés au fait qu'une cellule peut être amenée à travailler comme récepteur électrique au lieu de générer de l'énergie, cela se produit notamment si elle est ombragée. Elle aura donc à dissiper de l'énergie électrique qui va s'ajouter à l'énergie du rayonnement solaire puisque cette cellule ne travaillera pas en convertisseur. Des risques d'échauffement puis de dégradations sont à redouter (hot spot) [3].

Un déséquilibre au sein d'un groupement série ou d'un groupement parallèle peuvent survenir au cours d'un fonctionnement. Le risque d'ombrage partiel ou total n'est pas à écarter.

#### **V.3.3.2 Dégradation au niveau de l'éolienne**

Les conditions météorologiques, notamment les vents forts, la foudre, la neige ou la pluie froide peuvent provoquer un dysfonctionnement de l'éolienne. Le contact avec un volatile ou une machine volante, une défaillance mécanique, une survitesse du rotor, avec rupture du système de freinage ou une défaillance électrique peuvent être à l'origine de l'arrêt même de l'éolienne.

Le diagnostic est un système d'aide à la décision qui permet de localiser les composants ou les organes défaillants d'un système et éventuellement de déterminer ses causes. Trois types de défauts sont distingués dans une éolienne, soit un défaut d'actionneur, un défaut de capteur ou bien un défaut de procédé ou de composant.

### **V.3.3.3 Dégradation au niveau de la pile à combustible**

Pour assurer un fonctionnement optimal, la pile à combustible (FC) nécessite plusieurs composants auxiliaires pour assurer l'équilibre de l'installation nommé « Balance of Plant » (BoP) en anglais.

Les ventilateurs, les humidificateurs, les pompes à eau sont autant de composants nécessaires pour assurer l'équilibre de la génération par pile à combustible et sont aussi origine de défaut dans le cas où l'un de ces composants du BoP soit en disfonctionnement.

Le rendement de l'ensemble du système dépend du comportement à la fois de la FC elle-même et du BoP et devient nécessaire d'identifier les principaux comportements malsains et leurs causes afin de définir et d'améliorer les stratégies adaptées de contrôle.

## **V.4 Dégradation au niveau de l'alimentation du moteur**

Cette dégradation correspond aux défauts qui peuvent survenir sur la liaison et sur les onduleurs qui alimentent les six enroulements des deux étoiles du moteur induisant l'ouverture d'une phase d'alimentation statorique et conduisant à l'annulation du courant.

Les transistors de puissance composant l'onduleur de tension peuvent présenter des défauts de fonctionnement. Ces anomalies peuvent résulter d'une usure normale, d'une mauvaise conception, d'un mauvais montage ou d'un désalignement, d'une mauvaise utilisation, ou d'une combinaison de ces différentes causes [184, 185].

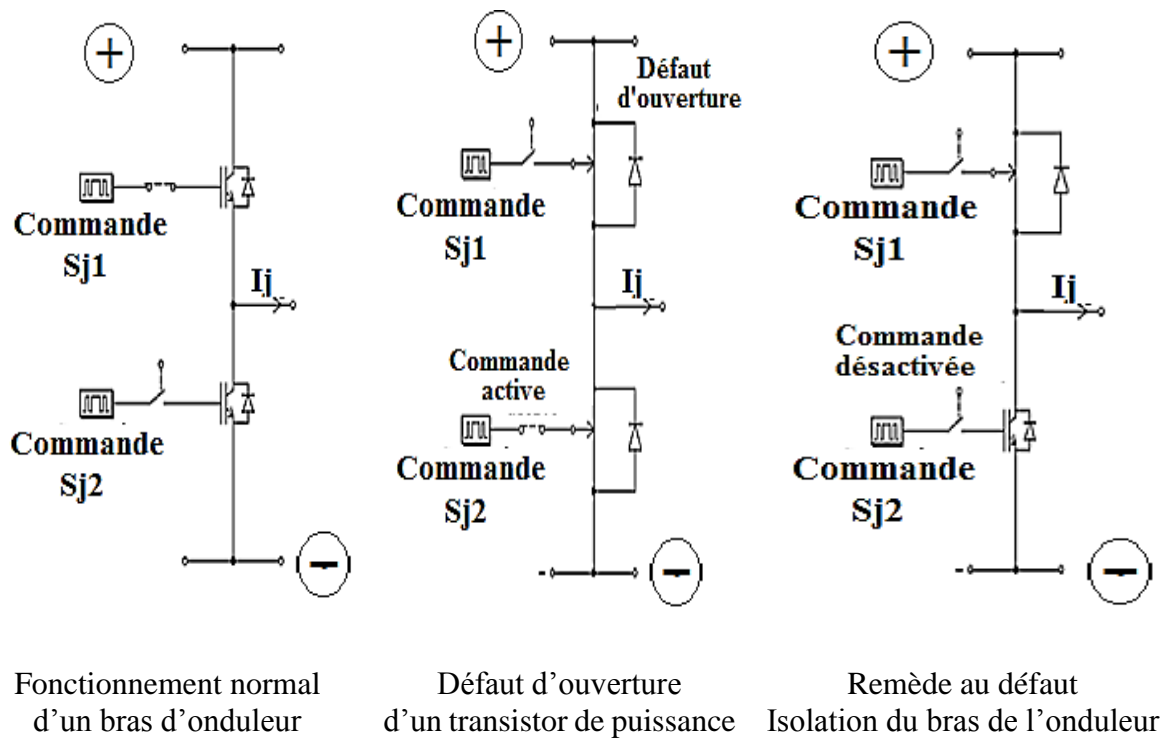
Les différentes études statistiques sur la dégradation d'une chaîne d'alimentation montrent que les défauts aux niveaux des onduleurs de tension et leurs commandes sont les plus fréquents. Il est donc justifié de concentrer l'étude aux pannes qui peuvent survenir sur les transistors de puissance, sur la connectique et sur les fusibles de protection [141, 185, 187, 190].

### **V.4.1 Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance**

Dans le cas où un des transistors constituant le bras de l'onduleur ne s'ouvre pas et que la commande du transistor complémentaire est active, le court-circuit de l'alimentation continue devient inévitable [3].

Pour éviter ce genre de désagrément, il est impératif d'agir soit par l'annulation de la commande du transistor sain ou bien l'utilisation d'un fusible de protection qui provoquera la

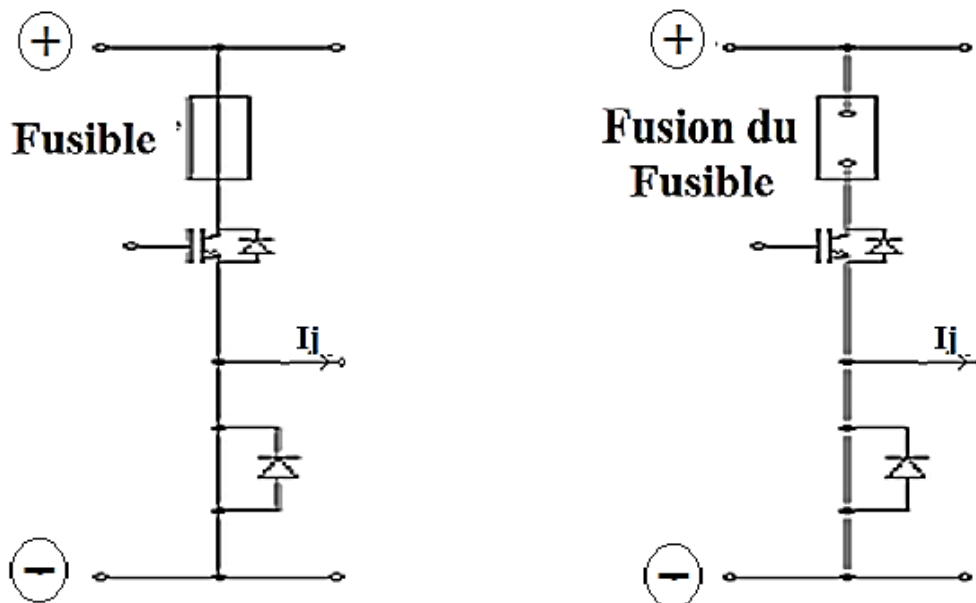
fusion ultra rapide d'un fusible placé en série avec les transistors de puissance d'une manière à protéger le bras en défaut en ouvrant ainsi le circuit électrique [142, 148, 184, 185].



*Figure (V.1) : Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance*

#### V.4.2 Défaut de fermeture d'un transistor de puissance ou fusion d'un fusible

Dans le cas où l'un des transistors constituant le bras de l'onduleur ne se ferme pas ou bien dans le cas de la fusion du fusible placé en amont, la tension aux bornes de la phase connectée au bras défaillant devient incontrôlable [3].



*Figure (V.2) : Fusion d'un fusible ultra rapide*

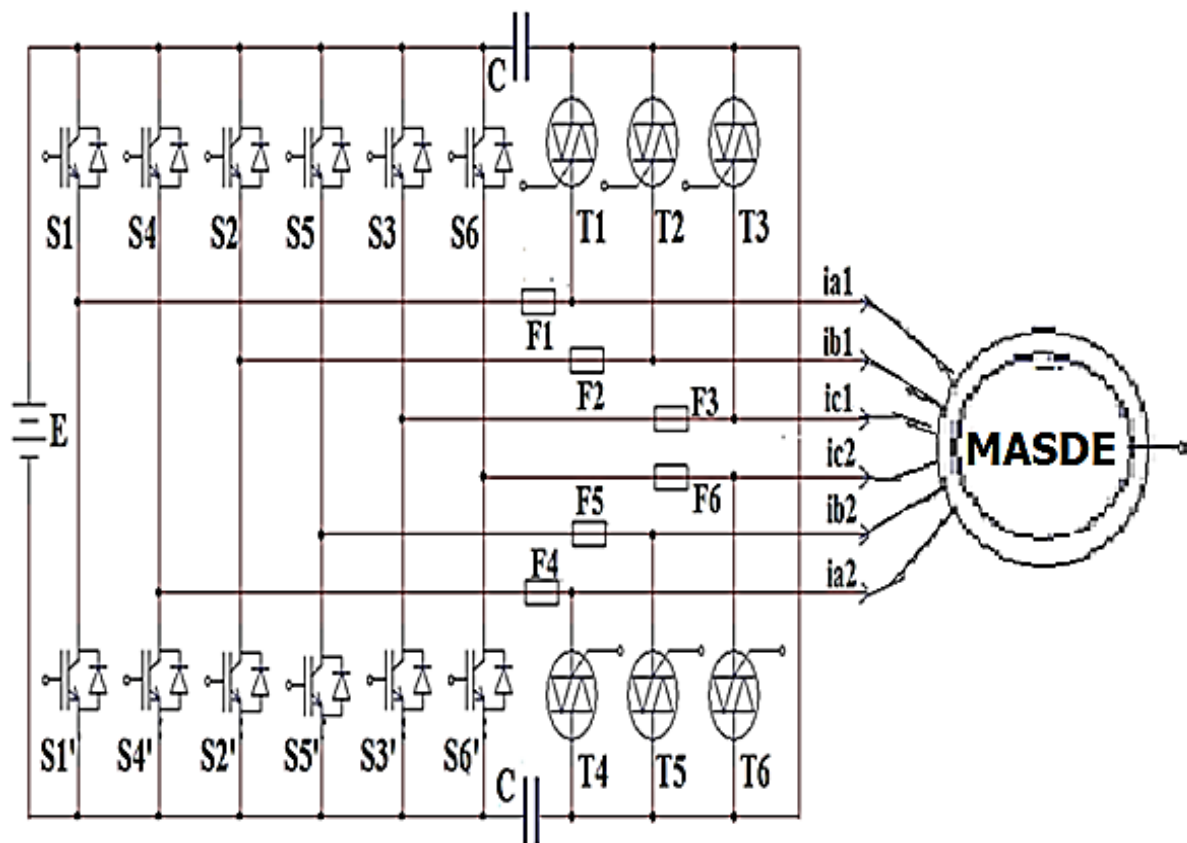


Suivant le transistor en défaut et la position du fusible, l'extrémité de la phase connectée au bras en défaut est reliée à un potentiel de l'alimentation soit directement, soit par l'intermédiaire d'une diode [142, 148, 184, 185].

#### V.4.3 Stratégies d'isolation du défaut

Les conséquences lors de la présence d'un défaut peuvent être néfastes, notamment, avec une tension aux bornes d'une phase qui devient incontrôlable et un couple qui sera directement infecté par des ondulations perturbatrices engendrant de gênantes vibrations de la machine et des effets sonores nuisant.

Les courants dans les enroulements restants sains de la machine peuvent atteindre des valeurs destructrices [142, 148, 185].



*Figure (V.3) : Déconnexion des phases en défaut par utilisation de triac*

Puisque la redondance parallèle au niveau de l'alimentation de l'actionneur permet une marche dégradée même si une phase d'alimentation est ouverte, alors, des dispositions sont prises pour isoler la phase ou les phases en défaut afin d'éviter de répercuter les dégradations sur d'autres organes de la chaîne d'énergie. Un interrupteur statique fixe la tension de la phase ouverte à la moitié de la tension du bus continu [3, 191].

Lors du défaut d'un des bras des deux onduleurs, le triac devient conducteur et le fusible placé en série est alors connecté entre une différence de potentiel engendrant sa fusion et de même la déconnexion de la phase en question (figure V.3) [185].

Pour assurer l'isolation des phases présentant des anomalies, l'utilisation autant de triacs que de phases est nécessaire et obligatoire, ce qui rend le circuit de commande encombrant [142, 185].

#### V.4.4 Stratégie de commande en mode dégradé

Les techniques de commande se basent sur la modification du courant dans une ou plusieurs phases de façon à conserver un couple constant lors d'un fonctionnement en mode dégradé.

##### V.4.4.1 Action sur le courant d'une seule phase encore saine par chaque phase ouverte

Lors d'une déconnexion d'une phase en défaut, le choix se porte sur une phase saine située à 90° électrique de celle-ci où le courant est modifié d'une manière à assurer un couple constant, maximal et à pertes joules limitées [3, 192].

Pour une machine multiphasée, les contraintes du courant sont concentrées sur peu de phases saines d'où la limitation à la moitié du nombre de phases (voir Annexe A5.1).

Le courant devront parcourir la phase « m » est :

$$i_{mf} = 2 \times I_{\max} \cos\left(\frac{(m-j)2\pi}{n}\right) \times \sin\left(\omega t - \frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \quad (\text{V.1})$$

Pour obtenir la condition d'annulation des pulsations du couple qui prendra la forme finale de

$$C_{(n-1)f} = \frac{C_n}{n} \left[ (n-2) + 2\cos^2\left(\frac{2\pi(m-j)}{n}\right) \right] \quad (\text{V.2})$$

De (V.5), le couple ' $C_{(n-1)f}$ ' prend une valeur maximale dans le cas où le décalage angulaire entre la phase déconnectée et la phase dont le courant est modifié est proche de 90° électrique. A rappeler que cette méthode est valable tant que le nombre de phases déconnectées est inférieur à la moitié du nombre de phases de la machine [142, 148, 185].

##### V.4.4.2 Action sur chacun des courants dans les phases encore saines

Dans le cas des machines à '*fems*' sinusoïdales, une correction des courants restants par une évaluation analytique permet de restituer un couple constant tout en minimisant les pertes joules [3, 193]. L'avantage réside sur le fait que la dégradation est répartie sur le reste

des phases saines de la machine. Cette méthode est valable tant qu'il reste un nombre suffisant de phases pour produire un champ tournant (voir Annexe A5.2).

#### V.4.5 Réduction des oscillations du couple

Lors de perte de phases, les deux méthodes permettent de conserver un couple constant mais nécessitant un changement de la consigne du courant dans une ou plusieurs phases suivant la phase en défaut [3].

Si, pour la première méthode, la contrainte liée à la perte d'une phase ne se reporte que sur une seule phase encore connectée, pour la seconde méthode, l'effet de la perte d'une phase sera réparti sur l'ensemble des phases saines [3, 185].

Pour ne pas infecter les performances de la machine, qui présente des oscillations du couple lors d'un défaut, deux méthodes sont applicables pour réduire au maximum ces oscillations permettant un fonctionnement le plus satisfaisant possible [3, 194].

##### V.4.5.1 Première méthode

La phase  $S_{a1}$  est ouverte «  $j=1$  », le choix se portera sur la phase  $S_{b1}$  «  $m=3$  » qui supportera toute la contrainte du défaut d'où [194] :

$$\left\| \begin{array}{l} i_{a2} = I_{\max} \times \sin(\omega t - \pi/6) \\ i_{b1} = 2I_{\max} \cos(2\pi/3) \cdot \sin(\omega t) \\ i_{b2} = I_{\max} \times \sin(\omega t - 5\pi/6) \\ i_{c1} = I_{\max} \times \sin(\omega t - 4\pi/3) \\ i_{c2} = I_{\max} \times \sin(\omega t - 3\pi/2) \end{array} \right. \Rightarrow \left\| \begin{array}{l} i_{a2} = I_{\max} \sin(\omega t - \pi/6) \\ i_{b1} = -I_{\max} \times \sin(\omega t) \\ i_{b2} = I_{\max} \sin(\omega t - 5\pi/6) \\ i_{c1} = I_{\max} \sin(\omega t - 4\pi/3) \\ i_{c2} = I_{\max} \sin(\omega t - 3\pi/2) \end{array} \right. \quad (V.3)$$

##### V.4.5.2 Deuxième méthode

La contrainte est supportée par toutes les phases saines et, après calculs, les nouvelles consignes des courants seront [127, 195] :

$$\left\| \begin{array}{l} i_{a2} = 1.27 \times I_{\max} \sin(\omega t - \pi/3) \\ i_{b1} = 1.27 \times I_{\max} \sin(\omega t - 5\pi/6) \\ i_{b2} = 1.27 \times I_{\max} \cdot \sin(\omega t - \pi) \\ i_{c1} = 1.27 \times I_{\max} \sin(\omega t + 5\pi/6) \\ i_{c2} = 1.27 \times I_{\max} \sin(\omega t + \pi/3) \end{array} \right. \quad (V.4)$$

#### V.5 Modèle de la MASDE dans le repère « $\alpha$ - $\beta$ »

L'utilisation du repère  $[\alpha\beta]$  s'avère nécessaire pour pouvoir suivre l'évolution de la machine en mode dégradé.

En principe, si seulement deux phases de la MASDE sont en fonctionnement, le moteur peut fournir un couple au niveau de son arbre sous les méthodes de contrôles résistants [187,195].

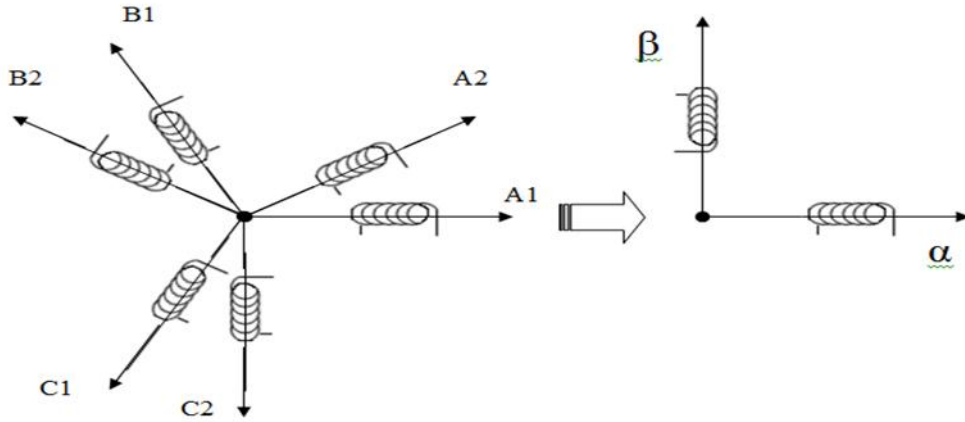


Figure (V.4) : Transformation de la base «  $A_1A_2B_1B_2C_1C_2$  » à la base «  $\alpha\beta$  »

### V.5.1 Equations électriques de la MASDE

En tenant compte des hypothèses simplificatrices émises auparavant, notamment en chapitre III, les équations électriques de la machine s'écrivent comme suit [137, 138,196] :

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (V.5)$$

### V.5.2 Matrice de transformation

Pour pouvoir suivre l'évolution du système dans le cas de déconnexion d'une ou de plusieurs phases, le stator doit être considéré comme un enroulement hexaphasé avec un décalage entre deux enroulements adjacents égale à  $\pi/6$ . Le but maintenant sera de diagonaliser la matrice des inductances par utilisation de matrices adéquates [142].

En mode dégradé, trouver une issue pour assurer une continuité de fonctionnement s'avère être une priorité, donc connecter les deux neutres des deux étoiles est l'une de ces issues qui permettra de suivre le comportement de la machine en s'appuyant sur le modèle qui sera exposé ci-après.

Avec " $\alpha$ " le décalage entre les deux étoiles, l'enroulement statorique de la machine crée une force magnétomotrice « FMM » tel que :

$$\begin{aligned} FMM = \frac{n}{2} \left[ i_{a1} \cos \theta + i_{a2} \cos(\theta - \alpha) + i_{b1} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{b2} \cos\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \right. \\ \left. + i_{c1} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) + i_{c2} \cos\left(\theta - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (V.6) \end{aligned}$$

En procédant à une séparation de termes après quelques arrangements en utilisant la relation trigonométrique suivante :  $\cos(a \pm b) = \cos(a) \times \cos(b) \mp \sin(a) \times \sin(b)$ , on obtient :

$$\text{FMM}(\theta) = \frac{n}{2} \left[ \cos \theta \times \left( \cos 0 \cdot i_{a1} + \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot i_{a2} + \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) i_{b1} + \cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) i_{b2} + \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) i_{c1} + \cos\left(\frac{3\pi}{2}\right) i_{c2} \right) + \sin \theta \times \left( \sin 0 \times i_{a1} + \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot i_{a2} + \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) i_{b1} + \sin\left(\frac{5\pi}{6}\right) i_{b2} + \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) i_{c1} + \sin\left(\frac{3\pi}{2}\right) i_{c2} \right) \right]$$

D'où :

$$\text{FMM} = \frac{n}{2} \times [i_{s\alpha} \times \cos \theta + i_{s\beta} \times \sin \theta] \quad (\text{V.7})$$

La FMM produite par les six phases statoriques est équivalente à la FMM produite par deux enroulements en quadrature «  $\alpha\beta$  » parcourus par les courants «  $i_{s\alpha}$  » et «  $i_{s\beta}$  » tel que :

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = [T_c] [i_{a1} \ i_{a2} \ i_{b1} \ i_{b2} \ i_{c1} \ i_{c2}]' \quad (\text{V.8})$$

Avec  $[T_c] = \begin{bmatrix} [\alpha_0]/\|\alpha_0\| \\ [\beta_0]/\|\beta_0\| \end{bmatrix}$ ,  $[\alpha_0] = \left[ \cos 0 \ \cos \frac{\pi}{6} \ \cos \frac{2\pi}{3} \ \cos \frac{5\pi}{6} \ \cos \frac{4\pi}{3} \ \cos \frac{3\pi}{2} \right]$   
 et  $[\beta_0] = \left[ \sin 0 \ \sin \frac{\pi}{6} \ \sin \frac{2\pi}{3} \ \sin \frac{5\pi}{6} \ \sin \frac{4\pi}{3} \ \sin \frac{3\pi}{2} \right]$ .

Du point de vue mathématique, un système de six dimensions ne peut être réduit à un système de deux dimensions.

C'est pour cette raison, que, quatre vecteurs nommés  $[Z_1]$ ,  $[Z_2]$ ,  $[Z_3]$  et  $[Z_4]$  orthogonaux entre eux et orthogonaux aux vecteurs, suivant l'axe «  $\alpha$  » et l'axe «  $\beta$  », sont nécessaires pour compléter ainsi la transformation.

La matrice  $[T_z]$  est obtenue dans MATLAB par la fonction « null » [142, 148].

La matrice de transformation globale peut enfin s'écrire par :

$$[T_n] = \begin{bmatrix} [T_c] \\ [T_z] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\alpha_0]/\|\alpha_0\| \\ [\beta_0]/\|\beta_0\| \\ [Z_1]/\|Z_1\| \\ [Z_2]/\|Z_2\| \\ [Z_3]/\|Z_3\| \\ [Z_4]/\|Z_4\| \end{bmatrix} \quad (\text{V.9})$$

Les courants fictifs «  $i_{s\alpha}$  » et «  $i_{s\beta}$  » sont employés pour la conversion d'énergie électromagnétique et afin de réduire au maximum les pertes, les courants dans l'espace «  $Z$  » doivent être nuls.

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{z1} \\ i_{z2} \\ i_{z3} \\ i_{z4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\alpha_0]/\|\alpha_0\| \\ [\beta_0]/\|\beta_0\| \\ [Z_1]/\|Z_1\| \\ [Z_2]/\|Z_2\| \\ [Z_3]/\|Z_3\| \\ [Z_4]/\|Z_4\| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{a2} \\ i_{b1} \\ i_{b2} \\ i_{c1} \\ i_{c2} \end{bmatrix} \quad (\text{V.10})$$

### V.5.3 Equations dans le repère « $\alpha$ - $\beta$ »

#### V.5.3.1 Equations électriques

Les équations de tensions régissant les enroulements de la machine dans l'axe «  $\alpha\beta$  » sont les suivantes [3, 194] :

a) *Stator* :

$$\begin{aligned} v_\alpha &= R_s \times i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \varphi_{s\alpha} \\ v_\beta &= R_s \times i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \varphi_{s\beta} \end{aligned} \quad (\text{V.11})$$

b) *Rotor* :

$$\begin{aligned} 0 &= R_r \times i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \varphi_{r\alpha} + \omega_r \times \varphi_{r\beta} \\ 0 &= R_r \times i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \varphi_{r\beta} - \omega_r \times \varphi_{r\alpha} \end{aligned} \quad (\text{V.12})$$

#### V.5.3.2 Equations des flux [142, 196]

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \varphi_{s\alpha} \\ \varphi_{r\alpha} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} L_{sd} & M_d \\ M_d & L_r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{r\alpha} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \varphi_{s\beta} \\ \varphi_{r\beta} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} L_{sq} & M_q \\ M_q & L_r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{s\beta} \\ i_{r\beta} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{V.13})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} L_{sd} = L_{1s} + \|\alpha\|^2 L_{ms} \\ L_{sq} = L_{1s} + \|\beta\|^2 L_{ms} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} M_d = \|\alpha_0\| \|\alpha\| L_{ms} \\ M_q = \|\beta_0\| \|\beta\| L_{ms} \end{cases}$$

$$L_r = L_{1r} + \|\alpha_0\|^2 L_{ms} = L_{1r} + \|\beta_0\|^2 L_{ms} \quad \text{et} \quad \|\alpha_0\| = \|\beta_0\| = \sqrt{3}$$

#### V.5.3.3 Equations dans l'espace « $Z$ »

Quatre équations dans l'espace  $Z$  régissent le fonctionnement en mode sain et le nombre d'équations en  $Z$  diminue à chaque fois qu'une phase est perdue, jusqu'à n'avoir qu'un nombre suffisant de phases pour produire un champ tournant [142, 196].

$$V_{zj} = R_s \times i_{zj} + L_{1s} \times \frac{di_{zj}}{dt} \quad (\text{V.14})$$

Avec  $j$  allant de 1 à 4 et diminue à chaque fois qu'une phase est perdue.

Dans l'espace « Z », les paramètres de la machine sont indépendants des matrices de transformation [3].

### V.5.3.4 Equations mécanique

Le couple électromagnétique est donné par les expressions suivantes [3] :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{em} = \frac{P}{L_r} [M_q \times i_{s\beta} \times \varphi_{r\alpha} - M_d \times i_{s\alpha} \times \varphi_{r\beta}] \\ C_{em} - C_r = J \times \frac{d\Omega(t)}{dt} + F \times \Omega(t) \end{array} \right. \quad (V.15)$$

## V.6 Simulation de la MASDE dans le repère [ $\alpha$ - $\beta$ ]

### V.6.1 Fonctionnement en mode sain

Avant l'étude de la machine en régime dégradé, il est primordial de simuler le système dans le repère [ $\alpha$  -  $\beta$ ] avec les six phases saines. La machine tourne, d'abord, à vide avant de coupler la pompe à «  $t=2.8s$  ».

La matrice de transformation [ $T_6$ ] calculée pour six phases saines est donnée par :

$$[T_6] = \begin{bmatrix} +0.5774 & +0.5000 & -0.2887 & -0.5000 & -0.2887 & -0.0000 \\ +0.0000 & +0.2887 & +0.5000 & +0.2887 & -0.5000 & -0.5774 \\ +0.4827 & -0.3470 & +0.7177 & -0.2650 & +0.1057 & +0.2240 \\ +0.6120 & -0.0947 & -0.2240 & +0.7413 & -0.0000 & +0.1293 \\ +0.0947 & +0.5300 & +0.1767 & +0.0820 & +0.7887 & -0.2240 \\ -0.2240 & +0.5063 & +0.2650 & +0.2003 & -0.1830 & +0.7413 \end{bmatrix}$$

La figure (V.5) révèle qu'au démarrage, le couple prend une forme vibratoire et atteint des valeurs proches de 80 Nm, puis après 0,3s à 40 Nm, les vibrations s'estompent avant d'atteindre une valeur à vide de  $C_r = 0,32$  Nm. Cette valeur de couple correspond aux pertes à vide et aux pertes par frottement mécanique.

La figure (V.6) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la MASDE qui, au départ, augmente de manière quasi linéaire pour atteindre la vitesse de 313,8 rad/s très proche de la vitesse de synchronisme qui est 314,16 rad/s.

Au démarrage, la MASDE absorbe un courant de cinq fois la valeur du courant nominal, i.e. 30A et dans le cas de répétitions excessives, ces courants de démarrage peuvent être à l'origine de la destruction par chauffage des enroulements du stator de la MASDE.

La figure (V.7) indique que l'état d'équilibre est atteint après une période de 0,6 s et que la MASDE absorbe un courant de 0,88 A à vide et lors de la connexion de la pompe, le moteur absorbe plus de courant et atteint une valeur qui oscille autour de 3,5 A.

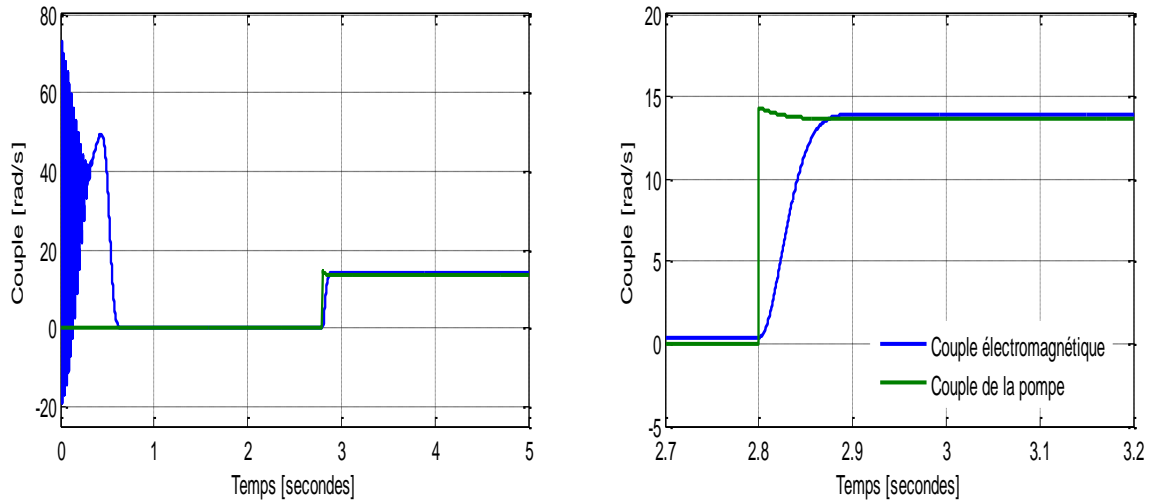


Figure (V.5) : Couple électromagnétique & Couple résistant (Zoom)

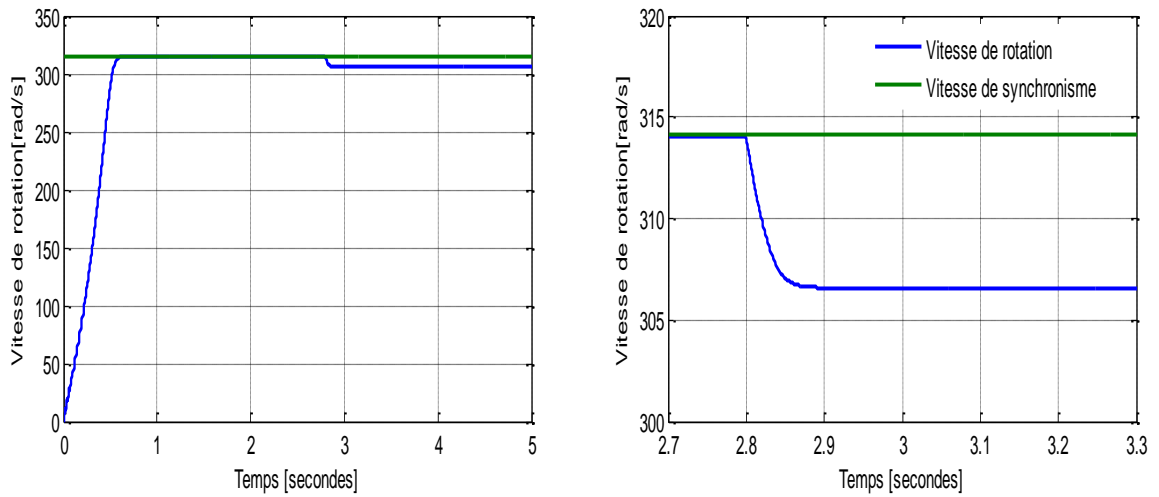


Figure (V.6) : Vitesse de rotation & vitesse de synchronisme (Zoom)

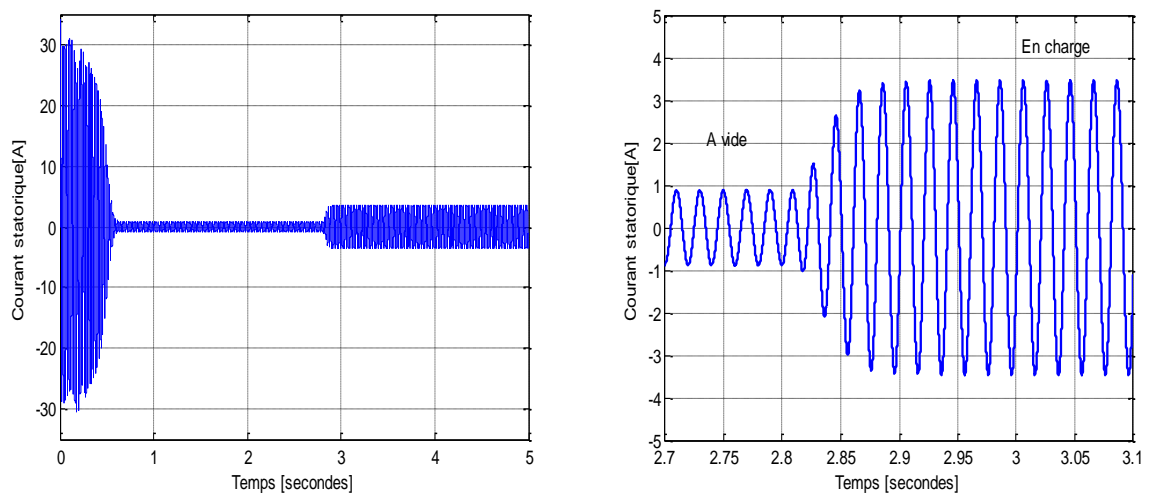


Figure (V.7) : Courants statoriques (Zoom)



### V.6.2 Défaillance d'une phase

Si un défaut survient sur une phase, le moteur asynchrone à double étoile continue de tourner avec seulement cinq phases saines, fournissant un couple à son arbre qui sera diminué par rapport à sa valeur nominale si aucun changement de la consigne du courant n'est effectué.

Pour un fonctionnement avec une phase défectueuse, il existe six configurations possibles.

Toutes les composantes relatives à la phase ouverte doivent être éliminées pour obtenir la nouvelle matrice de transformation.

La matrice de transformation pour cinq phases saines est donnée par :

$$[T_5] = \begin{bmatrix} +0.6124 & -0.3536 & -0.6124 & -0.3536 & -0.0000 \\ +0.2887 & +0.5000 & +0.2887 & -0.5000 & -0.5774 \\ +0.4487 & -0.4967 & +0.7281 & +0.0129 & +0.1471 \\ +0.5330 & +0.3198 & -0.0911 & +0.7611 & -0.1613 \\ +0.3272 & +0.5253 & +0.0570 & -0.2133 & +0.7868 \end{bmatrix}$$

La figure (V.8) représente les cinq phases saines. Au démarrage, les figures (V.10) et (V.11) montrent que le couple de la machine diminue considérablement par rapport à sa valeur où toutes les phases d'alimentation sont saines. Le couple atteint un pic de 47.2Nm puis les vibrations s'estompent après 0.75s avant d'atteindre une valeur flottante à vide entre -0.6 Nm et 1.2 Nm correspondant aux pertes fer à vide et aux pertes mécaniques par frottement.

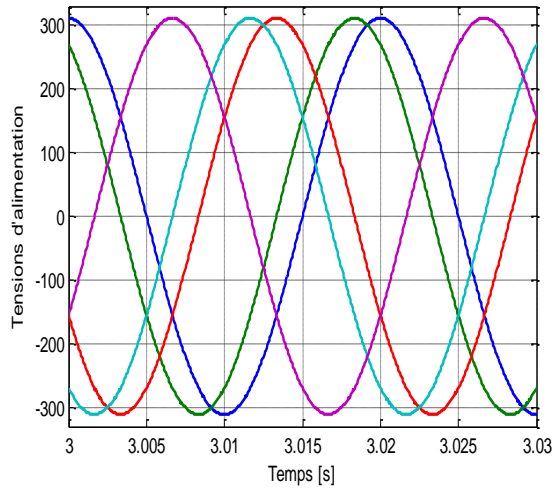
A  $t=2.8s$ , au moment où la pompe est connectée au moteur, le couple électromagnétique passe, dans un laps de temps de 0.1s, à une valeur flottante perturbée et ondulée entre 11.8 ~ 16.8 Nm autour de la valeur du couple de la pompe.

La fréquence des oscillations est le double de celle des courants d'alimentation.

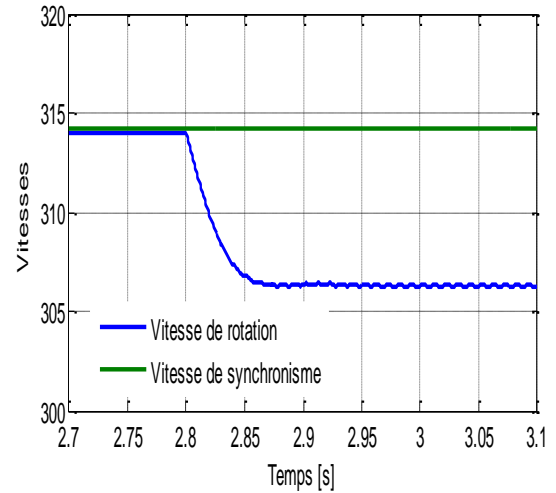
La figure (V.9) montre que la vitesse atteint celle du synchronisme après un laps de temps de 0.75s, moins rapidement que celle du fonctionnement sain. En charge la vitesse bascule autour de 306 rad/s.

De la figure (V.12), nous constatons que les courants au démarrage prennent des valeurs de l'ordre de cinq fois plus que les valeurs nominales « 30A ». La figure (V.13) montre l'allure à vide du courant sinusoïdal possédant un maximum à 1.1A.

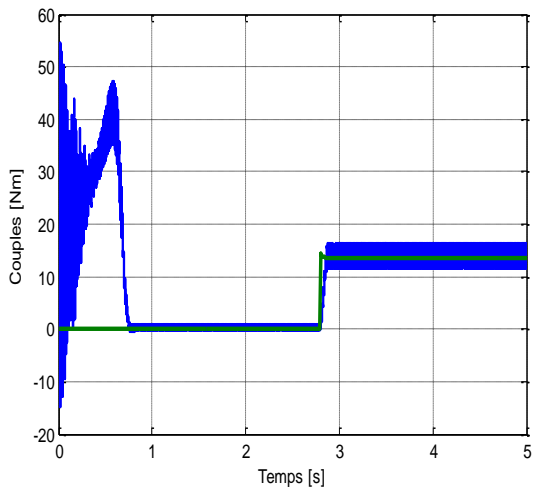
La machine étant à vide, la puissance absorbée ne caractérise que les pertes fer statoriques ainsi que les pertes mécaniques et lors d'attelage de la charge, la machine absorbe des courants de valeur maximale atteignant les « 4.44A ».



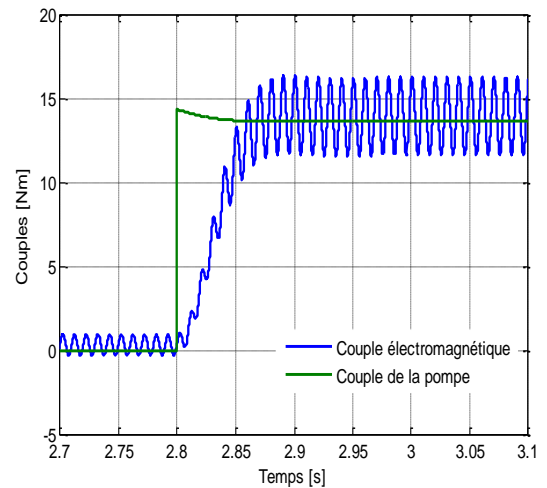
**Figure (V.8) :** Tensions d'alimentation avec la première phase défectueuse



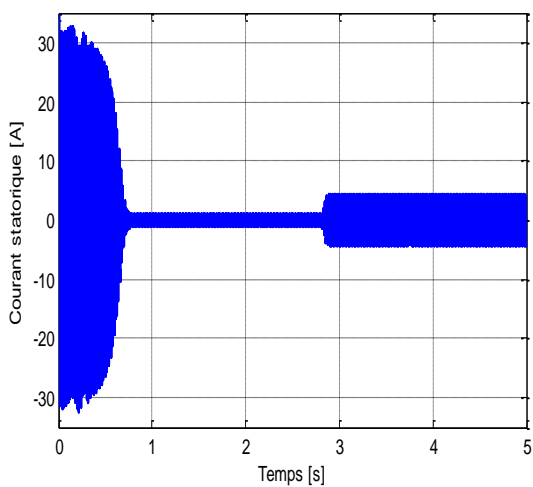
**Figure (V.9) :** Vitesse de rotation & Vitesse de synchronisme (Zoom)



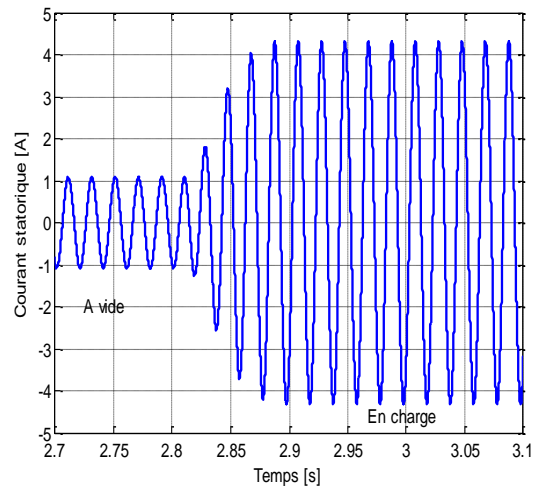
**Figure (V.10) :** Couple électromagnétique & Couple résistant



**Figure (V.11) :** Couple électromagnétique & Couple résistant (Zoom)



**Figure (V.12) :** Courant statorique



**Figure (V.13) :** Courant statorique (Zoom)

### V.6.3 Défaillance de deux phases

Le comportement de la MASDE en ayant deux phases défectueuses est observé pour le cas où les deux phases sont issues d'une même étoile et dans le cas où ces deux phases appartiennent à des étoiles différentes.

Les phases « S<sub>a2</sub> » et « S<sub>b2</sub> » sont choisies pour le cas d'un défaut qui pourra survenir sur deux phases d'une même étoile et les phases « S<sub>a1</sub> » et « S<sub>c2</sub> » appartenant à deux étoiles différentes.

Les matrices de transformation utilisées sont calculées et données par :

$$[T_{\text{A même étoile}}] = \begin{bmatrix} +0.8165 & -0.4082 & -0.4082 & -0.0000 \\ +0.0000 & +0.5477 & -0.5477 & -0.6325 \\ +0.5527 & +0.4235 & +0.6819 & -0.2238 \\ +0.1668 & +0.5950 & -0.2613 & +0.7416 \end{bmatrix}$$

$$\text{Et par : } [T_{\text{4 étoiles différentes}}] = \begin{bmatrix} +0.6124 & -0.3536 & -0.6124 & -0.3536 \\ +0.3536 & +0.6124 & +0.3536 & -0.6124 \\ +0.4082 & -0.5774 & +0.7041 & +0.0649 \\ +0.5774 & +0.4082 & -0.0649 & +0.7041 \end{bmatrix}$$

Les figures (V.14) et (V.15) représentent les tensions d'alimentations lors de la perte de deux phases. Les figures (V.16) et (V.17) montrent des minimales ondulations observées autour de la vitesse moyenne qui est de « 305.60 rd/s ».

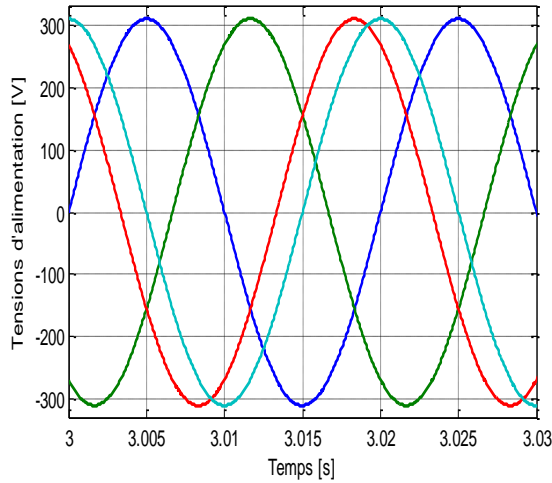
Dans les deux cas, le couple prend des valeurs vibratoires avec des pics de 40Nm et 35Nm respectivement pour le cas de défaillance d'une même étoile et d'étoiles différentes (voir les figures V.18 et V.19).

Des ondulations du couple sont observées à vide et en charge pour le cas où les tensions en défaut n'appartiennent pas à la même étoile et sont accentuées pour le cas de tensions appartenant à la même étoile (voir les figures V.20 et V.21). La valeur du couple diminue de la valeur pic et se stabilise après « 1s » en oscillant autour de « 0.8Nm » à vide et autour de « 14.3Nm » en charge.

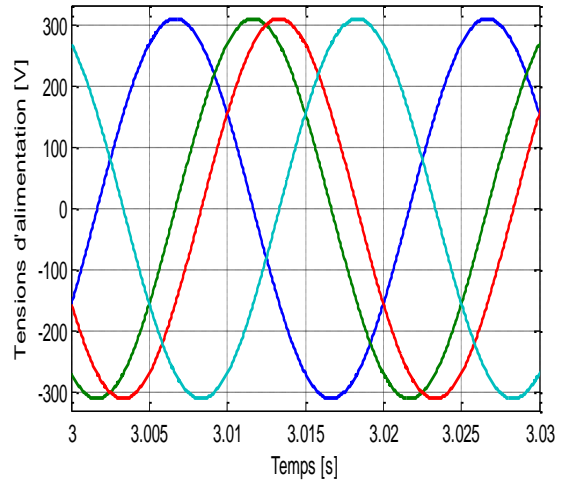
Au démarrage pour les deux cas, des forts courants sont appelés atteignant les « 35A », puis après « 1s », la MASDE absorbe des courants de « 1.37A » à vide.

Par contre en charge les courants augmentent avec des valeurs de courant avoisinant les « 5.8A » (voir les figures V.22, V.23, V.24 et V.25).

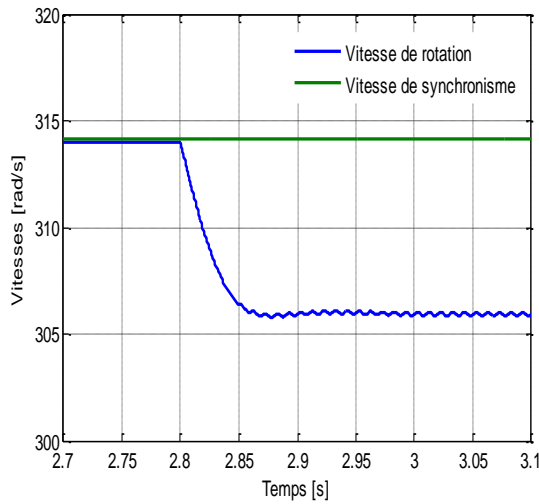
Pour un fonctionnement avec deux phases défectueuses, il existe neuf combinaisons pour le cas de deux étoiles différentes et six combinaisons pour le cas où les phases défectueuses appartiennent à la même étoile.



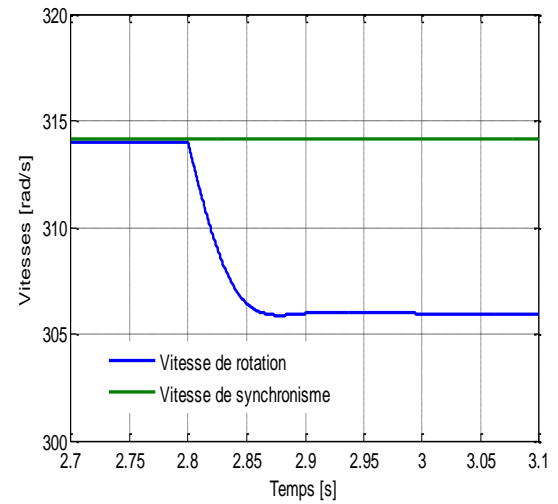
**Figure (V.14) :** Tensions d'alimentation même étoile ( $S_{a2}$  et  $S_{b2}$  défectueuses)



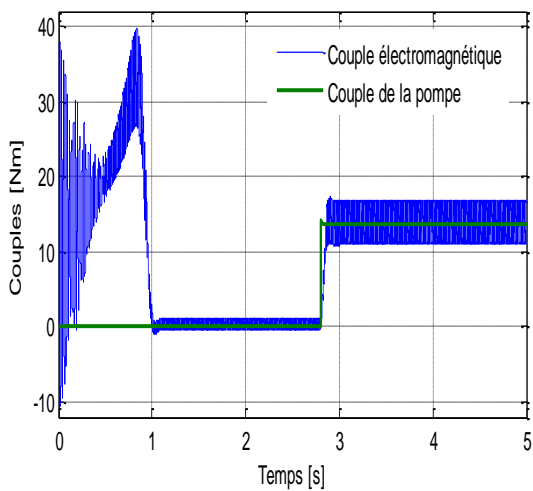
**Figure (V.15) :** Tensions d'alimentation différentes étoiles ( $S_{a1}$  et  $S_{c2}$  défectueuses)



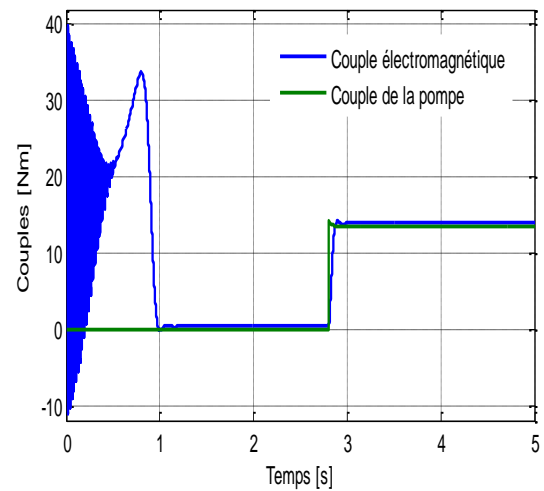
**Figure (V.16) :** Vitesses de rotation & de synchronisme (Zoom). Même étoile



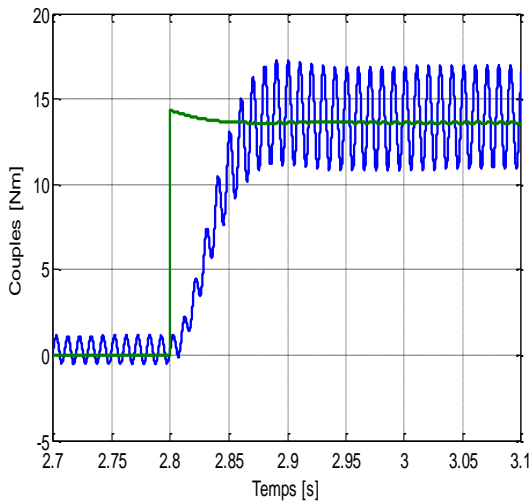
**Figure (V.17) :** Vitesses de rotation & de synchronisme (Zoom). Différentes étoiles



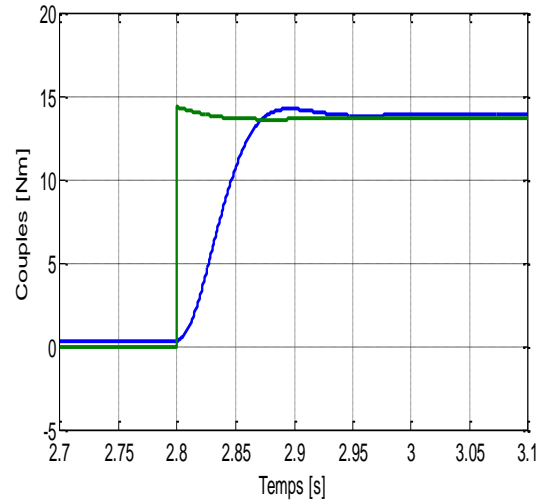
**Figure (V.18) :** Couple électromagnétique & Couple résistant. Même étoile



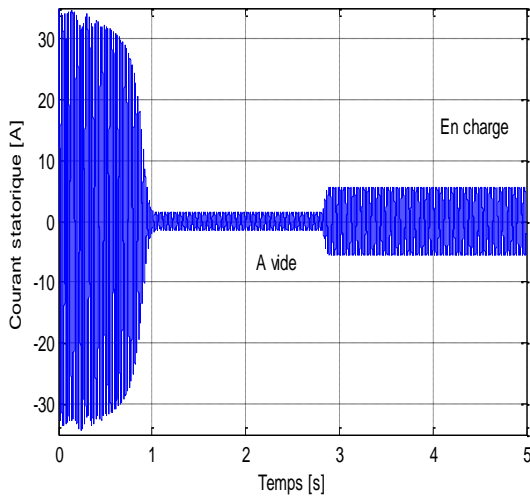
**Figure (V.19) :** Couple électromagnétique & Couple résistant. Différentes étoiles



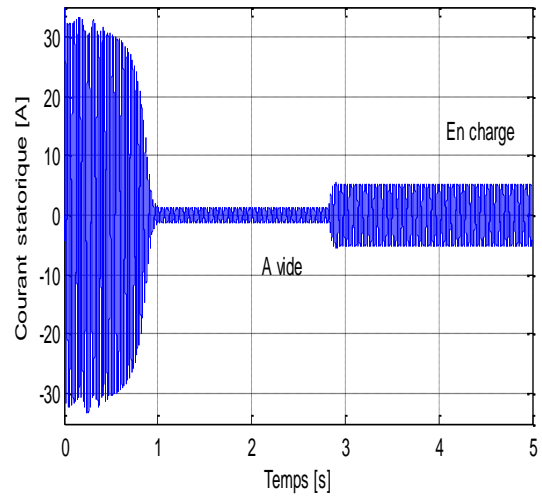
**Figure (V.20) :**  
Couple électromagnétique & Couple résistant (Zoom). Même étoile



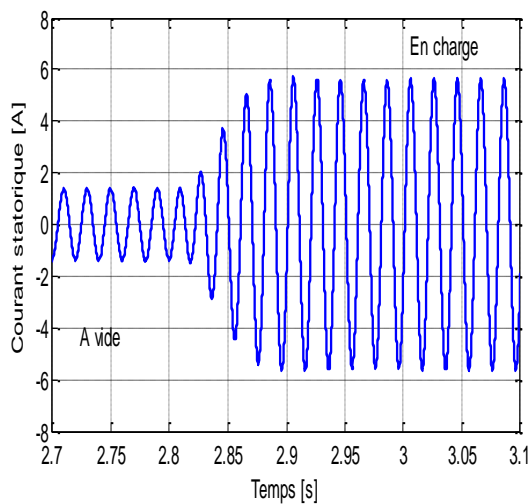
**Figure (V.21) :**  
Couple électromagnétique & Couple résistant (Zoom). Différentes étoiles



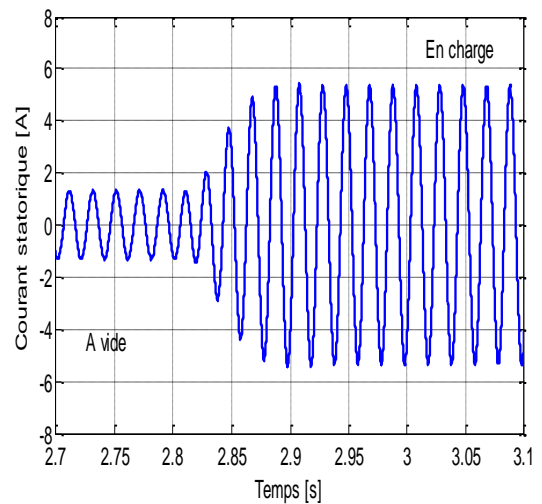
**Figure (V.22) :**  
Courant statorique. Même étoile



**Figure (V.23) :**  
Courant statorique. Différentes étoiles



**Figure (V.24) :** Courant statorique. (Zoom). Même étoile



**Figure (V.25) :** Courant statorique. (Zoom). Différentes étoiles

### V.6.4 Défaillance de trois phases

La perte de l'une des deux étoiles entraîne la marche du moteur avec la moitié de ses performances.

Dans le cas où l'onduleur alimentant l'étoile 2 est déconnecté, après un défaut de ses trois phases «  $S_{a2}$ - $S_{b2}$ - $S_{c2}$  », la matrice de transformation est donnée par :

$$[T_{3perte\ d'étoile}] = \begin{bmatrix} +0.8165 & -0.4082 & -0.4082 \\ +0.0000 & +0.7071 & -0.7071 \\ +0.5774 & +0.5774 & +0.5774 \end{bmatrix}$$

Dans le cas où les trois phases en défaut n'appartiennent pas à la même étoile, la matrice de transformation est calculée et donnée pour trois phases en défaut qui sont «  $S_{a1}$ - $S_{a2}$ - $S_{b1}$  » par :

$$[T_{3phases}] = \begin{bmatrix} +0.7071 & +0.6124 & -0.3536 \\ +0.0000 & +0.5000 & +0.8660 \\ +0.7071 & -0.6124 & +0.3536 \end{bmatrix}$$

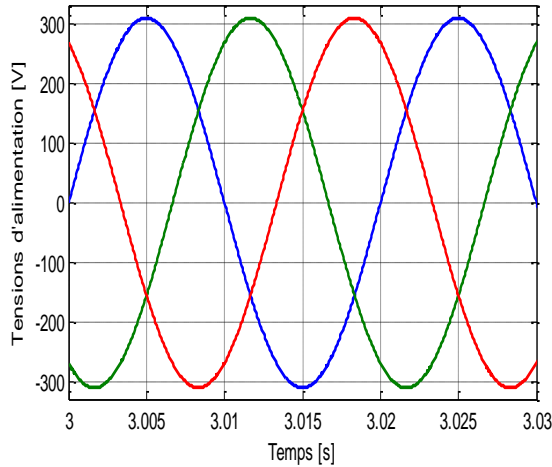
Lors de la perte d'une étoile, les tensions d'alimentation ne sont que les tensions triphasées équilibrées (figure V.26), contrairement au cas de perte de trois phases n'appartenant pas à la même étoile (figure V.27).

Dans les deux cas, le temps de montée de la vitesse augmente encore à « 1.5s », puis après l'application de la charge, la machine décélère et la vitesse oscille autour de la valeur de « 304.8rd/s ».

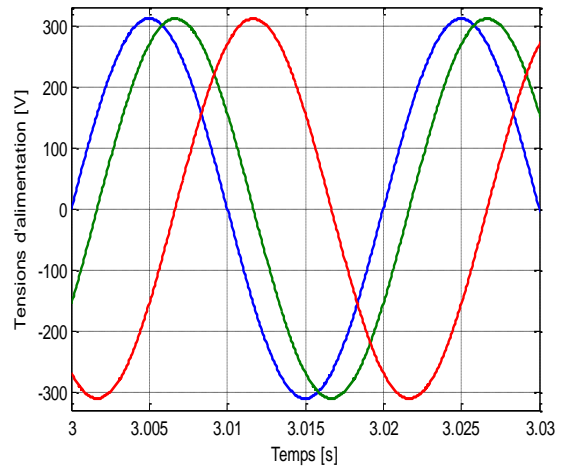
Le même comportement que dans le cas des deux étoiles saines est observé avec des valeurs divisées par deux. Ainsi, la forme vibratoire du couple atteint « 25.4Nm » puis oscille avant de se stabiliser à « 0.31 Nm », valeur correspondante aux pertes à vide (voir figures V.32 et V.34). Lors de l'assemblage de la charge, le couple de la machine suit l'évolution du couple résistant.

Le fait que les phases n'appartiennent pas à la même étoile, des oscillations du couple sont observées à vide et en charge (voir figures V.33 et V.35), sinon le même comportement lors d'une perte d'une phase est observé.

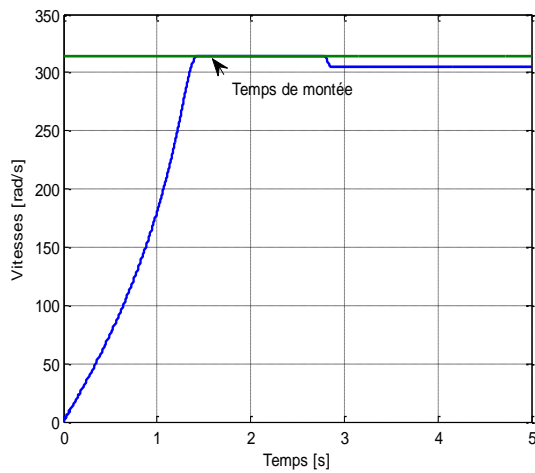
Les figures (V.36) et (V.38) montrent que les courants statoriques au démarrage atteignent les « 34A » avant de s'estomper sur une valeur de « 1.7A ». Après l'attelage de la pompe, l'appel en courant augmente jusqu'à « 7.65A ». Les courants à vide et en charge lors de la perte de trois phases n'appartenant pas toutes à la même étoile gardent les mêmes valeurs que lors de perte d'une des deux étoiles (voir les figures V.37 et V.39).



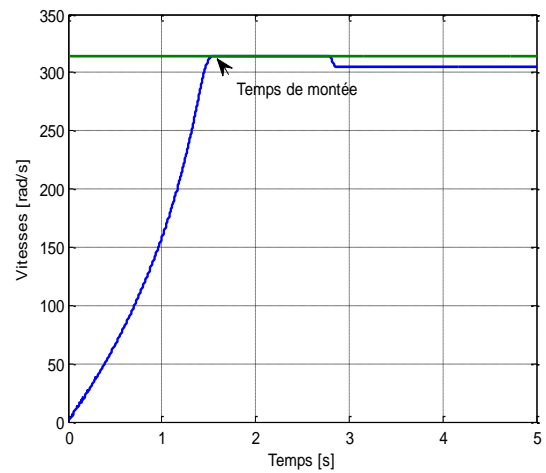
**Figure (V.26) :** Tensions d'alimentation  
Perte d'une étoile



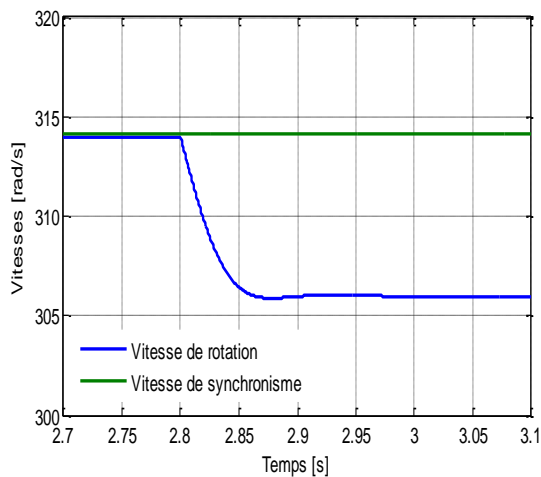
**Figure (V.27) :** Tensions d'alimentation  
Trois phases différentes étoiles



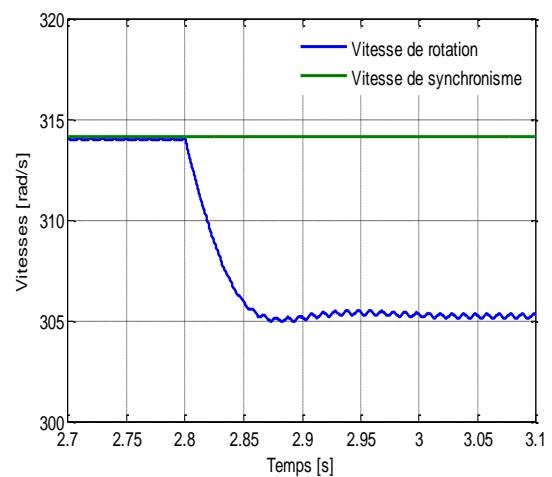
**Figure (V.28) :** Vitesses de rotation  
& de synchronisme (Zoom).  
Perte d'une étoile



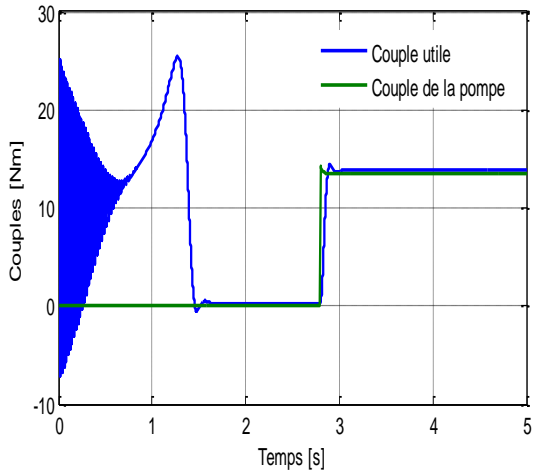
**Figure (V.29)** Vitesses de rotation & de synchronisme (Zoom).  
Trois phases différentes étoiles



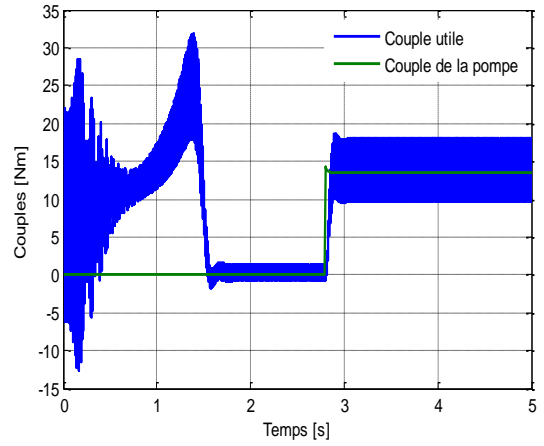
**Figure (V.30) :** Vitesses de rotation  
& de synchronisme (Zoom).  
Perte d'une étoile



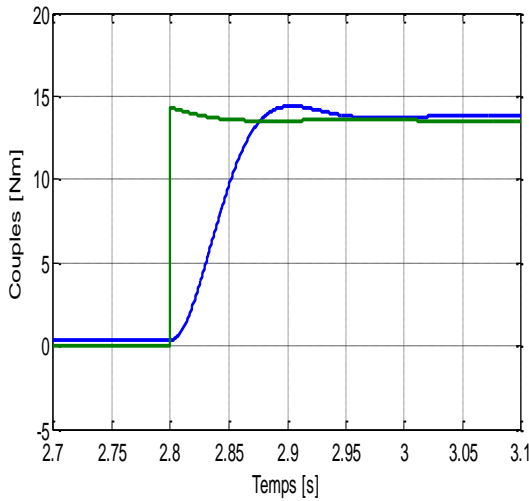
**Figure (V.31)** Vitesses de rotation & de synchronisme (Zoom).  
Trois phases différentes étoiles



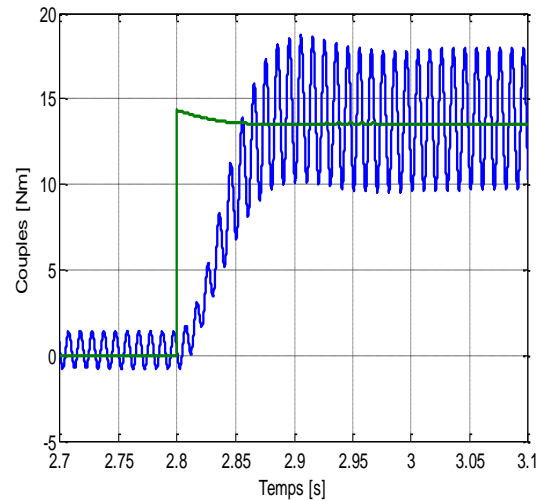
**Figure (V.32) :** Couple de la machine & Couple de la pompe.  
Perte d'une étoile



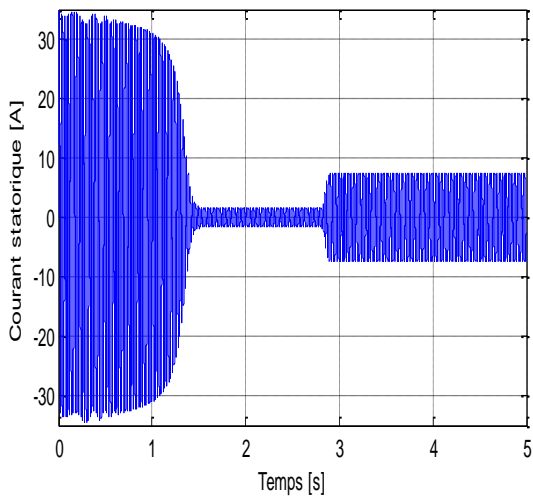
**Figure (V.33) :** Couple de la machine & Couple de la pompe.  
Trois phases différentes étoiles



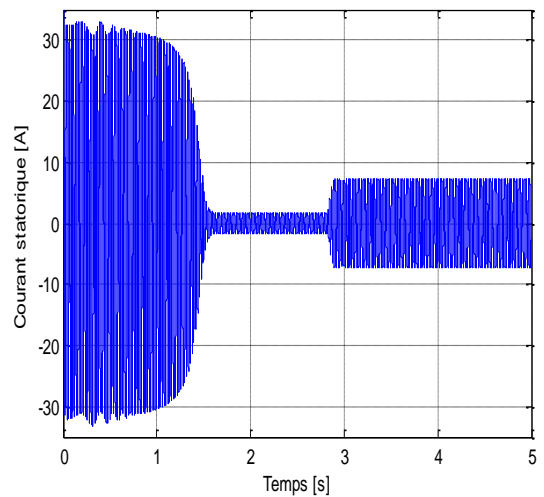
**Figure (V.34) :** Couple de la machine & Couple de la pompe (Zoom).  
Perte d'une étoile



**Figure (V.35) :** Couple électromagnétique & Résistant (Zoom).  
Trois phases différentes étoiles

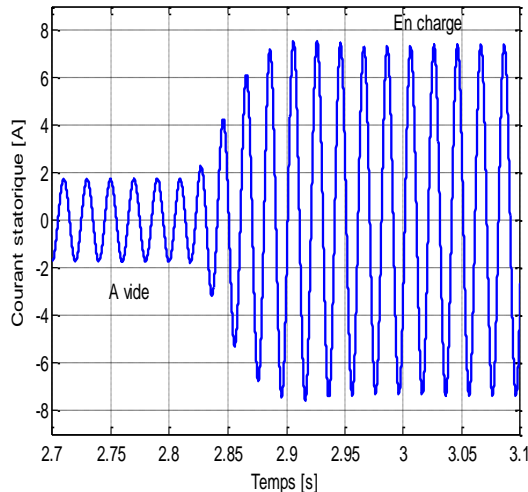


**Figure (V.36) :** Courant statorique.  
Perte d'une étoile

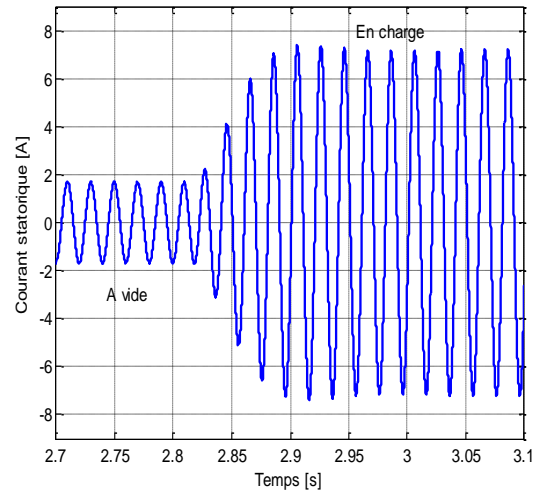


**Figure (V.37) :** Courant statorique.  
Trois phases différentes étoiles





**Figure (V.38) :** Courant statorique (Zoom).  
Perte d'une étoile



**Figure (V.39) :** Courant statorique (Zoom).  
3 phases différentes étoiles

S'il existe deux cas seulement pour la perte d'une étoile, pour un fonctionnement avec trois phases défectueuses n'appartenant pas toutes à la même étoile, il existe dix-huit combinaisons de probables défaillances des trois phases.

### V.6.5 Récapitulations des diverses simulations

#### a) Couple électromagnétique

En marche normale, le moteur asynchrone à double étoile atteint une valeur du couple avoisinant les « 49.35 Nm » et dans un laps de temps de « 0.6 s » le couple se stabilise à sa valeur correspondante aux pertes à vide.

Au fur et à mesure que le moteur perd des phases de son alimentation, la valeur maximale du couple diminue et le temps de relaxation augmente. A noter que pour un fonctionnement avec une seule étoile ou avec trois phases défaillantes, la valeur maximale atteinte du couple est tout simplement divisée par deux avant de suivre la consigne.

Pour une marche avec une ou deux étoiles saines, le couple ne présente aucune ondulation, contrairement aux cas où des phases d'alimentation sont manquantes, des ondulations apparaissent et augmentent avec le nombre de bras d'onduleurs défaillants.

#### b) Vitesse de rotation

A vide, la vitesse de rotation avoisine celle de synchronisme après une période qui augmente avec l'augmentation du nombre de phases défectueuses.

Après l'attelage de la pompe, la vitesse est de « 306.3rd/s » et diminue au fur et à mesure que le nombre de phases saines est réduit.

### c) Courants statoriques

Lorsque la machine fonctionne avec les six phases saines, les courants absorbés à vide ont une valeur de « 0.9A » et augmentent avec le nombre de phases défectueuses jusqu'à une valeur de « 1.79A » avec un fonctionnement en demi moteur. En charge, l'appel en courant est de « 3.55A » en fonctionnement sain et pratiquement le double lors de perte d'une étoile ou lors d'un fonctionnement avec la moitié des phases saines.

Cela s'explique par le fait que le moteur absorbe le même courant à travers ses trois phases saines, c'est-à-dire, la puissance n'est plus segmentée.

Le tableau suivant dresse un comparatif des grandeurs caractéristiques de la machine lors des divers défauts étudiés pouvant survenir sur les phases d'alimentation statoriques.

**Tableau (V.1) : Comparaison des diverses grandeurs pour les éventuels défauts**

Marche ou phases en défaut	Couple électromagnétique		Vitesse de rotation		Courants statoriques	
	Valeur Maximum	Temps de stabilité	Valeur finale	Temps de montée	A vide	En charge
Sans défaut	49.35	0.65 s	306.3	0.62 s	0.88 A	3.55 A
Cinq phases	47.20	0.75 s	306.1	0.76 s	1.10 A	4.50 A
Deux phases d'une même étoile	39.80	1.00 s	305.6	1.00 s	1.37 A	5.80 A
Deux phases d'étoiles différentes	33.73	1.05 s	305.6	1.00 s	1.32 A	5.51 A
Perte d'une étoile	25.40	1.54 s	304.8	1.50 s	1.73 A	7.65 A
Trois phases de différentes étoiles	25.50	1.56 s	304.8	1.56 s	1.80 A	7.65 A

## V.7 Conclusion

L'avantage majeur d'utilisation de ce genre de moteur dans l'industrie est la possibilité de fonctionnement en mode dégradé, c'est-à-dire dans le cas de perte de phases d'alimentation ou de court-circuit des enroulements statoriques.

Ce chapitre traite les différents défauts pouvant parvenir à la machine et présente l'étude préalable de la machine en cas de perte de phase.

Dans des conditions dégradées, le couple se retrouve ondulé ou fortement ondulé, ce qui est très nocif pour le système d'entraînement. Les techniques proposées sont adoptées pour faire face à ce genre d'inconvénient. D'autre part, le courant absorbé augmente et peut atteindre le double de sa valeur nominale, raison pour laquelle, il est nécessaire de bien dimensionner les bobines du MASDE.

Le diagnostic permet de localiser les composants ou les organes défaillants d'un système et éventuellement de déterminer ses causes, c'est un système d'aide à la décision.

Selon le domaine d'utilisation de la machine, il est possible de garantir un fonctionnement satisfaisant par utilisation de calculateurs puissants qui, en temps réel, assurent la commande appropriée aux différentes phases du stator de la machine assurant ainsi un couple ne présentant pas des ondulations nocives au fonctionnement et une vitesse nécessaire à la charge, tout en contrôlant l'appel en courant qui doit satisfaire une marche, sans surchauffe, du moteur et éviter des courts circuits des spires des enroulements statoriques.

Avec cette opportunité de fonctionner avec des pertes de phases d'alimentation, des degrés de liberté supplémentaire s'offre à la station de pompage permettant une continuité de service dans l'attente d'une réparation.

**C**ONCLUSION

**G**ENERALE

## CONCLUSION GENERALE

---

Même si, des pays détiennent des réserves en gaz et en pétrole, il en demeure qu'ils sont contraints, à l'instar des autres pays industrialisés, de développer d'autre forme d'énergie renouvelable, pour assumer et assurer leurs survies au rang mondial. En effet, les Etats sont devant l'obligation d'accéder à l'eau, élément primordial à la survie de l'homme, celle de la faune et de la flore, et, à maîtriser les diverses ressources énergétiques, pour pouvoir s'imposer et se prétendre être développés.

Un système hybride est jadis connu comme une association d'au moins deux technologies de nature différente, avant qu'un autre concept ne soit introduit, à savoir, la combinaison d'au moins, une source fossile et une source à énergie renouvelable, qui a d'ailleurs donné des résultats satisfaisants quant à la continuité de service. L'hybridation permet d'avoir une augmentation de 28% d'eau pompée en plus qu'un système de pompage effectué avec des mono-sources.

Les énergies dites renouvelables, telle que l'éolienne, le photovoltaïque, les petites centrales hydroélectriques ou bien encore les piles à combustible s'imposent du jour en jour, certes avec des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes mais l'option de jumeler ces sources dans un système d'hybridation peut contrecarrer les désagréments de la nature stochastique de ces énergies.

L'objectif principal de ce travail de recherche, n'étant que de trouver un moyen efficace d'électrifier une station de pompage, située dans le désert Algérien, à savoir Timimoune, et de faire en sorte d'éviter au maximum les désagréments qui peuvent arrêter le fonctionnement des pompes, notamment, par l'utilisation des machines asynchrones à double étoile fonctionnant comme moteur et comme générateur. Il est primordial de fournir la puissance demandée par la charge malgré les fluctuations de l'énergie produite afin d'assurer un approvisionnement continu en eau potable, nécessaire au développement et à la survie de la localité.

Compte tenu de la position géographique du site et de son climat drastique, nous avons préféré de miser, le tout pour le tout, en optant à une hybridation « tout » renouvelable. Nous avons osé de parier sur cette combinaison, tout en respectant les consignes et les règles d'exploitation préétablies dans des scénarios de gestion que nous avons conçue, afin de garantir la stabilité du système et d'optimiser l'échange de puissance

Cette localité à desservir a exprimé un besoin journalier de 50 m<sup>3</sup> en eau potable, raison pour laquelle un réservoir d'une capacité de 150 m<sup>3</sup> est érigé dans le but d'asservir l'unique forage du site offrant ainsi une large marge de sécurité quant aux besoins réels en eau.

Le gisement solaire est considérable dans cette région, d'où le choix d'opter pour cette énergie lumineuse comme énergie primaire. Le photovoltaïque est une technologie nécessitant ni surveillance permanente, ni personnel hautement qualifié et offrant un produit fini, non polluant, silencieux, n'entraînant aucune perturbation du milieu avec un coût de plus en plus réduit. Des efforts sont même consentis en vue d'améliorer le faible rendement de conversion de la cellule photovoltaïque.

Pour choisir la deuxième énergie, nous avons adopté le concurrent direct du photovoltaïque, à savoir l'énergie du vent, qui semble être la moins chère que la plupart des énergies renouvelables, propre et ne produisant aucuns déchets toxiques ou radioactifs, fiable, économique et écologique s'inscrivant dans l'optique de protéger la planète d'une suffocation certaine. D'ailleurs, la capacité mondiale en énergie éolienne a augmenté de 19 % en 2019 et en 2020 une croissance de 59 % est observée dans la production éolienne terrestre.

La nature de la nature laisse perplexe les scientifiques et les pousse sans cesse à entrevoir un moyen de stockage adéquat pour faire face à la timidité du soleil et à l'essoufflement d'Eole et actuellement, les circonstances contraignent les décideurs à opter pour l'hydrogène « vert » comme un moyen de stockage, un élément qui possède un avenir prometteur et certain.

Dans cette optique, nous avons préféré de s'en passer des batteries électrochimiques classiques et d'entreprendre un nouveau défi en utilisant une pile à combustible ayant comme comburant l'oxygène, un élément disponible dans la nature et comme carburant l'hydrogène qui est quasi abondant dans l'univers.

Ce premier élément du tableau de Mendeleïev est léger, énergétique, non polluant et non toxique dont la combustion ne rejette que de l'eau, sauf que pour l'extraire des autres composants, il est nécessaire d'utiliser d'autres sources d'énergie, un handicap certain à surmonter.

L'hydrogène est l'un des vecteurs promoteurs dans l'avenir énergétique et en invoquant l'économie de l'hydrogène, la décarbonation devient alors, l'objectif principal de cette révolution énergétique qui prévoit d'ici 2050, une réduction d'un tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

Les piles à combustible sont moins volumineuses par rapport aux autres générateurs, elles sont non acoustiques et possèdent un bon rendement de conversion tout en rejetant pratiquement pas de gaz nocifs. Elles reviennent pour couronner plusieurs applications, notamment comme énergie de secours, en offrant des avantages immesurables, elles semblent reprendre la position qui lui y sied après une longue absence depuis leurs honorifiques utilisation dans le projet Gemini-Apollo.

Dans un avenir, pas lointain, les énergies classiques fissiles ou fossiles vont être délaissées petit à petit au détriment des énergies dites renouvelables. La nouvelle manière de produire l'électricité va envahir toutes les localités, riches soient-elles ou pauvres, elle sera considérée comme synonyme d'indépendance énergétique et d'autonomie.

Les degrés de liberté supplémentaire et la souplesse observée des machines à grand nombre de phase, laissent prétendre que le moteur asynchrone triphasé sera délaissé au profit du moteur asynchrone à double étoile. Un intérêt distinctif est porté à cette machine, grâce aux multiples avantages qu'elle offre en fonctionnement moteur ou générateur. Il s'avère légitime, qu'elle soit largement utilisée dans les applications militaires et embarquées.

La minimisation des ondulations du courant et du couple, la minimisation des pertes rotoriques entraînant une amélioration du facteur de puissance et la segmentation de puissance demeurent les principaux facteurs légitimant le choix de ces actionneurs au détriment des machines triphasées. Pour toutes ces raisons invoquées, nous avons jugé utile d'en profiter de ces multiples avantages, en choisissant un moteur asynchrone à double étoile (MASDE) pour entrainer la pompe centrifuge et en optant pour une génératrice asynchrone à double étoile (GASDE) comme convertisseur mécanique-électrique couplé à l'éolienne.

L'expérience vécue lors de la pandémie de la COVID 19 et du confinement quasi périodique imposé aux populations rendent la remise à l'état immédiate ou rapide impossible, d'où, une marche en mode dégradé devient impérative surtout lorsque ce genre d'actionneurs est utilisé pour remplir des réservoirs d'eau pour approvisionner les ménages en eau potable, un liquide si précieux dans cette période pandémique.

Dans la même optique, le choix judicieux des machines multiphasées n'est pas fortuit et la possibilité d'un fonctionnement en mode dégradé où deux phases suffisent pour donner naissance à un couple moteur, sont autant de raisons pour opter à ce genre d'actionneurs au détriment des autres genres de machines tournantes.

Dans des conditions dégradées, le couple se retrouve ondulé ou fortement ondulé, ce qui est très nocif pour le système d'entraînement et d'autre part, le courant absorbé à vide ou en

---

charge augmente et peut atteindre le double de sa valeur nominale lors d'un fonctionnement avec trois phases saines, raison pour laquelle, il est nécessaire de bien dimensionner les bobines de la MASDE.

Les deux stratégies proposées, à savoir l'action sur le courant d'une seule phase encore saine par chaque phase ouverte et l'action sur chacun des courants dans les phases encore saines permettent de venir à bout des ondulations du couple causées par la perte de phase.

Au fur et à mesure que la MASDE perd des phases de son alimentation, la valeur maximale du couple diminue et le temps de relaxation augmente. La vitesse du moteur diminue de peu et pour un fonctionnement avec une seule étoile ou avec trois phases défailtantes, la valeur maximale du couple est tout simplement divisée par deux avant de suivre la consigne.

Au préalable d'une quelconque implantation, une cartographie des gisements des énergies renouvelables du site, l'évaluation des besoins en eau, la hauteur manométrique totale et le débit doivent être établis pour pouvoir effectuer un dimensionnement laborieux des éléments constituant la station de pompage.

Les résultats obtenus indiquent clairement que la combinaison de ces deux sources, dans la région de Timimoune, nous permet de répondre aux besoins en eau potable de la localité, soit pendant la journée où le soleil fournit suffisamment d'énergie pour pomper l'eau ou à la tombée de la nuit, quand le vent souffle assez pour obtenir les débits désirés. Nous avons aussi constaté l'existence d'une complémentarité entre l'énergie du soleil et celle du vent et la pile à combustible assure la continuité de l'approvisionnement, une manière d'obtenir une autonomie d'au moins trois jours selon les consignes préalablement établies.

Parmi les conclusions émises, le site de Timimoune convient correctement aux choix effectués quant aux énergies renouvelables utilisées. En effet, la durée d'ensoleillement quotidienne et la quantité d'énergie reçue par les panneaux photovoltaïques dans les conditions les plus défavorables sont suffisantes pour puiser l'eau du forage ou bien pour recharger les bouteilles d'hydrogène.

Les vitesses du vent recensées au niveau du site de Timimoune peuvent facilement combler les périodes nocturnes et les désagréments causés par l'absence de l'astre scintillant.

A noter que pour remplir le réservoir d'eau supposé vide, une durée de presque 9 heures est nécessaire et quand le réservoir est plein, une autonomie de 3 jours est assurée à la population. Donc, il n'est pas exagéré de considérer que la durée de remplissage quotidienne sera de presque la moitié du temps alloué au remplissage, soit 5 heures.



Le débit pompé pour les différents essais est assez satisfaisant pour remplir les réservoirs. L'hybridation permet d'avoir des débits nettement élevés par rapport au système mono source.

Ne pouvant compter que sur la clémence de la nature et dans le souci de respecter soigneusement la sécurité d'approvisionnement énergétique, la pile à combustible devient nécessaire dans la chaîne énergétique et elle est utilisée comme une source de secours venant cette fois-ci concurrencer le stockage électrochimiques par batteries.

Des stratégies prédictives dans la gestion de la puissance, de la transformation de Fourier discrète, passant par des algorithmes génétiques ou bien l'utilisation d'algorithmes Trnsys et Homer sont autant de méthodes capables de concevoir, prédire, améliorer le rendement global et optimiser les performances d'un système hybride.

Pour notre part, nous avons conçu un organigramme de gestion des flux énergétiques en s'appuyant sur des hypothèses que nous avons jugé utiles pour la bonne marche du site. Nous avons recensé tous les scénarios probables tout en attribuant la solution jugée adéquate à chaque cas de figure.

Ils existent plusieurs scénarios et stratégies pour mener à bien le processus de la station de pompage. A notre humble avis, nous avons effectué le bon choix avec un cahier de charge privilégiant le remplissage du réservoir d'eau au détriment des bouteilles d'hydrogène.

Nous pouvons facilement jumeler les deux charges lorsque la récolte d'électrons le permet, mais nous avons préféré de jouir des bienfaits de l'hybridation des sources pour minimiser le risque de pannes ou de mises hors service causées par une surcharge prolongée et de diminuer les contraintes dues au passage des courants qu'elles ont généré pour rallonger au mieux la durée de vie des sources et de la station.

L'automatisation de la station est l'une des conditions sine qua non pour réussir une bonne gestion. L'existence d'automate industriel programmable facilite le bon dispatching des différentes sources et charges.

La pérennité du système repose sur la multiplication des conditions de sécurité, ne laissant aucune possibilité de mise hors service. Il est préférable, pour plus de sécurité de fonctionnement, d'utiliser deux pompes centrifuges pour éviter l'épuisement de ces actionneurs par échauffement. L'insertion des capteurs de niveaux supplémentaires peuvent influencer directement sur la stratégie à suivre dans la gestion des deux pompes en fonction des niveaux de remplissage du réservoir.

Compte tenu que la perspective de génération de l'hydrogène par électrolyse de l'eau est venue en dernier, nous avons juste abordé une éventuelle utilisation d'électrolyseur, sans pour autant effectuer le dimensionnement nécessaire.

Nous osons espérer approfondir notre étude sur les électrolyseurs et tester d'autres scénarios plausibles afin de perfectionner le fonctionnement de la station dans le but d'élargir son utilisation à toutes les zones d'ombre possédant cette richesse hydrique souterraine non exploitée.

Néanmoins, il est utile de rappeler l'importance d'une étude économique et financière à tout projet envisageable. Une évaluation en dollars et en monnaie nationale de tous les éléments intervenants dans la chaîne de pompage est importante pour projeter la portée de réalisation d'un tel projet.

Nous pouvons maintenant confirmer que du fait de leur caractère inépuisable, les énergies renouvelables permettent un développement durable et constituent une solution économique viable pour les régions isolées et éloignées où le coût de l'électrification est prohibitif et le recours aux systèmes d'énergie hybride s'avère être une solution par excellence et doit avoir un impact profitable en termes de coût et de disponibilité pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées, notamment, dans les régions du Grand Sud.

La pauvreté et la précarité dont sont victimes des nations entières, causées d'ailleurs par la nonchalance totale des multinationales qui sont à la solde de leurs Etats et qui ne se soucient guère du devenir des millions d'enfants affamés à travers le monde sont autant de raisons valables et convaincantes pour entamer une révolution énergétique d'envergure.

Pouvant le considérer comme un acte d'assistance aux populations vivant dans des régions isolées, les panneaux solaires et les éoliennes peuvent procurer une joie certaine en assurant, entre autre, une électrification des stations de pompage de l'eau pouvant être destinée à la consommation ou à l'irrigation. Cette moisson d'électrons pourra aussi être bénéfique pour la conservation des vaccins anti scorpioniques pour le cas du sud algérien, du sang et des produits agricoles.

Un travail n'est jamais parfait, à trop vouloir le perfectionner, le risque de le dévier n'est pas à écarter. Dans l'optique de perfectionner nos prochaines recherches, notamment dans le domaine des énergies renouvelables, des machines multiphasées et du mode dégradé, nous osons espérer que cette étude sera bénéfique aux lecteurs et contribuera d'une manière efficace aux prochaines recherches.

# **BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRAPHIE

- [01] : Journal Officiel de la République Algérienne n° 51. (1999). Loi n°99-09 du 15 Rabie Ethani 1420 correspondant au 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie.
- [02] : D. Hadiouche, L. Baghli and A. Rezzoug. (2003). Space vector PWM techniques for dual three-phase AC machine: analysis, performance evaluation and DSP implementation. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, pp. 648-655 vol.1, doi: 10.1109/IAS.2003.1257571.
- [03] : ADJATI, A. (2012). Etude des machines asynchrones à double étoile en pompage. Thèse de Magister de l'université A. Mira Bejaia, systèmes électro-énergétique.
- [04] : Mekkois, N. (2004). *Contribution à la modélisation et à la commande d'une mini-centrale éolienne à base de machines à induction simple et double alimentée*. Mémoire de magister. Université de Batna, Laboratoire des systèmes propulsion-induction électromagnétiques.
- [05]: Organisation mondiale de la santé, Rapport des Nations Unies. (2021). L'année de la pandémie est marquée par une hausse de la faim dans le monde du 12 juillet 2021. Communiqué commun Rome. Date de consultation janvier 2022
- [06] : P. Scherrer Institut. (2005). Le point sur l'énergie. PSI n° 13, mai 2005
- [07] : C. Ruhl. (2007). BP statistical review of world energy 2007. BP report June 2007
- [08] : Centre national d'enseignement à distance (CNED). (2021). Date de consultation septembre 2021.
- [09] : S.M. Ait-Cheikh. (2007). Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques. Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [10] : J. Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.D.Sy. (1998). Le Pompage photovoltaïque. IEPF, université d'Ottawa, EIER, CREPA., TJ912.pp.65, 1998.
- [11] : Benlatreche, T. (2006). *Effets thermo-radiatifs et caractérisation microclimatique des cours intérieures dans les édifices publics*. Magister architecture, université de Constantine.
- [12] : Azoui, B. (2002). *Concept and realization of three-phase brushless DC motor (BLDCM) for solar application*. Thèse Doctorat, université de Batna, mai 2002.
- [13] : Pankow, Y. (2004). *Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension*. Thèse de Doctorat de l'école nationale d'Arts et Métiers Lille.
- [14] : Ministère Algérien de l'Energie et des Mines, Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables. (2007). *Energie photovoltaïque*, Guide des Energies Renouvelables, édition 2007
- [15] : Postor, A.C. (2002). *Evaluation comparative de chargeurs de batteries pour systèmes photovoltaïques*. Projet de fin d'études, université Toulouse.
- [16] : Royer, J. Djiako, T. (1998). *Le pompage photovoltaïque*. Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, université d'Ottawa/EIER /CREPA.
- [17] : A.Labouret, M.Villoz. (2007). Energie solaire photovoltaïque. Livre 3ème édition DUNOD, Décembre 2007.
- [18] : A.Hoque, K.A. Wahid. (2000). New mathematical model of a photovoltaic generator. Journal of Electrical Engineering Vol. EE 28, No. 1, June 2000.
- [19] : B.Mazhari.(2006). An improved solar cell circuit model for organic solar cells. Sol.Energy Mater.Sol.Cells 90 1021-1033, 2006.
- [20] : Semaoui, Smail . (2004). Etude de l'électrification d'un village avec de l'énergie solaire photovoltaïque. Magister : Sciences physiques : Ouargla, Université Kasdi Merbah.

- [21] : C.Dumbs. (1999). Développement d'outils pour l'analyse des systèmes hybrides photovoltaïque-diesel. Thèse de l'école des mines de Paris, 20 décembre 1999.
- [22] : Turbelin. G. (2000). *Modélisation de la structure atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets de vent*. Université d'Evry Val d'Essone, U.F.R. De sciences et Technologie.
- [23] : Carson D.J. (1990). *Boundary Layer Meteorology, Introduction Lectures*. Workshop on an Atmospheric Area Modelling, ICTP.
- [24] : S.M. Boudia, (2013). *Optimisation de l'évaluation temporelle du gisement énergétique éolien par simulation numérique et contribution à la réactualisation de l'atlas des vents en Algérie*. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen.
- [25] : Daaou Nedjari H., Kheder Haddouche S., Balehouane A. et Guerri O., (2017). *Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol*. Centre de Développement des Energies Renouvelables.
- [26] : Frédéric POITIERS, (2003). *Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne*. Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes.
- [27] : Nachida KASBADJI MERZOUK, (2006). *Evaluation du gisement énergétique éolien, contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie*. Université abou bekr belkaid de Tlemcen.
- [28] : DJERIRI Youcef, (2015). *Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle*. Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès.
- [29] : J.Usaola, P.Ledesma, J.M.Rodriguez, J.L. Fernadez, D. Beato, R.Iturbe, J.R. Wihelmi, « Transient stability studies in grids with great wind power penetration. Modelling issues and operation requirements », 2003 IEEE PES Transmission and Distribution. Conference and exposition, septembre 7-12, 2003, Dallas (USA), CD.
- [30] : B. Milton, " Le Génie Electrique dans le Vent, Etat de L'art et Recherches dans le Domaine de la Génération Eolienne" JCGE 03 Saint Nazaire, 2003
- [31] : H. De Battista, R. J. Mantz, and C. F. Christiansen, "Dynamic sliding mode power control of wind driven induction generators," IEEE Trans.Energy Convers., vol. 15, no. 4, pp. 451–457, Dec. 2000.
- [32] : Fabienne Collard. (2015). Les énergies renouvelables. Courrier hebdomadaire du CRISP. 2015/7 N° 2252-2253 | pages 5 à 72. ISSN 0008-9664. DOI 10.3917/cris.2252.0005
- [33] : P. P. EDWARDS, V. L. KUZNETSOV & W. I. F. DAVID. (2007). Hydrogen energy. Article in philosophical transactions of the royal society a mathematical physical and engineering science. DOI: 10.1098/rsta.2006.1965
- [34] : Jérôme PERRIN. (2004). Air Liquide, Programme de R&D Hydrogène-Energie, et Jean-François DESCHAMPS, Air Liquide, Marché Hydrogène Clients Industriels
- [35] : Johnson, S. R. et al. (2005). Chemical activation of MgH<sub>2</sub>; a new route to superior hydrogen storage materials. Chem. Commun. 22, 2823–2825. (doi :10.1039/b503085d).
- [36] : Solomon, B. & Banerjee, A. (2006). A global survey of hydrogen energy research, development and policy. Energy Policy 34, 781–792. (doi:10.1016/j.enpol.2004.08.007).
- [37] : Jacobson, M. Z., Colella, W. G. & Golden, D. M. (2005). Cleaning the air and improving health with hydrogen fuel-cell vehicles. Science 308, 1901–1905. (doi:10.1126/science.1109157)
- [38] : Muradov, N. Z. & Veziroglu, T. N. (2005). From hydrocarbon to hydrogen–carbon to hydrogen economy. Int. J. Hydrogen Energy 30, 225–237. (doi:10.1016/j.ijhydene.2004.03.033)
- [39] : Olivier Megret, Loreline Hubert, M. Calbry, Eric Trably, Hélène Carrère, et al.. Production d'hydrogène à partir de déchets : Etat de l'art et potentiel d'émergence. [Contrat] RECORD 13-

- 0239/1A, Réseau Coopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement. 2015, 226 p. hal- 01602165
- [40] : Philippe Schulz. Task-Force Hydrogène-Piles à Combustible, TotalFinaElf. (2002). *Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau Application à des systèmes de petite capacité*. l'actualité chimique - janvier 2002.
- [41] : Esdras Ngounou Takam. (2021). Technologies de l'hydrogène comme vecteur de reconfiguration (géo) politique. <https://doi.org/10.4000/vertigo.30040>
- [42] : BY P. P. EDWARDS, V. L. KUZNETSOV AND W. I. F. DAVID. (2007). Hydrogen energy. University of Oxford, Inorganic Chemistry Laboratory, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Oxfordshire OX11 0QX, UK. Phil. Trans. R. Soc. A (2007) 365, 1043–1056. doi:10.1098/rsta.2006.1965  
Published online 1 February 2007
- [43] : Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène. Etude réalisée par INERIS et ENEA Consulting pour le compte de l'ADEME - Contrat N° 1394C0002. Juin 2015
- [44] : LE BOULZEC Hugo. (2016). *La production d'hydrogène «vert »*. Encyclopédie de l'énergie, Rubrique : Nouvelles technologies.
- [45] : Phatiphat THOUNTHONG. (2005). Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs. Doctorat l'institut national polytechnique de Lorraine.
- [46] : S. Thomas et M. Zalowitz, Fuel Cells – Green Power, prepared for the U.S. Department of Energy, under contract W-7405- ENG-36, disponible à : <http://education.lanl.gov/resources/fuelcells/fuelcells.pdf>.
- [47] : Adjati, A., Rekioua, T., Rekioua, D., Tounzi, A. (2020). Study of Dual Stator Induction Motor in Photovoltaic-Fuel Cell Hybrid Pumping Application. *European Journal of Electrical Engineering*, 53(5): 601-608.  
<https://doi.org/10.18280/jesa.530502>
- [48] : M. A. J. Cropper, S. Geiger et D. M. Jollie, "Fuel cells: a survey of current developments," *Journal of Power Sources*, vol. 131, n° 1-2, mai 2004, pp. 57-61.
- [49] : P. Thounthong, S. Raël et B. Davat, "Conception et réalisation d'un convertisseur statique basse tension pour pile à combustible de type PEM," in Proc. *Electronique de Puissance du Futur 2004 (EPF04)*, Toulouse (France), 15-17 septembre 2004, (CDROM).
- [50] : DuPont Company, PEM Conductive Plates, <http://www.dupont.com/fuelcells/products/plates.html>.
- [51] : W. Friede, S. Raël et B. Davat, "Mathematical model and characterization of the transient behavior of a PEM fuel cell," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, n° 5, september 2004, pp. 1234-1241.
- [52] : J. M. Grimwood, B. C. Hacker et P. J. Vorzimmer, "Project Gemini Technology and Operations: A Chronology," NASA SP-4002, 1969.
- [53] : Amrouche, F., Mahmah, B., Belhamel, M., Benmoussa, H. (2005). Modelling of a fuel cell PEMFC fed directly with hydrogen-oxygen and experimental validation. *Review of Renewable Energy*, 8: 109-120.
- [54] : Yu, D., Yuvarajan, S. (2005). Electronic circuit model for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 142(1-2): 238-242. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.09.041>
- [55] : H.S.Rauschenbach, « Solar Cell Array Design Handbook », Van Nostrand-Reinhold, NY, 1980.
- [56] : B.Lee and M.Ehsani, «Advanced simulation model for brushless dc motor drives», *Electric Power Components and systems* 31, pp. 841–868, 2003.
- [57] : J.Hindmarsch. (1984). *Electrical machine and their applications*. 4th edition, New York, Pergamon press.



- [58] : M. Ilah, « contribution a l'étude des Systèmes photovoltaïque résidentiels couples au réseau électrique », Thèse de Doctorat en sciences à l'université de Batna 2008.
- [59] : A.B. Learreta, « Réalisation de Technique MPPT numérique », Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle. Université Virgile, Septembre 2006
- [60] : M. Chakaroun, « Evaluation de nouveaux concepts d'encapsulation de cellules solaires organiques pour l'amélioration de leur durée de vie », université de limoges, 2010.
- [61] : B.Nouhou, « Conception technico-économique d'un système de pompage autonome photovoltaïque-aérogénérateur », mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise en sciences appliquées en génie électrique, 1999.
- [62] : O. Gérgaud. (2002). *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*. Thèse de doctorat, école normale supérieure de Cachan.
- [63] : T. Diveux, « Implantation d'un système éolien, optimisation algorithmes génétiques », thèse de l'ENSAM (LEPT) soutenue le 29 septembre 2000
- [64] : S. Petibon. (2000). *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques*. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2000.
- [65] : L.SAVAY, « Force hydraulique et machines à eau dans l'Antiquité romaine », actes du colloque international Pont du Gard, 20-22 sept. 2006
- [66] : G.Lemasson, « les machines transformatrices d'énergie », tome2, Delagrave, 1982.
- [67] : Technique de l'ingénieur. (1988). Mécanique et chaleur, pompes, vide, air comprimé, NB4. Paris.
- [68] : J.M.Hirtz, « Les stations de pompage d'eau », 6e édition, Association Scientifique et Technique pour l'eau et l'environnement, éditions Lavoisier TEC & DOC 1991.
- [69] : A.Betka, « optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil », thèse de magister, centre universitaire, Biskra, 1997.
- [70] : T.Toufik. (2000). Etude de l'influence de la géométrie de l'aubage et de vitesse de rotation de la roue sur les caractéristiques d'une pompe centrifuge. Thèse de magister UHBC.
- [71] : B.Chikh-Bled et O.Sebbane, (1996). Mise au point d'un banc d'essais : installation de pompage d'eau. Mémoire d'ingénieur d'état, Institut de Génie Mécanique.
- [72] : S.Kazmierczak, P.Anglaret, J.Fillipini, « Technologie Génie Chimique tome 1 », édition CRDP d'Amiens, 2001.
- [73] : Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, GEA, 2012.
- [74] : J. L. Bemal-Agustin, R. Dufo-Lapez, J. a Dominguez-Navarro, and J. M. YustaLoyo, "Optimal Design of a PV -Wind system for water pumping," Int. Conf, pp. 1- 6, 2008.
- [75] : M. Turki, J. Belhadj and X. Roboam, "Water / Energy management approaches of an autonomous water desalination unit fed by a hybrid (Photovoltaic-Wind) system," International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb 2014; 1-8.
- [76] : H. Ibrahim, A. Ilinca and I. Perron, Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés, Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne LREE-03-Septembre 2008.
- [77] : B. Bouzidi, "Viability of solar or wind for water pumping systems in the Algerian Sahara regions case study Adrar," Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011; 15:4436-42.
- [78] : C. Gopal, M. Mohanraj , P. Chandramohan, and P. Chandrasekar, "Renewable energy source water pumping systems - A literature review," Renew. Sustain.

- Energy Rev., vol. 25, pp. 351-370, 2013.
- [79] : Smulders PT, "Jongh J. Wind water pumping: status, prospects and barriers," Renewable Energy 1994 ; 5:587-594
- [80] : Ludmil Stoyanov. (2011). Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Energie électrique. Université Pascal Paoli. Français. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00653412>
- [81] : ABDOUL KARIM TRAORÉ. (2016). Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles. Mémoire présenté à L'université du Québec à Trois-Rivières.
- [82] : Yann Arthus-Bertrand.(2020). Good planet mag. Publié le : 27 Mar 2020, consulté le 22 Dec 2022.
- [83] : Marc Rapin. Jean-Marc Noël. (2019). L'ÉNERGIE ÉOLIENNE, Du petit éolien à l'éolien offshore. Edition DUNOD 3eme édition.
- [84] : D. Ipsakis, S. Voutetakis, P. Seferlis, F. Stergiopoulos, and C. Elmasides. (2009). *Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage*. Int. J. Hydrogen Energy, vol. 34, no. 16, pp. 7081- 7095.
- [85] : M. H. Cano, S. Kelouwani, K. Agbossou, and Y. Dubé. (2015). *Power management system for off-grid hydrogen production based on uncertainty*. Int. J. Hydrogen Energy, vol. 40, pp. 7260-7272, 2015.
- [86] : Nichola lupu. (2021). In Australie entre sur le commerce la première voiture d'hydrogène. Lesamisdubarrage.over-blog.fr. Consulté le 15 oct 2021
- [87] : B.Fornel, « Machines asynchrones : commande par contrôle direct de couple », Technique de l'Ingénieur D3623, 2003.
- [88] : A. Maouch, « étude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique », magister en microélectronique, université de Batna, 2011
- [89] : O.Gergaud, B.Multon, H.Benahmed. (2002). *Analysis and experimental validation of varios photovoltaic system models*. 7th international electrimecs congress, Montréal.
- [90] : M.Tivanov, A.Patryn, N.Drozdo, A.Fedotov and A.Mazanik, « Determination of solar cell parameters from its current-voltage and spectral characteristics », Solar Energy Mater Solar cells, volume 87, pp.457-165, 2005.
- [91] : E.Radziemska. (2005). *Dark I-U-T measurements of single crystalline silicon solar cells*. Energy Conversion .Management, Vol.46, pp.1485-1494.
- [92] : W.Xiao, W.G. Dunford and A.Capel, « a novel modeling method for photovoltaic cells », IEEE Power electronics specialists conference, PESC, Germany, 2004
- [93] : P. Sabatier, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie », université de Toulouse III, Décembre 2003.
- [94] : M.Oukachmih, « Les cellules photovoltaïque à base de matériaux organiques discotiques », Thèse de doctorat, université de Paul Sabatier, 2003.
- [95] : H.N.Zainudin, S. Mekhilef, « Comparaison study of maximum power point tracker techniques for PV systems », Proceeding of the 14th International middle east power systems conference (MEPCON'10), Cairo university, Egypt, décembre 19-21, 2010.
- [96] : J.P.Ferreux, F.Forest, « Alimentation à découpage », Troisième, édition, 2003.
- [97] : C.Chabert, A.Rufer, « Optimisation des convertisseurs de puissance embarqués : Adaptation des Cellules à Lien Alternatif MF et Commutation Douce », Electronique de Puissance du Futur, actes du 8è colloque, Lille, France, nov./déc. 2000
- [98] : H.Tamrabet, « Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone », Thèse de magister, Université de Batna, 2006.
- [99] : Kasbadji Merzouk N. , M. Merzouk, N.Messen et B. Benyoucef, . (2003). *Profil Vertical de la Vitesse du Vent en milieu semiaride.Test des modèles d'Extrapolation*. International congress on Photovoltaic and wind energy, Tlemcen.



- [100] : A.Guettaf; "Direct field oriented control of induction motor fed by wind turbine generator under saturation effect". *Mediterranean Journal of Measurement and Control*, Vol 7, N°1, pp 190-196, 2011.
- [101] : Arezki Adjati, Toufik Rekioua, Djamilia Rekioua. Use of the Dual Stator Induction Machine in Photovoltaic - Wind Hybrid Pumping. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Vol.54, N°.1, February, 2021, pp. 115-124
- [102] : R. Abdessamed, M. Kadjoudj, *Modélisation des machines électriques*, Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997.
- [103] : D. Seyoum, C. Grantham, M. F. Rahman, "The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, No. 4, pp. 936 – 944, July/August 2003.
- [104] : Elkheir Merabet. (2008). *Commande Floue Adaptative d'une machine asynchrone double étoile*. Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Batna.
- [105] : B. Singh, M. V. Verma, A. K. Tandon, "Rating reduction of static compensator for voltage control of three-phase self-excited induction generator," *IEEE ISIE*, Montréal, Québec, Canada, pp. 1194–1199, July 9–12 2006.
- [106] : G. K. Singh, K. B. Yadav, R. P. Saini, "Modeling and analysis of multi-phase (six phase) self-excited induction generator," *IEEE proceedings*, The Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS'2005, China, pp. 1922–1927, 2005.
- [107] : T. Ahmed, K. Nishida, M. Nakaoka, H. W. Lee, "Self-excited induction generator with simple voltage regulation scheme for wind turbine," *The 30th Annual Conference IEEE Industrial Electronics Society*, Bussan, Korea, pp. 86–91, 2–6 November 2004
- [108] : A. Kishore, R. C. Prasad, B. M. Karan, "Matlab simulink based dq modelling dynamic characteristics of three phase self-excited induction generator," *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, Cambridge, USA, pp. 312–316, March 26–29 2006.
- [109] : R. Abdessemed, M. Kadjoudj, *Modélisation des machines électriques*, Presses de l'université de Batna, Algérie, 1997.
- [110] : S. K. Jain, J. D. Sharma, S. P. Singh, "Transient performance of three-phase self-excited induction generator during balanced and unbalanced faults," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 149, No. 1, pp. 50–57, January 2002.
- [111] : Y. W. Liao, E. Levi, "Modelling and simulation of a stand-alone induction generator with rotor flux oriented control," *Electric Power Systems Research* 46, Elsevier Science, pp. 141–152, 1998.
- [112] : G. K. Singh, K. B. Yadav, R. P. Saini, "Analysis of a saturated multi-phase (six phase) self-excited induction generator," *International Journal of Emerging Electric Power systems*, Vol. 7, Iss. 2, Art. 5, pp. 1–21, 2006.
- [113] : A. Kishore, G. S. Kumar, "Dynamic modeling and analysis of three phase self excited induction generator using generalized state-space approach," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM*, S15, pp. 52–59, 2006.
- [114] : E. Merabet, R. Abdessemed, H. Amimeur, F. Hamoudi, L. Abdelhamid, "Influence de la charge sur une génératrice asynchrone double étoile (GASDE)," *International Conference on Renewable Energy ICRE'07*, university of Bejaia, pp. 63–68 (CDROM), 25–27 November 2007.
- [115] : A. Belamoudi, *Etude et simulation d'un système de conversion d'énergie à base d'une machine asynchrone*, mémoire de Magister de l'université El-Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, Décembre 1996.
- [116] : H. Amimeur, R. Abdessemed, D. Aouzellag, E. Merabet, F. Hamoudi, "Modélisation et analyse d'une génératrice asynchrone double étoile (GASDE)," *2nd International*

- Conference on Electrical and Electronics Engineering ICEEE'08, University of Laghouat, (CDROM), 21-23 April 2008.
- [117] : H. Overseth Rostoen, T. M. Undeland, T. Gjengedal, "Doubly Fed Induction Generator in a Wind Turbine", Wind Power and The Impacts on Power Systems, IEEE Workshop Oslo 17-18 June 2002
- [118] : N. H. Malik, A. H. Al-Bahrani, "Influence of the terminal capacitor on the performance characteristics of a self-excited induction generator," IEE Proceedings, Vol. 137, Pt. C, No. 2, pp. 168–173, March 1990.
- [119]: J. Larminie et A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley and Sons, Inc., New York, 2003.
- [120]: J. J. Baschuk et Xianguo Li, "A general formulation for a mathematical PEM fuel cell model," Journal of Power Sources, vol. 142, n° 1-2, mars 2005, pp. 134-153.
- [121]: J. H. Lee, T. R. Lalk et A. J. Appleby, "Modeling electrochemical performance in large scale proton exchange membrane fuel cell stacks," Journal of Power Sources, vol. 70, n° 2, février 1998, pp. 258-268.
- [122] : M. T. Iqbal, "Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system," Renewable Energy, vol. 28, n° 2, février 2003, pp. 223-237.
- [123] : J. M. Corrêa, F.A. Farret, L.N. Canha et M. Godoy Simões, "An electrochemical based fuel cell model suitable for electrical engineering automation approach," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 51, n° 5, octobre 2004, pp. 1103 - 1112.
- [124] : J. M. Corrêa, F. A. Farret, L. N. Canha et M. G. Simões, "Simulation of fuel-cell stacks using a computer-controlled power rectifier with the purposes of actual high-power injection applications," IEEE Trans. on Industrial Applications, vol. 39, n° 4, juillet-août 2003, pp. 1136 - 1142.
- [125] : I. Sadli, P. Thounthong, J-P. Martin S. Raël et B. Davat, "Behaviour of a protons exchange membrane fuel cell (PEMFC) supplying a low voltage static converter," 2nd France – Deutschland Fuel Cell Conference (FDFC2004), Belfort (France), 29 novembre-2 décembre 2004.
- [126] : M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M. S. Alam, P. C. Byrne, A. A. Sakla, et T. Thomas, "A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications," Journal of Power Sources, vol. 138, n° 1-2, novembre 2004, pp. 199-204.
- [127] : D.Hadiouche, « Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure », Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré de Nancy I, faculté des sciences et technique, 2001.
- [128] : H.Hammache, « Etude et réalisation d'une machine asynchrone double étoile : conception, alimentation et commande », Mémoire de Magister de l'Ecole Militaire Polytechnique, Alger, Algérie, Janvier 2007.
- [129] : T.Lameche, « Développement et Implémentation par Logique Floue d'une Commande DTC d'un Moteur à Induction Alimenté par un Onduleur de Tension PWM », Thèse de magister, université de Sétif, 2003.
- [130] : C.Canudas de Wit, « Commande des Moteur Asynchrones - Volume1 - Modélisation Contrôle Vectoriel et DTC », édition Hermès - Science publications, Paris, 2000.
- [131] : G.Strutzer, E.Samigiel, « Modélisation et commande des moteurs triphasés - commande vectorielle des moteurs synchrones - commande numérique par contrôleurs DSP », édition Ellipses, Mars 2000.
- [132] : A.Ivanov-Smolenski, « machines électriques », volume1, édition Mir Moscou, 1983.
- [133] : P.Vidal. (2004). *Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation*. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [134] : Z.Oudjebour, E.M.Berkouk, N.Sami, S.Belkacemi, S.Arezki, I.Messaif, « indirect space vector control of a double start induction fed by two five levels NPCVSI », International conference on Electric Machine, ICEM'04, Poland, 2004.

- [135]: D.Hadiouche, H.Razik, A.Rezzoug, (2000). *Study and simulation of space vector PWM control of double stator induction motor*. CIEP, page.42-47, Mexico.
- [136]: R.Toufouti, (2003). *Contrôle directe du couple de la Machine Asynchrone*. Thèse de magister, université de Constantine.
- [137]: A.Kalantari, M.Mirsalim, H.Rastegar, « Adjustable speed drive based on fuzzy logic for a dual Three- Phase Induction machine », Amirkabir University of Technology, Tehran- Iran, Proceedings in Electrimacs, Electric Drives II, 18-21 August 2002.
- [138]: R.Pena-Eguiuz, M.Pietrzak-David, V.Riga, B.DeFornel, « Comparison of several speed sensor less Strategy of Two different Dual Drive Induction Motor Control Structures», L2EP, unité mixte de recherche, INPT-ENSEEIH, CIEP 2002, Mexico, IEEE, pp. 41-46, 20-24 October 2002
- [139]: D.Grenier, F.Labrique, H.Buyse, E.Montagne, « Electromécanique : convertisseurs d'énergie et d'actionneurs », 2e cycle-école d'ingénieur, édition Dunod, Paris 2001.
- [140]: H.Yantour, J.Saadi, A.Khoumsi, «Modélisation et simulation d'une commande directe du couple appliquée à la machine asynchrone (DTC) », 6e conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'06, Rabat-MAROC, 3-5 avril 2006
- [141]: S. Hamandi, « Commande vectorielle la machine synchrone double étoile à aimants permanents », Thèse de DEA en contrôle industriel, université Libanaise, Sept. 2000.
- [142]: M.Azib, « Etude et Commande d'une MASDE Alimentée par Convertisseurs Matriciels », thèse de magistère en génie électrique, université A.Mira – Bejaia, 2009
- [143]: M.Etique, « Introduction Au Logiciel MATLAB », Yverdon- les –Bains version 1.2, mars 2002.
- [144]: L. Benalia. (2010). *Commande en tension des moteurs à induction double alimentés*. Doctorat en sciences en électrotechnique. Electricité Industrielle, Univ. BATNA.
- [145]: O.Bouakaz, « Contribution à l'analyse des onduleurs multi niveaux », mémoire magister, option électronique de puissance, université de BATNA, 2005.
- [146]: H. Amimeur. (2008). *Contribution à la commande d'une MASDE par mode de glissement*. Magister en électrotechnique, Université de BATNA.
- [147]: A.Boulahia, « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique », magister en électrotechnique, option : modélisation et commande des machines électriques, université de Constantine, 2009.
- [148]: S. Alloune , « Commande des machines polyphasées », thèse de magistère en génie électrique, université de Bejaia, Octobre 2005
- [149]: G.Crellet, G.Clerc, « Actionneurs électriques », édition EYROLLES, France, 1997.
- [150]: B. Equer, « Le Pompage Photovoltaïque : Manuel de cours énergie solaire photovoltaïque », édition Ellipses 1993.
- [151]: M.Arrouf, « Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque », Doctorat électronique, Constantine, 2007.
- [152]: K.Benlarbi, « Optimisation floue, neuronale et neuro-floue d'un système de pompage photovoltaïque entraînées par différents machines électriques », Thèse de magister, université de Batna 2003.
- [153]: T.Adamt, « Les Turbopompes », édition Eyrolles, Paris,1976.
- [154]: N.Nooma, S.Taaba, « Groupe motopompe », mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, 2004.
- [155]: A.SAADI « étude comparatif entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », mémoire de magister en électronique, université Mohamed Khider, Biskra, 2001.
- [156]: A.Moussi, A.Saadi, « étude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », LARHYSS Journal, n°01, mai 2002.
- [157]: R.P.Mukund. (1999). *Wind and solar power systems*. PhD, université Merchant Marine.

- [158] : R.Maouedj. (2005). *Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et Bouzaréah*. Magister, univ. Tlemcen.
- [159] : A.Dominique. (2004). *Cours de mécanique des fluides et agitation*. Université Henri Poincaré.
- [160] : Rekioua, D., Matagne, E. (2012). Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control. Green Energy and Technology, Springer-Verlag London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2403-0>
- [161] : F. Ayati, A. M'Raoui, M. Belhamel et A. Rebai. (2004). Modélisation d'un système de Production d'Hydrogène Solaire par Electrolyse. Revue des énergies renouvelables. Vol. 7 (2004) 135-150.
- [162] : C.Dumbs. (1999). Développement d'outils pour l'analyse des systèmes hybrides photovoltaïque-diesel. Thèse de l'école des mines de Paris, 20 décembre 1999.
- [163] : K.Reguieg, A.Issaad. (2012). Sahara Solar Breesder. 2<sup>e</sup> symposium académique ALGERIE-JAPON à Oran. Article du journal Liberté, édition du 18,19 mai 2012.
- [164] : Z. Khiat, S. Flazi et A. Boudghene Stambouli. (2007). Pluralité énergétique : enjeux et stratégie pour l'Algérie. Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 41 – 46.
- [165] : K.Bouchouicha. (2017). Modelisation multispectrale des images satellitaire - application: Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère. USTO, Oran, Thèse de doctorat en sciences.
- [166] : Nadjem Bailek, Kada Bouchouicha, Zaki Al-Mostafa, Mohamed El-Shimy, Nouar Aoun, Abdeldjalil Slimani, Saad Al-Shehri. (2018). A new empirical model for forecasting the diffuse solar radiation over Sahara in the Algerian Big South. Renewable Energy. Volume 117, March 2018, Pages 530-537
- [167] : Simulation de données climatiques et météorologiques historiques pour Timimoun – meteoblue. Consulté le 01 avril 2022.
- [168] : Timimoun \_ Climat, Températures et Météo. Les meilleures périodes ! site consulté le 01 avril 2022.
- [169] : A.mefti & M.Y Bouroubi, "estimation et cartographie de la composante globale du rayonnement solaire," no. 2019-244, 1999.
- [170] : Z.Merdaoui, "caractérisation radiométrique des sites de Bouzeréah et Ghardaia, Mémoire de magistère," Blida, 2007.
- [171] : K.Gairaa & S.Benkacali, "Modélisation numérique des irradiations globale et diffuse au site de Ghardaia," vol. 11, no. 1, 2008.
- [172] : K.Bouchouicha, "modelisation multispectrale des images satellitaire -application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère," USTO, Oran, Thèse de doctorat en sciences 2017.
- [173] : A.Hadj Arab, M.Benghanem et A.Gharbi. (2005). Dimensionnement des systèmes de Pompage Photovoltaïque. CDER. Revue des énergies renouvelables.
- [174] : H. Ney. (1988). Equipements de puissance. Editions Fernand Nathan, Paris.
- [175] : Lalouni, S., Rekioua, D. (2009). *Modeling and simulation of a photovoltaic system using fuzzy logic controller*. Second International Conference on Developments in eSystems Engineering, Abu Dhabi, pp. 23-28. <https://doi.org/10.1109/DeSE.2009.17>
- [176] : 1. L. Bemal-Agustin and R. Dufo-Lapez. (2009). Simulation and optimization of standalone hybrid renewable energy systems," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 13, pp. 2111 - 2118,. doi: 10.1016/j.rser.2009.01.010
- [177] : J. L. Bemal-Agustin , R. Dufo-Lapez, J. a Dominguez-Navarro, and J. M. YustaLoyo, "Optimal Design of a PV -Wind system for water pumping," Int. Conf, pp. 1- 6, 2008.
- [178] : A. Adjati, A. Azib et T. Rekioua. (2014). Etude d'une machine asynchrone à double alimentation en pompage photovoltaïque. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014) 411 – 418.

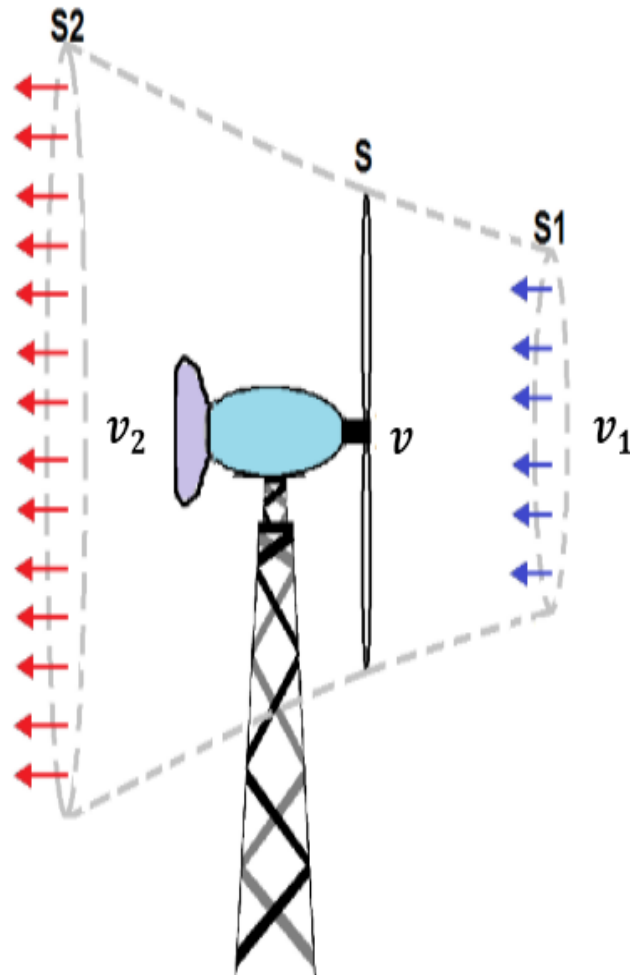


- [179] : S.M. Aït Cheikh. (2007). « Etude, Investigation et Conception d'Algorithmes de Commande Appliqués aux Systèmes Photovoltaïques ». Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique.
- [180] : G.Seguir, F.Notelet, «Electrotechnique industrielle, technique et documentation», page 484, édition Lavoisier, Paris, 1994,.
- [181] : Arezki Adjati, Toufik Rekioua, Djamila Rekioua. Degraded Mode of Dual Stator Induction Machine in Pumping. Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol.53, N°.2, April, 2020, pp. 273-282
- [182] : B.A.Welchko, T.A.Lipo, T.M.Jahns, S.E.Schulz, « Fault three phase AC motor drive topologies: a comparison of features, cost and limitations», IEEE transactions on power electronics, Vol. 19 pp1108-1116, n°4, July 2004.
- [183] : A.Ibrahim, « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée », Thèse de Doctorat, école doctorale Sciences, Ingénierie, Santé Diplôme délivré par l'Université Jean Monnet, 2009
- [184] : Y.Crevits, « Caractérisation et commande d'un entraînement polyphasé en mode dégradé », Doctorat de génie électrique, rapport de première année, école polytechnique Lille France, septembre 2009.
- [185] : S.Williamson, S.Smith, C.Hodge, «Fault tolerance in multiphase propulsion motors», journal of marine engineering and technology, n°4, A4, 2004.
- [186] : X.Kestelyn, « Modélisation vectorielle multi machines pour la commande des ensembles convertisseurs-machines polyphasées », Thèse de doctorat en génie électrique à l'université de Lille 1, 04 décembre 2003.
- [187] : X.Huangsheng, member IEEE, H.A.Toliyat, senior member IEEE, and L.J.Peteren, member IEEE. (2002). *Five-phase induction motor drives with DSPBased control system*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No.4, pp. 524-533, July 2002.
- [188] : R.Bigret and J.L.Féron, « Diagnostic - maintenance - disponibilité des machines tournantes », édition Masson, 1995.
- [189] : A. H. Bonnett, « Cause ac motor failure analysis with a focus on shaft failures », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36(5) :1435\_1448, 2000.
- [190] : Y.Zhao & Th.A.Lipo. (1996). *Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural unbalance*. Applied Power Electronics Conf& Exposition. APEC'96, Conf Proceedings 1996, eleventh annual volume 1, p 380-386, March.
- [191] : B.A.Welchko,T.M.Jahns and Hitis. (2002). *Synchronous machine drive response to a single-phase open circuit fault*. IEEE Transaction on power electronics, vol.17, issu5.
- [192] : J.P.Martin, F.Meibody-Tabar, B.Davat. (2000). Multiple phase permanent magnet synchronous machine supplied by VSIS, working under fault conditions», CDROM, IAS2000.
- [193] : H.A.Toliyat. (1998). *Analysis and simulation of five phase variable speed induction motor drives under asymmetrical connections*. IEEE transactions on power electronics, vol 13 n°4,pp 748-756, 1998.
- [194] : R.Kianinezhad, B.Nahid-Mobarakeh, member IEE, L.Baghli, F.Betin, member IEEE and G.A.Capolino. (2008). *Modeling and control of six-phase symmetrical Induction Machine Under*. Fellow IEEE, 2008.
- [195] : H.Xu, H.A.Toliyat, L. J. Peteren. (2001). *Modeling and control of five- phase induction motor under asymmetrical fault conditions*. Electric Machines & Power Electronics Laboratory Texas A&M University, IEEE 2001
- [196] : M.F.Benkhoris, N.Tali-Maamar, F.Terrien. (2002). *Decoupled control of double star synchronous motor supplied by PWM inverter: simulation and experimental results*. Laboratoire Atlantique de recherche au génie Electrique (LARGE-GE44)-France.

# **ANNEXES**

## ANNEXE 1

### A1/ ENERGIE DU VENT RÉELLEMENT RÉCUPÉRABLE



*Figure (A1.1) : Tube de courant du vent.*

Lorsque le vent frappe le bord d'attaque d'une pale à une vitesse  $v_1$ , une faible pression est créée sur l'extrados de la pale et une surpression de vitesse  $v_2$  est observée sur son intrados.

La surpression et la dépression forment la portance d'où la similitude faite avec une aile d'avion. Par supposition, les pâles tournent avec une vitesse moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne et la vitesse du vent après passage à travers le rotor [27].

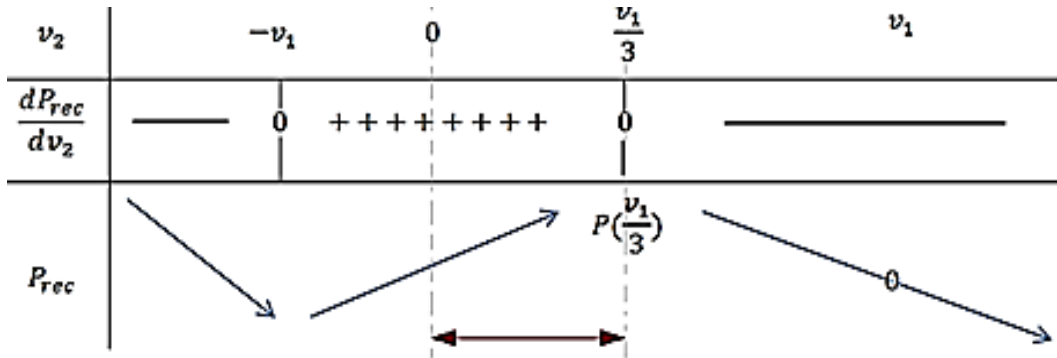
Selon la loi de conservation des puissances, la puissance récupérable peut être définie comme étant :

$$P_{rec} = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho_m (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho S \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) (v_1^2 - v_2^2) \quad (A1.1)$$

Si on prend la variable  $v_2 = x$ , on aura :

$$P_{recup} = \frac{1}{4} \times \rho \times S \times (-x^3 - v_1 x^2 + v_1^2 x + v_1^3) \quad (A1.2)$$

**Tableau (A1.1) : Table de variation de la fonction puissance**



La vitesse du vent offrant une puissance récupérable maximale est obtenue en annulant la dérivée de cette puissance par rapport à  $x$ , donc à  $v_2$ .

$$\frac{dP_{rec}}{dx} = \frac{1}{4} \rho S (-3x^2 - 2v_1 x + v_1^2) = \frac{-3}{4} \rho S \left( x - \frac{v_1}{3} \right) (x + v_1) = 0 \quad (A1.3)$$

La résolution de l'équation du second degré donne une première solution refusée pour un vent négatif et une deuxième solution  $v = \frac{v_1}{3}$ , offrant une puissance récupérable maximale.

Mathématiquement, la puissance récupérable pour  $v = \frac{v_1}{3}$  ne peut dépasser une certaine puissance dite maximale [25, 26, 27, 28, 29, 99] :

$$P_{recmax} = \frac{1}{4} \times \rho \times S \left( -\left(\frac{v_1}{3}\right)^3 - v_1 \left(\frac{v_1}{3}\right)^2 + v_1^2 \frac{v_1}{3} + v_1^3 \right) \quad (A1.4)$$

D'où

$$P_{recup} = \frac{1}{2} \times \frac{16}{27} \times \rho \times S \times v_1^3 = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times S \times v_1^3 \quad (A1.5)$$



## ANNEXE 2

### A2 / COEFFICIENT DE PUISSANCE Cp

Le coefficient Cp est appelé coefficient de « Betz », égale à  $16/27=0.5925$  où pratiquement la puissance récupérable ne peut dépasser cette valeur. Chaque éolienne possède son propre facteur de puissance Cp et une éolienne industrielle possède un facteur de puissance de 0,43 [28, 29].

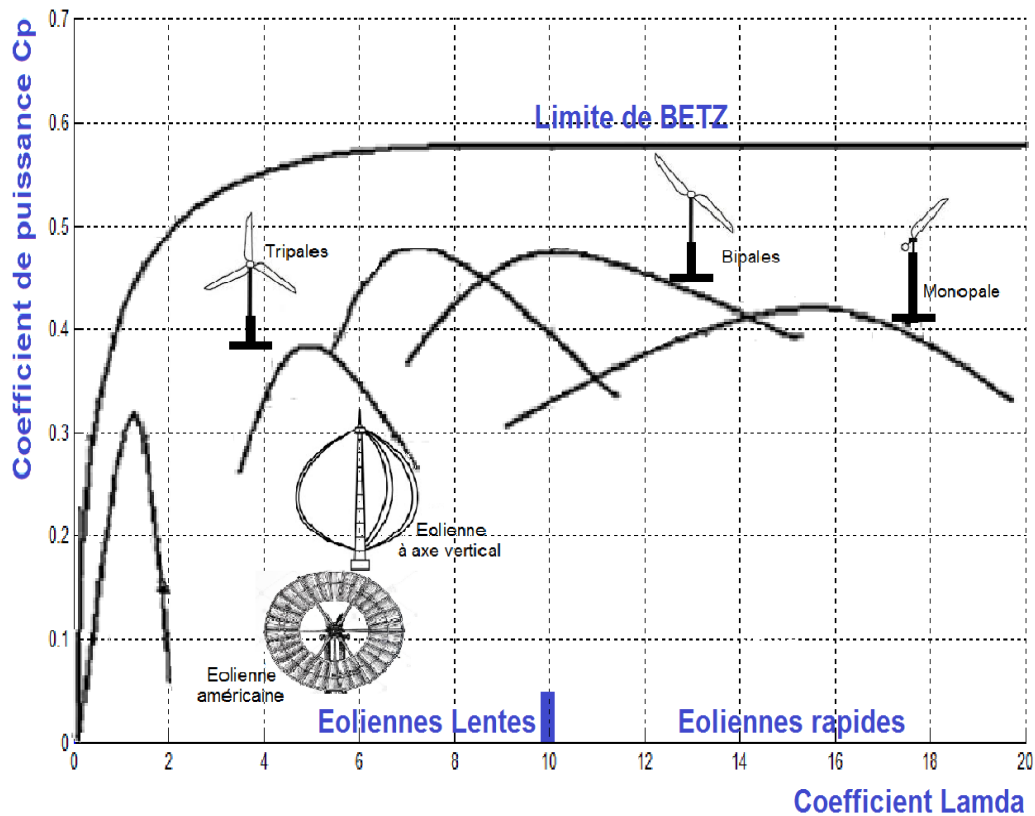


Figure (A2.1) : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [28, 29].

Pour une éolienne de petite puissance, l'équation analytique de Cp en fonction de lambda est donnée par [100] :

$$C_p(\lambda) = 7,9563 \cdot 10^{-5} \times \lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4} \times \lambda^4 - 9,86 \cdot 10^{-3} \times \lambda^3 - 9,41 \cdot 10^{-3} \times \lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2} \times \lambda + 0,001 \quad (A2.1)$$

### ANNEXE 3

#### A3 / CALCUL DE LA HAUTEUR D'ASPIRATION THÉORIQUE

La hauteur d'aspiration dans un réseau de pompage est la côte verticale mesurée entre la surface du réservoir d'aspiration et l'axe de la pompe. Cette hauteur est, directement, liée à la charge hydrostatique [151].

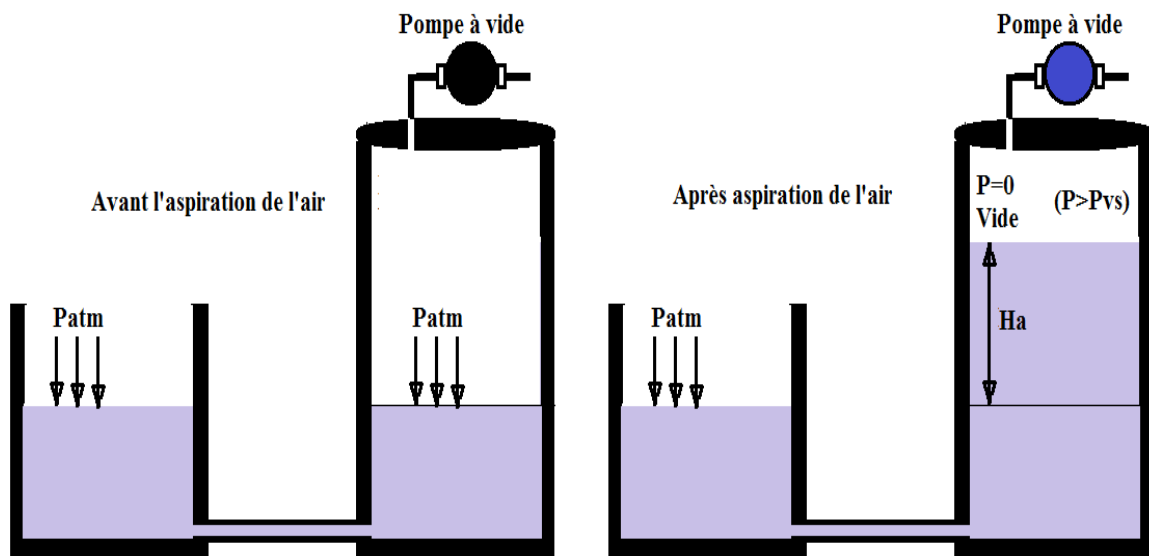


Figure (A3.1) : Détermination de la hauteur d'aspiration théorique  $H_a$

Avec une petite expérience, nous allons déterminer la valeur de la hauteur d'aspiration théorique (fig. II.32). Cette expérience consiste à utiliser une pompe à vide qui va aspirer l'air dans la cuve fermée (ou dans une cloche) jusqu'à obtenir une pression nulle, ce qui permettra à l'eau de monter dans la cuve. Quand l'équilibre est obtenu, la hauteur de montée de l'eau correspond à la hauteur d'aspiration.

Cette hauteur est calculée, en prenant la puissance à vide comme étant nulle, comme suit :

$$P_{atm} = P_{vide} + \rho_{eau} \times g_t \times H_a = \rho_{eau} \times g_t \times H_a ,$$

Avec  $g_t$  : Pesanteur et  $\rho_{eau}$  : Masse volumique de l'eau.

La hauteur d'aspiration théorique est donnée par :

$$H_a = \frac{P_{atm}}{\rho_{eau} \times g_t} \tag{A3.1}$$

Application numérique :  $H_a = \frac{101325}{1000 \times 9.81} = 10.33 \text{ m.}$

## ANNEXE 4

### A4.1 / CARACTÉRISTIQUES DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Panneau solaire de type SIEMENS SM 110-24.

Paramètre	Valeur
Puissance maximale du panneau. « $P_{OP}$ »	110 W
Courant au point de puissance maximale. « $I_{OP}$ »	3,15 A
Tension au point de puissance maximale. « $V_{OP}$ »	35 V
Courant de court-circuit. « $I_{CC}$ »	3,45 A
la tension en circuit ouvert. « $V_{CO}$ »	43,5 V
Coefficient d'incrémentation du courant $I_{CC}$ . « $\alpha_T$ »	1,4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension $V_{CO}$ . « $B_T$ »	-152 mV/°C

### A4.2 / PARAMÈTRES DE LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ETOILE

Résistance rotorique	$R_r = 2,10 \Omega$	Résistance des enroulements de la première étoile statorique	$R_{s1} = 1,90 \Omega$
Nombre de paires de pôles	$p = 1$	Résistance des enroulements de la deuxième étoile statorique	$R_{s2} = 1,90 \Omega$
Moment d'inertie	$J = 0,038 \text{ kg.m}^2$	Inductance de fuite d'une phase de la première étoile statorique	$L_{s1} = 0,0132 \text{ H}$
Fréquence nominale	$F = 50 \text{ Hz}$	Inductance de fuite d'une phase de la deuxième étoile statorique	$L_{s2} = 0,0132 \text{ H}$
Capacité d'excitation	$40\mu\text{F}$	Inductance de fuite d'une phase rotorique	$L_r = 0,0132 \text{ H}$
Capacité de compensation	$6\mu\text{F}$	Inductance mutuelle de fuite	$L_m = 0,011 \text{ H}$

**A4.3 / PARAMÈTRES DU MOTEUR ASYNCHRONE À DOUBLE ETOILE**

Puissance nominale	$P_n = 4,5 \text{ kW}$	Résistance rotorique	$R_r = 2,12 \Omega$
Tension nominale	$V_n = 220 \text{ V}$	Résistance des enroulements de la première étoile statorique	$R_{s1} = 3,72 \Omega$
Courant nominale	$I_n = 6,5 \text{ A}$	Résistance des enroulements de la deuxième étoile statorique	$R_{s2} = 3,72 \Omega$
Nombre de paires de pôles	$p = 1$	Inductance des enroulements de la première étoile statorique	$L_{s1} = 0,022 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0,0625 \text{ kg.m}^2$	Inductance des enroulements de la deuxième étoile statorique	$L_{s2} = 0,022 \text{ H}$
Coefficient de frottement	$K_f = 0,001$ Nms/rd	Inductance rotorique	$L_r = 0,006 \text{ H}$
Fréquence nominale	$F = 50 \text{ Hz}$	Inductance mutuelle	$L_m = 0,3672 \text{ H}$

**A4.4 / PARAMÈTRES DE LA POMPE CENTRIFUGE**

Vitesse nominale $\omega_n$	150 rad/sec
Inertie de la pompe	0,02 Kg.m <sup>2</sup>
Débit nominal	21 m <sup>3</sup> /h
Hauteur nominale	12 m
Constante $k_0$	4.923410-3 m/(rad/sec) <sup>2</sup>
Constante $k_1$	1.5826.10-5 m/(rad/sec)(m <sup>2</sup> /sec)
Constante $k_2$	-18144 m/(m <sup>3</sup> /sec) <sup>2</sup>

**A4.5 / PARAMÈTRES DE LA CANALISATION**

Hauteur géométrique	$H_g = 10 \text{ m}$	Diamètre de la canalisation	$.d = 0,06 \text{ m}$
Longueur de la canalisation	$L = 7,4 \text{ m}$	Gravitation	$.g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s}$
Coefficient de pertes de charge locales ou singulière		$\xi = 6,3 \text{ m}$	
Coefficient de pression de la canalisation		$\lambda = 0,039 \text{ m}$	

## ANNEXE 5

### AN.5.1 / CALCUL DU COUPLE DANS LE CAS DE L'ACTION SUR LE COURANT D'UNE SEULE PHASE ENCORE SAINNE PAR CHAQUE PHASE OUVERTE

Dans le cas des fems sinusoïdales et des courants sinusoïdaux supposés en phase, leurs expressions sont données par :

$$\begin{cases} e_k = E_{\max} \times \sin\left(\omega t - 2\pi \times \frac{K-1}{n}\right) \\ i_k = I_{\max} \times \sin\left(\omega t - 2\pi \times \frac{K-1}{n}\right) \end{cases} \quad (\text{A5.1.1})$$

Avec :  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ .

Le couple en mode de fonctionnement sans dégradation est donné par

$$C_n = \frac{\vec{e} \times \vec{i}}{\Omega} = \frac{1}{\Omega} \sum_{k=1}^n e_k \times i_k = \frac{n}{2} \times \frac{E_{\max} \times I_{\max}}{\Omega} \quad (\text{A5.1.2})$$

La déconnexion de la phase « j » cause une réduction de la valeur moyenne du couple et une ondulation de pulsation « 2ω ».

$$C_{n-1} = C_n - \frac{C_n}{N} \left(1 - \cos\left(2\omega t - 2 \times \frac{2\pi(j-1)}{n}\right)\right)$$

Ou bien encore :

$$C_{n-1} = \frac{C_n}{n} \left[ (n-1) + \cos\left(2\omega t - 2(j-1) \frac{2\pi}{n}\right) \right] \quad (\text{A5.1.3})$$

Après calculs, la phase « m » doit être alimentée par un courant de valeur :

$$i_{mf} = 2 \times I_{\max} \cos\left(\frac{(m-j)2\pi}{n}\right) \times \sin\left(\omega t - \frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \quad (\text{A5.1.4})$$

Pour obtenir la condition d'annulation des pulsations du couple qui prendra la forme finale de

$$C_{(n-1)f} = \frac{C_n}{n} \left[ (n-2) + 2\cos^2\left(\frac{2\pi(m-j)}{n}\right) \right] \quad (\text{A5.1.5})$$

De (V.5), le couple ' $C_{(n-1)f}$ ' prend une valeur maximale dans le cas où le décalage angulaire entre la phase déconnectée et la phase dont le courant est modifié est proche de 90° électrique.

A rappeler que cette méthode est valable tant que le nombre de phases déconnectées est inférieur à la moitié du nombre de phases de la machine [142, 148, 185].

**A5.2 / ACTION SUR CHACUN DES COURANTS DANS LES PHASES ENCORE SAINES**

Dans le cas d’une machine à « n phases », la création d’un champ tournant statorique obéit aux deux relations suivantes [142, 148, 193].

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n i_k \times \cos \frac{2(k-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} \times i \times \cos \theta \\ \sum_{k=1}^n i_k \times \sin \frac{2(k-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} \times i \times \sin \theta \end{cases} \tag{A5.2.1}$$

Dans le cas où la première phase est déconnectée, pour pouvoir assurer un couple constant, il faudra que les deux relations (V.6) soient respectées.

$$\begin{cases} \sum_{k=2}^n i_k \times \cos \frac{2(k-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} \times i \times \cos \theta \\ \sum_{k=2}^n i_k \times \sin \frac{2(k-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} \times i \times \sin \theta \end{cases} \tag{A5.2.2}$$

Après introduction de la notion du phaseur complexe et séparation des termes en « cosinus » et les termes en « sinus », avec ( k=2, 3,..., n), le courant devient [3, 185] :

$$i_k = x_k \times \cos \theta + y_k \times \sin \theta \tag{A5.2.3}$$

Le système devient :

$$\begin{cases} x_2 \cos 2\pi/n + x_3 \cos 4\pi/n + x_4 \cos 6\pi/n + \dots + x_n \cos 2(n-1)\pi/n = \frac{n}{2} \\ y_2 \cos 2\pi/n + y_3 \cos 4\pi/n + y_4 \cos 6\pi/n + \dots + y_n \cos 2(n-1)\pi/n = 0 \\ x_2 \sin 2\pi/n + x_3 \sin 4\pi/n + x_4 \sin 6\pi/n + \dots + x_n \sin 2(n-1)\pi/n = \frac{n}{2} \\ y_2 \sin 2\pi/n + y_3 \sin 4\pi/n + y_4 \sin 6\pi/n + \dots + y_n \sin 2(n-1)\pi/n = 0 \end{cases} \tag{A5.2.4}$$

L’objectif est de déterminer les courants « ik » tel que leurs modules "  $\sqrt{x_k^2 + y_k^2}$  " soient minimum.

Dans le cas où la machine est supposée couplée en étoile :  $\begin{cases} x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_n = 0 \\ y_2 + y_3 + y_4 + \dots + y_n = 0 \end{cases}$

Les pertes joules peuvent être minimisées dans le cas où les amplitudes de tous les courants sont égales : '  $x_2^2 + y_2^2 = x_3^2 + y_3^2 = \dots = x_{n-1}^2 + y_{n-1}^2 = x_n^2 + y_n^2$  '.

Le système initial devient un système de ‘n+4’ équations avec ‘2(n-1)’ variables inconnues. Cette méthode s’applique aux machines ayant un nombre de phases supérieur à trois.<<

### المخلص:

لا يمكن ترجمة التقدم المذهل للتقنيات بالإيجابي إلا إذا استفادت منه مناطق الظل المعزولة. لم تعد من الرفاهيات تخفيض الكربون، بل أصبحت من ضروريات القرن، حيث يضطر الجميع لتقديم تنازلات، حتى لا يختنق كوكب الأرض بعد الآن. ظهور الطاقات المتجددة، ولا سيما الألواح الكهروضوئية و طاقة الرياح، هي وسيلة وفرصة للتخلص التدريجي من ثاني أكسيد الكربون. لا يمكن الانتقال إلى الهيدروجين إلا بعد احترام الدول للمعاهدات المبرمة من أجل حماية الأرض. يعد التهجين المتحصل من طاقة الشمس و طاقة الرياح والخلايا الهيدروجينية في توفير الطاقة اللازمة لمضخة من أجل ملء خزان الماء وقرارير الهيدروجين طريقة جديدة في تسبير المحطة. يوفر استخدام الآلات متعددة الأطوار، ولا سيما المحرك والمولد الغير المتزامن ذو ملفين ثابتين، مزايا لا تُحصى فيما يتعلق بتجزئة الطاقة ويبرز هذا المنفذ في امكانية التشغيل في حالة خلل أو انقطاع إحدى أطوار التغذية. لا يتم الحصول على تحكم جميع هذه مصادر الطاقة إلا إذا كتب دفتر الشروط بشكل دقيق وبدون غموض. في هذا المنظور، فإن الآفاق الحقيقية لهذا العمل هو القضاء فقط على المجاعة والفقر والأوبئة في هذه المناطق النائية. الإلحاح على توفير الماء ضروري لمعيشة الإنسان والحيوان والنبات.

### كلمات مفتاحية:

محرك غير متزامن ذو ملفين ثابتين، موج، التحكم في حالة خلل، ضخ المياه، الطاقات المتجددة، الضخ بالطاقة الشمسية، طاقة الرياح، الخلايا الهيدروجينية، التحليل الكهربائي للماء، الطاقات الهجينة.

### Résumé :

L'avancée spectaculaire des technologies ne peut se traduire positivement que si des populations isolées et éparpillées puissent en bénéficier.

La décarbonation n'est plus un luxe, mais une nécessité du siècle, où tout un chacun est contraint à entreprendre des concessions, afin de permettre à la planète de ne plus suffoquer.

L'avènement des énergies renouvelables, notamment, le photovoltaïque et l'éolienne est une opportunité de se débarrasser petit à petit du dioxyde de carbone et la migration vers l'hydrogène ne peut se traduire que par une volonté des Etats à respecter les traités afin de protéger la terre.

L'hybridation obtenue par une combinaison de panneaux solaires, de mats d'éolienne et de pile à combustible est envisagée pour offrir l'énergie nécessaire à la pompe centrifuge pour remplir le réservoir d'eau et aux électrolyseurs de charger les bouteilles d'hydrogène.

L'utilisation des machines multiphasées, notamment le moteur et le générateur asynchrone à double étoile offrent des avantages immesurables en ce qui concerne la segmentation de puissance et la possibilité de fonctionnement en mode dégradé.

La gestion de tous ces actionneurs et de toutes ces sources n'est obtenue que si le cahier de charge est bien transcrit, n'omettant aucune éventualité au risque de mettre en péril la station.

Dans cette optique, les perspectives réelles de cette démarche, n'est que d'éradiquer la famine, la pauvreté et les épidémies à travers le monde et l'urgence est de permettre d'accéder à l'eau, élément primordial à la survie de l'homme, de la faune et de la flore et la généralisation de ce procédé à travers toutes les localités asséchées.

### Mots clés :

Machine asynchrone à double étoile, onduleur MLI, Commande en mode dégradé, Pompage d'eau, Énergies renouvelables, Pompage photovoltaïque, Éolienne, Pile à combustible, Electrolyseur, Hybridation des sources.

### Summary :

Dramatic advances in technology can only be positively translated if isolated and dispersed populations can benefit. Decarbonization is no longer a luxury, but a necessity of the century, where everyone is forced to make concessions, in order to allow the planet to no longer suffocate.

The advent of renewable energies, notably photovoltaics and wind power, is an opportunity to gradually get rid of carbon dioxide. The migration to hydrogen can only be done by a willingness of States to respect the treaties in order to protect the earth.

The hybridization obtained by a combination of solar panels, wind turbine masts and fuel cells is carried out to provide the energy needed for the centrifugal pump to fill the water tank and the electrolyzers to charge the hydrogen bottles.

The use of multiphase machines, including the twin-star asynchronous motor and generator, offer immeasurable advantages in terms of power segmentation and the possibility of operation in degraded mode.

The management of all these actuators and all these sources is only obtained if the specifications are correctly transcribed. Not to neglect any eventuality at the risk of jeopardizing the station.

In this perspective, the real prospects of this approach, is only to eradicate famine, poverty and epidemics in these remote regions. The urgency is to provide access to water, an essential element for the survival of man, fauna and flora and the generalization of this process through all dry localities.

### Keywords:

Dual stator induction motor (DSIM), Control in degraded mode, Inverter MLI, Pumping of water, Renewable energies, Photovoltaic Pumping. Wind turbine, Fuel cell, Electrolyser, Hybridization of sources.