

Université Mohamed Khider - Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département: Genie Electrique  
Réf : .....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم : الهندسة الكهربائية  
المرجع : .....

Mémoire présenté en vue de l'obtention  
Du Diplôme de  
**Magister en Electrotechnique**  
Option : Energies Renouvelables

---

---

Optimisation d'Un Système De Dessalement Renouvelable

---

---

Présenté par : CHARROUF Omar

Soutenu publiquement le 01 / 07 / 2012

**Devant le jury composé de**

Dr. Arezki MENACER	Maitre de conférences	U. de Biskra	Président
Dr. Achour BETKA	Professeur	U. de Biskra	Rapporteur
Dr. Kamel BARRA	Maitre de conférences	U. de O.EL Bouaghi	Examineur
Dr. Samir BENDIB	Maitre de conférences	U. de Batna	Examineur

## *Remerciements*

*Tout d'abord, Mes louanges à DIEU le Tout Puissant pour m'avoir donné le courage, la Volonté, la patience durant ces années d'étude et que grâce à Lui ce travail a été réalisé.*

*Les travaux de recherche dans le cadre de ce mémoire sont effectués au sein du Laboratoire de Génie Electrique Biskra (L G E B) de l'université Mohamed Khider sous La direction de Mr **BETKA Achour** Professeur au département de génie électrique. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude et mes sincères remerciements .Ses qualités scientifiques et humaines ont Toujours été une source de motivation.*

*Je remercie très vivement Mr **Arezki MENACER** Maître de conférences à l'université Mohamed Khider pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner mon travail en tant que président de jury.*

*Mes vifs remerciement vont à Mr **Kamel BARRA**, Maître de conférence à l'Université d'Oum EL Bouaghi et Mr **Samir BENDIB** Maître de conférence à l'Université de Batna d'avoir accepté de juger ce travail.*

*J'adresse mes remerciements au directeur du laboratoire LGEB Mr le Professeur **ZOUZOU Salahi Eddine** et tout le personnel pour les moyens mis à notre disposition.*

*Un remerciement particulier à mes amis **BELOUAR Houcine** et **BOUBAKER Zine El Abidine** pour leurs encouragements permanents.*

## **Dédicace**

**Je dédie ce travail :**

**A la mémoire de mes chers parents et ma fille Isrâ.**

**A mon épouse et mes enfants**

**A toute ma famille.**

## NOMENCLATURE

<i>i</i>	Nombre d'ions dissociés d'un électrolyte
<i>C</i>	Concentration en sels en mol.m <sup>-3</sup>
<i>R<sub>g</sub></i>	Constante des gaz parfaits ( $R_g = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
<i>T</i>	Température (°K)
RO	Osmose inverse (Reverse osmosis en Anglais)
MSF	Multi stages Flash (Distillation à détente étagées)
MED	Multi-effets distillation
ED	Electrodialyse
VC	Compression de vapeur
MVC	Multi vapeur compression
SD	Distillation solaire
HD	Humidification-Déshumidification
PV	Photovoltaïque
BWRO	Osmose inverse pour eau saumâtre (Brakish Water Reverse Osmosis en Anglais)
$\Pi$	Pression osmotique (bar)
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
HP	Haute pression
MAS	Machine asynchrone
GSAP	Génératrice synchrone à aimants permanents.
<i>R<sub>t</sub></i>	Rayon de la pale de la turbine (m)
<i>K<sub>b</sub></i>	Elasticité (N/m)
<i>db</i>	Coefficient de frottement par rapport à l'air
<i>Kh.</i>	Elasticité de l'arbre d'entraînement (N/m)
<i>dg</i>	Coefficient de frottement du rotor
<i>G</i>	Gain du multiplicateur (sans unité)
<i>J</i>	Moment d'inertie [kg.m <sup>2</sup> ]
<i>Tb<sub>1</sub>, Tb<sub>2</sub>, Tb<sub>3</sub></i>	Forces appliquées sur les pales (N)

---

$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique (rd/s)
$\Omega_{turbine}$	Vitesse mécanique de la turbine (rd/s)
$Caer$	Couple aérodynamique(N.m)
$Cg$	Couple d'entraînement de la génératrice (N.m)
$C_{mec}$	Couple mécanique totale (N.m)
$C_{em}$	Couple électromagnétique (N.m)
$P_v$	Puissance du vent (Watt)
$S$	Surface utile traversée par le vent (m <sup>2</sup> )
$\rho$	Masse volumique ( kg/m <sup>3</sup> )
$V$	Vitesse du vent (m/s)
$\lambda$	Vitesse réduite spécifique (Ratio)
$P_{aer}$	Puissance aérodynamique (W)
$C_p$	Coefficient de puissance
$cp$	Concentration du perméat (g/l)
$C_f$	Couple des frottements visqueux (N.m)
$cf$	Concentration de l'eau d'alimentation (g/l)
$w$	Pulsation des courants statoriques (rd/s)
$[V_s]$	Vecteur tensions statoriques de la GSAP (V)
$[i_s]$	Vecteur courants statoriques de la GSAP (A)
$[\varphi_s]$	Vecteur flux statoriques (Wb)
$[R_s]$	Matrice résistance du stator (Ohm)
$[L_{abc}]$	Matrice inductance du stator (H)
$[T]$	Matrice de <i>Park</i> normalisée
$p$	Nombre de paire de pôles
$\varphi_{sf}$	Flux total dû aux aimants de la GSAP (Wb)
$R$	Taux de recouvrement.(%)
$[V_{ABCs}]$	Vecteur des tensions des phases statoriques de la MAS (V)
$[V_{abcr}]$	Vecteur des tensions des phases rotoriques de la MAS (V)
$[I_{ABCs}]$	Vecteur des courants des phases statoriques de la MAS (A)

$[I_{abcr}]$	Vecteur des courants des phases rotoriques de la MAS (A)
$L_a, L_b, L_c$	Inductances propres des phases a, b, c de la MAS (H)
M	Mutuelle inductance entre phases de la MAS (H)
$V_{sd}; V_{sq}$	Tensions statoriques selon les axes dq de la GSAP (V)
$I_{sd}; I_{sq}$	Courants statoriques selon les axes dq de la GSAP (A)
$I_{ds}; I_{qs}$	Courants statoriques selon les axes dq de la MAS (A)
$I_{qs-ref}$	Courants statorique de référence selon l'axe q de la MAS (A)
$\phi_d, \phi_q$	Flux du stator selon les axes d, q (Wb)
$L_d, L_q$	Inductance du stator selon les axes d, q de la GSAP (H)
$E_{ds} E_{qs}$	FEM produites par la GSAP (V)
$E_d E_q$	Termes de couplage des tensions selon l'axe dq de la MAS (V)
$u_{wj}$	Signaux de commande du convertisseur
$V_{dc}$	Tension au bus continu (V)
$I_{dc}$	Courant à l'entrée du bus continu (A)
$I_s$	Courant à la sortie du bus continu (A)
$I_{s-ref}$	Courant de référence à la sortie du bus continu (A)
$I_c$	Courant de charge de la capacité (A)
$I_{c-ref}$	Courant de charge de référence de la capacité (A)
$P_{dc}$	Puissance au bus continu (W)
$V_{sd}$	Tension statorique sur l'axe d de la GSAP (V)
$V_{sq}$	Tension staorique sur l'axe q de la GSAP (V)
$V_{ds}$	Tension statorique sur l'axe d de la MAS (V)
$V_{qs}$	Tension statorique sur l'axe q de la MAS (V)
$P_m$	Puissance mécanique développée par la GSAP (W)
$P$	Pression (Pa)
$H$	Hauteur manométrique (m)
$Q$	Débit ( m <sup>3</sup> /s)
$T_r$	Couple statique de la pompe (N.m)
$Q_p$	Débit du perméat (Kg/s)
$Q_f$	Débit massique de l'eau d'alimentation (Kg/s)
$Y$	Taux de rétention(%)

---

$J_w$	Flux massique du perméat à travers la membrane ( $K_g \cdot m^{-2} s^{-1}$ )
$J_s$	Flux massique des Sels à travers la membrane ( $K_g \cdot m^{-2} s^{-1}$ )
$S_m$	Surface active de la membrane ( $m^2$ .)
$A$	Perméabilité de la membrane à l'eau ( $K_g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ )
$\Delta\pi$	Pression transmembranaire d'osmose ( $Pa$ .)
$B$	Perméabilité de la membrane aux Sels ( $K_g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )
$\Delta P_d$	Chute de pression le long du canal de la membrane (Pa)
$A_{ref}$	Facteur de perméabilité de référence de la membrane ( $K_g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ )
$TCF$	Facteur de correction de la température
$FF$	Facteur de colmatage ( <i>Fouling Factor</i> )
$PI$	Proportionnel-Intégral

## Liste des figures

Figure 1.1	Classification des différents procédés de dessalement.....	4
Figure 1.2	Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.....	6
Figure 1.3	La pression osmotique d'une eau à 20°C en fonction de la concentration.....	6
Figure 1.4	Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.....	7
Figure 1.5	Membrane en spirale.....	8
Figure 1.6	Schéma de principe de l'électrodialyse.....	9
Figure 1.7	Schéma de principe d'un distillateur solaire.....	10
Figure 1.8	Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF).....	11
Figure 1.9	Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED).....	12
Figure 1.10	Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple effet avec compression de vapeur.....	12
Figure 1.11	Schéma général d'une unité HD.....	13
Figure 1.12	Représentation de quelques combinaisons possibles des sources d'énergies renouvelables et les procédés de dessalement.....	14
Figure 1.13	publications depuis 1980 sur le dessalement par les énergies renouvelables.....	15
Figure 2.1	Schéma représentatif du système de dessalement éolien.....	18
Figure 2.2	Système mécanique de l'éolienne.....	19
Figure 2.3	Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	20
Figure 2.4	– Schéma de la turbine éolienne.....	21
Figure 2.5	- Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse de la turbine .....	22
Figure 2.6	Schéma bloc du modèle de la turbine.....	24
Figure 2.7	Schéma de la machine synchrone dans le repère abc.....	25
La figure 2.8	Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q).....	27
Figure 2.9	Modèle équivalente de la GSAP sur l'axe d-q.....	28
Figure 2.10	- structure du convertisseur MLI.....	30
Figure 2.11	: Comparaison d'un signal triangulaire $\xi$ et d'un signal sinusoïdal $uwj$ .....	30
Figure 2.12	– Représentation du bus continu.....	32

Figure 2.13 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.....	33
Figure 2.14 Représentation schématique de la transformation des enroulements réels en enroulements équivalents (Transformation de Park).....	34
Figure 2.15 : Les principaux constituants d'une pompe centrifuge .....	39
Figure 2.16 Pompe multicellulaire entraînée par un moteur asynchrone.....	39
Figure 2.17 : Illustration : Hauteur manométrique totale maximale.....	40
Figure 2.18 Courbe caractéristique Pression-débit de la pompe HP pour différentes fréquences.....	41
Figure 2.19 Caractéristique du couple résistant de la pompe.....	42
Figure 2.20 Diffusion de l'eau dans la membrane.....	43
Figure 3.1 Schéma synoptique de la stratégie de commande du système de dessalement Eolien.....	46
Figure 3.2 Zones de fonctionnement de l'aérogénérateur.....	47
Figure 3.3 Courbe Puissance-vitesse de la turbine éolienne.....	48
Figure 3.4 Schéma synoptique d'une commande MPPT en vitesse.....	50
Figure 3.5 Commande par Mode glissant d'ordre deux de la GSAP.....	52
Figure 3.6 Trajectoire de l'algorithme du supertwisting sur le plan de phase.....	53
Figure 3.7 Principe de la commande vectorielle.....	58
Figure 3.8 Schéma de commande de la MAS.....	59
Figure 3.9 Schéma bloc de régulation de la tension au bus continu .....	60
Figure 3.10 Schéma –bloc de génération du courant $I_q$ -ref .....	62
Figure 3.11 Schéma bloc de la boucle de régulation du flux.....	62
Figure 3.12 Commande en tension de la MAS.....	64
Figure 3.13 Boucle de régulation des courants $I_{ds}$ , $I_{qs}$ après découplage.....	64
Figure 3.14 Organigramme d'un algorithme génétique simple.....	68
Figure 3.15 Exemple d'un chromosome en codage binaire.....	69
Figure 3.16 Sélection par la méthode de la roue de loterie.....	70
Figure 3.17 Croisement en un point.....	72

Figure 3.18 Croisement multipoints (P=2) en codage binaire.....	73
Figure 3.19 Croisement uniforme en codage binaire.....	73
Figure 3.20 Mutation dans le cas d'un codage binaire.....	74
Figure 3.21 Organigramme de génération du flux optimal.....	75
Figure 4.1 Profil du vent moyen.....	76
Figure 4.2 Allure du coefficient de puissance $C_p$ .....	77
Figure 4.3 Allure de la Puissance fournie par la GSAP.....	77
Figure 4.4 Allure des courants direct et en quadrature (régulateurs PI).....	78
Figure 4.5 Allure des courants direct et en quadrature (régulation par supertwisting).....	79
Figure 4.6 Allure du couple électromagnétique (régulateur PI).....	79
Figure 4.7 Allure du couple électromagnétique (régulation par supertwisting).....	80
Figure 4.8 Allure de la vitesse de la GSAP.....	80
Figure 4.9 Tension au bus continu.....	82
Figure 4.10 Orientation du flux (Fonctionnement à flux nominal).....	82
Figure 4.11 Orientation du flux (Fonctionnement à flux optimal).....	82
Figure 4.12 Allure des Courants direct et en quadrature (Fonctionnement à flux nominal)...	83
Figure 4.13 Allure des Courants direct et en quadrature (Fonctionnement à flux optimal)....	83
Figure 4.14 Allure du couple électromagnétique et du couple résistant.....	83
Figure 4.15 Allure de la vitesse mécanique du moteur asynchrone .....	84
Figure 4.16 Allure de la puissance utile du moteur asynchrone.....	85
Figure 4.17 Allure du rendement du moteur asynchrone.....	85
Figure 4.18 Allure de la pression de la pompe.....	87
Figure 4.19 Allure du débit de la pompe.....	88
Figure 4.20 Allure du débit du perméat pour $C_f=3g/l$ .....	89
Figure 4.21 Allure du débit du perméat pour $c_f=3g/l$ et $c_f=8g/l$ .....	89
Figure 4.22 Allure du taux de recouvrement .....	89
Figure 4.23 Concentration du perméat pour $C_f=8g/l$ .....	90

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

### CHAPITRE I : Etat de l'art des procédés de dessalement associés aux énergies renouvelables

<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>3</b>
1.2 Caractéristiques des eaux marines et saumâtres.....	3
1.2.1 Les eaux marines.....	3
1.2.2 Les eaux saumâtres.....	3
<b>1.3 Les principales technologies de dessalement des eaux.....</b>	<b>4</b>
1.3.1 L'osmose inverse.....	5
1.3.1.1 Principe de l'osmose inverse.....	5
1.3.1.2 Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.....	7
1.3.1.3 Description de la membrane RO.....	7
1.3.2 L'électrodialyse (ED).....	8
1.3.3 Les procédés de distillation.....	9
1.3.3.1 Distillation solaire directe (SD).....	9
1.3.3.2 Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF).....	10
1.3.3.3 Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).....	11
1.3.3.4 Procédé de compression de vapeur (VC).....	12
1.3.3.5 Procédé d'humidification-déshumidification (HD).....	13
<b>1.4 Systèmes de dessalement associés aux énergies renouvelables.....</b>	<b>13</b>
<b>1.5 Conclusion.....</b>	<b>13</b>

### CHAPITRE II : Configuration et modélisation du Système de dessalement renouvelable

<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Configuration du système de dessalement renouvelable.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Modélisation de la turbine éolienne.....</b>	<b>19</b>
2.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	19
2.3.2 Modélisation de la turbine.....	21
2.3.3 Modèle du multiplicateur.....	23
2.3.4 Equation dynamique de l'arbre.....	23

<b>2.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....</b>	<b>24</b>
2.4.1 Présentation de la machine synchrone.....	24
2.4.2 Hypothèses simplificatrices.....	25
2.4.3 Mise en équation de la machine synchrone.....	25
2.4.3.1 Application de la transformation de Park.....	26
2.4.3.2 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère lié au rotor.....	27
<b>2.5 Modèle du convertisseur.....</b>	<b>29</b>
<b>2.6 Modélisation du bus continu.....</b>	<b>32</b>
<b>2.7 Modélisation du moteur asynchrone.....</b>	<b>32</b>
2.7.1 Modèle dynamique de la machine à induction.....	33
2.7.2 Equation de la machine à induction en régime linéaire.....	34
2.7.3 Équations de la machine dans le plan Park.....	34
2.7.4 Choix du référentiel.....	37
2.7.4.1 Référentiel lié au champ tournant.....	37
<b>2.8 Modélisation de la pompe haute pression (HP).....</b>	<b>38</b>
2.8.1 Principe de fonctionnement et construction.....	38
2.8.2 Caractéristiques fondamentales de la pompe.....	39
2.8.2.1 Caractéristique Hauteur manométrique –Débit : $H(Q)$ .....	40
2.8.2.2 Caractéristique du couple.....	41
<b>2.9 Modèle de la membrane d'osmose inverse.....</b>	<b>42</b>
<b>2.10 Conclusion.....</b>	<b>42</b>

### **CHAPITRE III : Stratégies de commande et optimisation du système de dessalement renouvelable.**

<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2 Commande du système de conversion d'énergie éolienne.....</b>	<b>47</b>
3.2.1 Zones de fonctionnement de l'éolienne.....	47
3.2.2 Discussion des stratégies de commande de l'éolienne.....	48
3.2.3 Commande par mode glissant d'ordre deux.....	53
3.2.3.1 Description de la commande par mode glissant d'ordre 2.....	53
3.2.3.2 Conception des contrôleurs supertwisting.....	54
<b>3.3 Commande de la machine asynchrone.....</b>	<b>56</b>
3.3.1 Principe de la commande vectorielle.....	56
3.3.2 Conception des contrôleurs de la MAS.....	59

---

3.3.2.1 Régulation du couple.....	60
3.3.2.2 Régulation du flux.....	62
3.3.3 Commande en tension de la MAS.....	63
3.3.3.1 Calcul des régulateurs.....	64
<b>3.4 Méthode d'optimisation du système de dessalement.....</b>	<b>65</b>
3.4.1 Optimisation par algorithmes génétiques.....	67
3.4.1.1 Présentation des algorithmes génétiques.....	67
3.4.1.2 Génération du flux optimal par algorithmes génétiques.....	74
<b>3.5 Conclusion.....</b>	<b>74</b>
 <b>CHAPITRE IV : Simulation Numérique et Interprétation des Résultats</b>	
<b>4.1 Introduction.....</b>	<b>76</b>
<b>4.2 Résultats de simulation du système pour un vent moyen.....</b>	<b>76</b>
4.2.1 Résultats de simulation de l'aérogénérateur.....	77
4.2.2 Résultats de simulation du moteur asynchrone.....	81
4.2.3 Résultats de simulation de la pompe et le module d'osmose inverse.....	87
<b>4.3 Conclusion.....</b>	<b>92</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>93</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>94</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>98</b>

## Introduction générale

L'eau est abondante sur terre, elle représente 1380 millions de km<sup>3</sup>. L'essentiel toutefois est constitué d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %) inutilisables directement. L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,07 % de la ressource totale soit environ un million de km<sup>3</sup>. Mais la répartition de cette eau est très inégale. En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce et vingt-neuf autres principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce. Dans ces pays, selon le Water Resources Institute, 250 millions d'individus, ne disposent pas aujourd'hui du minimum vital d'eau défini à 1000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. 400 millions de personnes vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. Et on estime que 2,5 milliards de personnes pourraient souffrir du manque d'eau en 2050 compte-tenu de l'évolution de la démographie et de l'augmentation des consommations d'eau.

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de nombreuses années. Mais leur coût limite souvent leur utilisation. Cependant dans les dernières années, la capacité des usines de dessalement s'est fortement accrue et les coûts de production par m<sup>3</sup> ont connu une forte diminution.[VIV 03 ].

La plupart des procédés de dessalement utilisent pour leur fonctionnement l'énergie thermique ou électrique. Cependant la hausse des prix des énergies stock comme le pétrole et l'épuisement de ses sources ont conduit à un effort mondial dans la recherche pour l'intégration des technologies d'énergie renouvelable, comme l'éolienne, solaire, marémotrice et géothermique avec les technologies de dessalement. C'est parce que la hausse des prix de l'énergie influe directement sur le prix de l'eau produite. Il est incontestable donc que les énergies renouvelables peuvent fournir une alternative d'approvisionnement en énergie fiable pour le dessalement de l'eau.

Dans ce contexte, notre étude consiste à proposer un système de dessalement autonome alimentée par une source d'énergie renouvelable en envisageant des stratégies de commande adéquates permettant une optimisation en énergie afin d'améliorer la production de l'eau douce. Ainsi notre thèse se présente comme suit:

Dans le premier chapitre, nous présentons les principales technologies de dessalement des eaux et l'intégration des énergies renouvelables comme source pour ces procédés dans la littérature. Une attention à l'énergie éolienne est donnée et qui sera l'objet de notre étude dans cette thèse.

Dans le second chapitre, la configuration du système de dessalement autonome est présentée ainsi que la modélisation de ses différentes parties. Les modèles de la turbine éolienne, la machine synchrone, les convertisseurs, la machine asynchrone, le bus continu et l'unité d'osmose inverse formée par la pompe et la membrane seront détaillés.

Dans le troisième chapitre, les stratégies de commande adoptées pour commander les machines et les convertisseurs sont décrites. Nous abordons d'abord la commande de la turbine éolienne basée sur la poursuite du point de puissance maximale(MPPT) et du générateur synchrone à aimants permanents basée sur une commande vectorielle. Ensuite nous présentons la commande du bus continu et le moteur asynchrone qui a pour rôle l'entraînement de la pompe qui alimente l'unité de dessalement. Notre choix s'oriente vers la maximisation de la puissance générée par la turbine et assurer le transfert de cette puissance vers le moteur par un contrôle en couple. Le problème d'optimisation est formulé et la méthode basée sur les algorithmes génétiques qui fait l'objet de notre choix est présentée. Les fondements de cette méthode sont explicités.

Le quatrième paragraphe est consacré à la présentation des résultats de simulation par l'outil MATLAB/SIMULINK des performances et la robustesse des stratégies de commande des différentes parties de notre système de dessalement. Les résultats sont discutés et commentés.

Une conclusion des travaux présentés dans cette thèse est formulée avec la perspective d'améliorer ses fondements.

## Chapitre I

Etat de l'art des procédés de  
dessalement associés aux énergies  
renouvelables

## 1.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, nous présenterons les différents procédés de dessalement employés actuellement pour la production de l'eau douce à partir de l'eau salée dont nous préciserons ses différentes caractéristiques. Une attention particulière est donnée au procédé d'osmose inverse. Le principe de fonctionnement et l'énergie requise pour chaque procédé sont explicités. Nous examinerons par la suite l'association de ces procédés de dessalement avec les sources d'énergie renouvelable dans la littérature afin d'arriver à une configuration d'un système de dessalement renouvelable.

## 1.2 Caractéristiques des eaux marines et saumâtres:

### 1.2.1 Les eaux marines:

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). La salinité moyenne des eaux des mers et océans est de  $35 \text{ g.L}^{-1}$  ( $27,2 \text{ g.L}^{-1}$  de NaCl,  $3,8 \text{ g.L}^{-1}$  de  $\text{MgCl}_2$ ,  $1,7 \text{ g.L}^{-1}$   $\text{MgSO}_4$ ,  $1,26 \text{ g.L}^{-1}$   $\text{CaSO}_4$ ,  $0,86 \text{ g.L}^{-1}$   $\text{K}_2\text{SO}_4$ ).

Cette salinité peut être différente dans le cas de mers fermées :

- mer Méditerranée :  $36$  à  $39 \text{ g.L}^{-1}$ ,
- mer Rouge : environ  $40 \text{ g.L}^{-1}$ ,
- mer Caspienne :  $13 \text{ g.L}^{-1}$ ,
- mer Morte :  $270 \text{ g.L}^{-1}$ ,
- Golfe Arabo-Persique :  $36$  à  $39 \text{ g.L}^{-1}$ .

Le pH moyen des eaux de mer varie entre  $7,5$  et  $8,4$  : l'eau de mer est un milieu légèrement basique.

### 1.2.2 Les eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre  $2$  et  $10 \text{ g}$  de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition

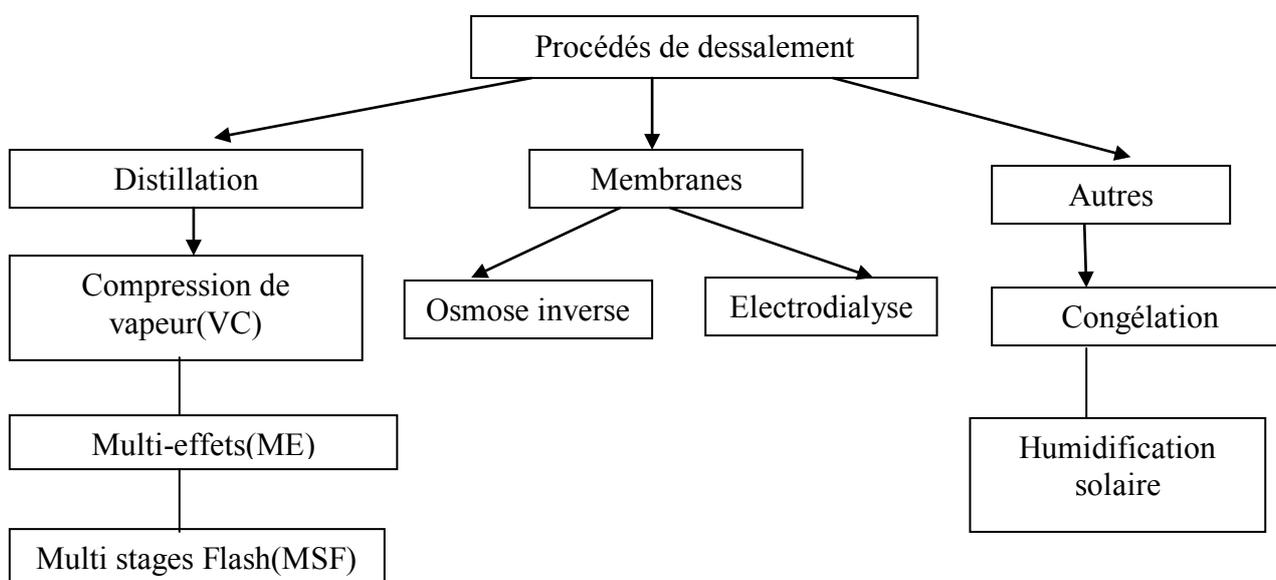
dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le  $\text{CaCO}_3$ , le  $\text{CaSO}_4$ , le  $\text{MgCO}_3$  et le  $\text{NaCl}$ .

### 1.3 Les principales technologies de dessalement des eaux

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué :

- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases : la congélation et la distillation.
- Les procédés utilisant des membranes: l'osmose inverse et l'électrodialyse.

La figure suivante résume les différents procédés de dessalement [ALS 98].



**Figure 1.1 Classification des différents procédés de dessalement**

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent [ADI 08].

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes :

- une prise d'eau de mer ou saumâtre avec une pompe et une filtration grossière,
- un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,
- le procédé de dessalement lui-même,
- le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau produite.

A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre.

### **1.3.1 L'osmose inverse**

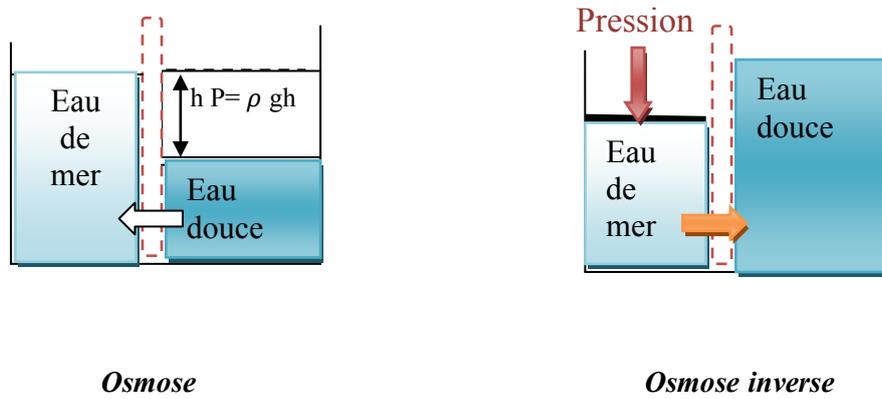
L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de  $10^{-7}$  mm de taille.

L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression.

#### **1.3.1.1 Principe de l'osmose inverse**

On appelle osmose le transfert de solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration.

La figure 1.2 représente le phénomène d'osmose qui se traduit par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée à travers une membrane semi-perméable. La pression exercée sur la solution concentrée qui annulerait ce flux est appelée pression osmotique.



**Figure 1.2 Principe de l'osmose et de l'osmose inverse**

Une augmentation de la pression au delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse.

Pour les solutions suffisamment diluées, la pression osmotique notée  $\pi$  peut être calculée d'après la loi de van'tHoff [TAN 09]:

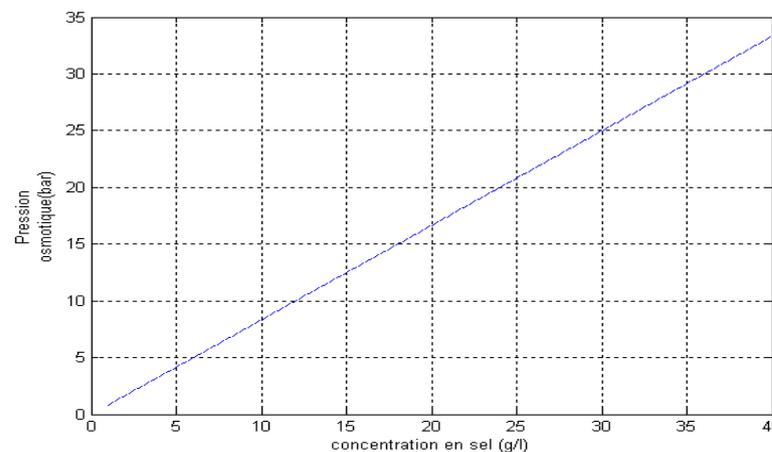
$$\pi = i \times C \times R_g \times T \tag{1-1}$$

Où : -i est le nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte,

-C est la concentration en sels en mol.m<sup>-3</sup>

-R<sub>g</sub> est la constante des gaz parfaits R<sub>g</sub> = 8,314 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

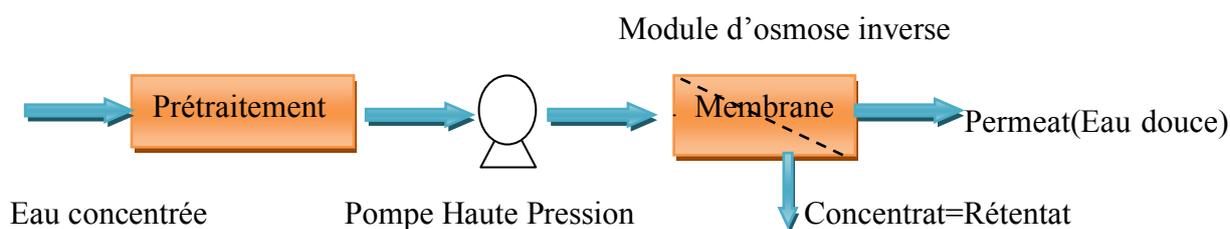
-T est la température absolue de la solution en Kelvin.



**Figure 1.3 La pression osmotique d'une eau à 20°C en fonction de la concentration**

### 1.3.1.2 Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse

Les éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse sont schématisés sur la figure 1.4.



*Figure 1.4. Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse*

Le dessalement par osmose inverse nécessite d'abord un prétraitement très poussé de l'eau de mer pour éviter le dépôt de matières en suspension sur les membranes qui conduirait très rapidement à une diminution des débits produits.

Il est nécessaire de retenir toutes les particules de dimension supérieure à 10 à 50  $\mu\text{m}$  selon le type de module d'osmose inverse. Ceci est réalisé à l'aide d'une préfiltration grossière puis d'une filtration sur sable pour éliminer les matières en suspension les plus grosses. Puis un traitement biocide et une acidification sont nécessaires pour éviter le développement de microorganismes sur la membrane et éviter la précipitation de carbonates. Enfin une filtration sur cartouches permet de retenir les particules de taille de l'ordre de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  qui n'ont pas été retenues par le filtre à sable.

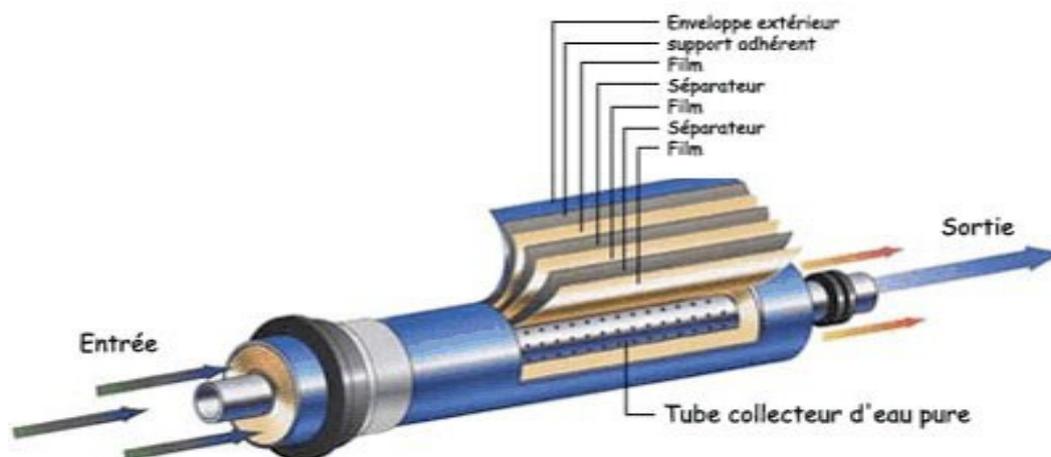
La pompe haute pression permet ensuite d'injecter l'eau de mer dans le module d'osmose inverse dans lequel se trouvent les membranes.

### 1.3.1.3 Description de la membrane RO

Les quatre types de modules disponibles dans le commerce RO sont tubulaires, plaque et cadre, enroulé en spirale et en fibres creuses. Les unités en spirale ont été favorisées en raison de leur utilisation généralisée, de faible coût et de disponibilité facile à partir d'un certain nombre de fabricants [TOM 03].

Un module enroulé en spirale est un sandwich de couches de la membrane et de la couche d'espacement enroulés autour d'un tube de collecte de l'eau produite (eau dessalée) (figure 1.5). Les couches sont collées sur les bords, à l'exception de l'extrémité du tube de produit, qui est relié à une ouverture sur le tube. Comme la solution d'alimentation est pompée

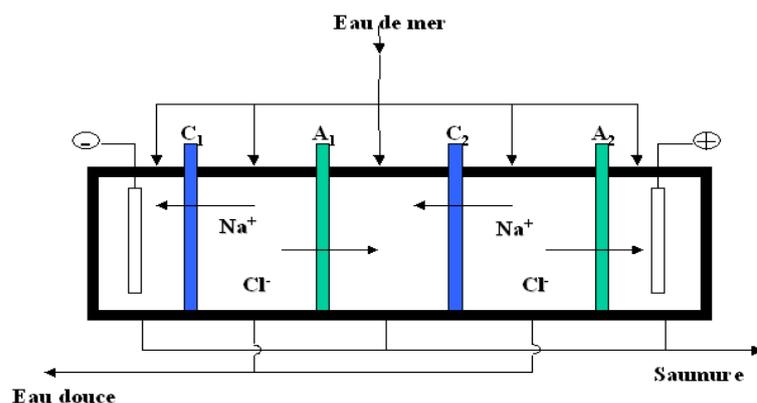
à travers le module, à haute pression à travers l'une de ses extrémités, le solvant traverse la membrane, dont la plupart des blocs rejette du soluté. Le solvant dans la zone de la couche d'espacement, se diffuse dans le tube collecteur, par lequel il quitte le module comme perméat. La solution d'alimentation, maintenant avec une concentration élevée du soluté passe à travers la sortie (l'extrémité opposée du module) comme rétentat.



*Figure 1.5 Membrane en spirale*

### 1.3.2 L'électrodialyse (ED)

L'électrodialyse est un procédé électrochimique qui permet d'extraire les ions contenus dans une solution. L'extraction des ions se fait par migration des ions à travers des membranes sélectives (anioniques ou cationiques) sous l'action d'un champ électrique. Ainsi seuls les anions peuvent traverser une membrane anionique et seuls les cations peuvent traverser une membrane cationique. En plaçant plusieurs membranes en parallèle laissant passer alternativement les ions positifs et les ions négatifs, on peut éliminer certains ions de l'eau. Dans certains compartiments, il y a concentration des ions et dans d'autres les ions sont éliminés. Les particules qui ne portent pas de charge électrique ne sont pas éliminées. L'électrodialyse est utilisée pour le dessalement d'eau de mer comme le montre le schéma ci-dessous (figure 1.6). Sous l'effet d'un courant appliqué dans les bacs externes les ions  $\text{Na}^+$  sont attirés vers l'électrode négative et les ions  $\text{Cl}^-$  vers l'électrode positive. En fin de chaîne de traitement l'on récupère à la fois de l'eau douce et de la saumure.



*Figure 1.6 Schéma de principe de l'électrodialyse*

### 1.3.3 Les procédés de distillation

Dans les procédés de distillation, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de condenser cette vapeur pour obtenir de l'eau douce liquide.

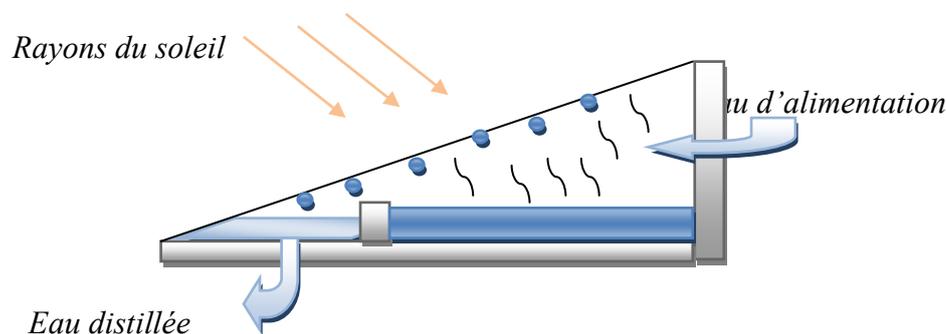
Deux procédés se partagent le marché du dessalement thermique : le procédé de distillation à décharges étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF) et le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED) par rapport aux autres procédés de distillation que nous présenterons par la suite

L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. [VIV 03]. Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

#### 1.3.3.1 Distillation solaire directe (SD)

La méthode de dessalement solaire direct est principalement adaptée pour les systèmes de petite production tels que des alambics solaires, dans les régions où la demande d'eau douce est inférieure à 200 m<sup>3</sup>/jour [LIN 03]. Ce faible taux de production s'explique par la faible température de fonctionnement et de la pression de la vapeur. Le distillateur solaire peut être décrit comme un bassin avec un couvercle transparent de verre contenant à l'intérieur de l'eau de mer et de l'air. Lorsque l'eau de mer est chauffée par le rayonnement solaire, elle commence à s'évaporer et la vapeur formée se mélange avec l'air au dessus de la surface de l'eau. Lors de la rencontre à l'intérieur du plafond de verre de l'alambic,

la vapeur se condense sur le verre. Si le couvercle en verre est incliné, les gouttes de condensation formées commenceront à couler sur le couvercle en verre vers le bas sous la force de gravitation, et peuvent alors être collectées sur le côté de l'alambic (figure. 1.7).



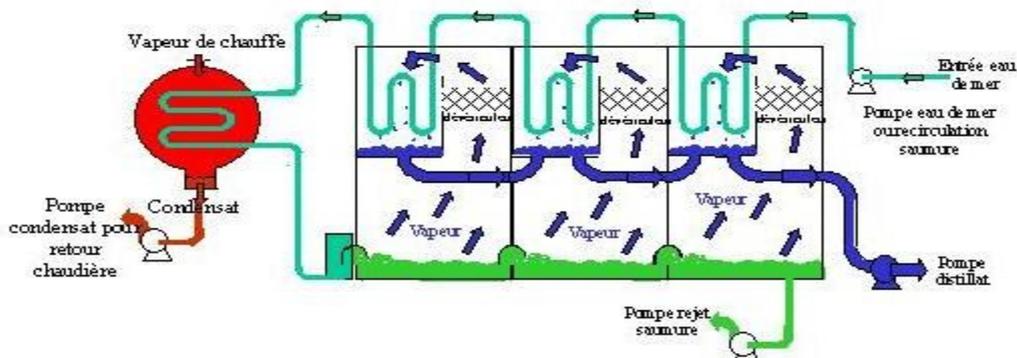
**Figure 1.7** Schéma de principe d'un distillateur solaire

### 1.3.3.2 Le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF).

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de  $120^{\circ}\text{C}$ , elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore (figure 1.8) puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle.

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière, cette énergie peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur basse pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique. Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer.

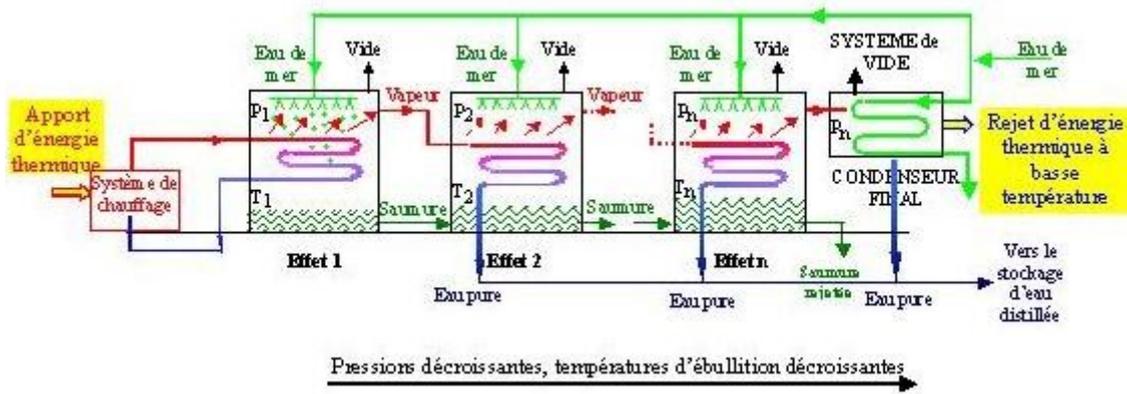
Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de  $m^3$  d'eau dessalée par jour.



*Figure 1.8. Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF)*

### 1.3.3.3 Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1<sup>er</sup> effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2<sup>ème</sup> effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2<sup>ème</sup> effet et ainsi de suite (figure 1.9). Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/ $m^3$  d'eau douce produite).

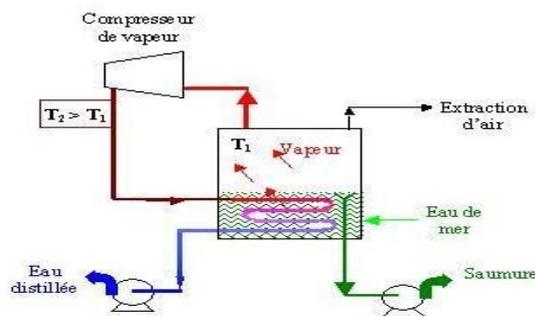


**Figure 1.9** Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED).

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière produisant le fluide de chauffage pour le premier effet.

### 1.3.3.4 Procédé de compression de vapeur (VC)

Afin de limiter la consommation d'énergie thermique, il est aussi possible d'utiliser la compression mécanique de vapeur. Ceci est possible dans le cas de l'évaporation simple ou multiple effet. La vapeur produite dans le dernier effet ou dans l'effet unique (pour de petites unités) est aspirée par un compresseur. Après compression, la température de saturation de la vapeur haute pression est augmentée. Cette vapeur peut donc être utilisée (elle est envoyée dans les tubes du faisceau tubulaire) pour porter à ébullition l'eau de mer dans l'évaporateur où règne une pression plus faible. La vapeur haute pression est ainsi condensée et se transforme en eau distillée liquide et le cycle se reproduit avec la vapeur produite par l'évaporation partielle de l'eau de mer. (figure 1.10).



**Figure 1.10** Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur

### 1.3.3.5 Procédé d'humidification-déshumidification (HD)

IL s'agit d'un système de dessalement avec un cycle d'air ouvert, dans lequel l'eau de mer est chauffée par le soleil dans un collecteur puis pulvérisée sur le mur de l'humidificateur (Figure. 1.11). De l'air est soufflé à travers l'humidificateur, où il ressort chaud et humide. Il est ensuite canalisé vers la section de condensation, où il est refroidi. L'eau douce est ensuite stockée dans un réservoir.

Les constructions sont généralement légers et peu coûteux, et peuvent travailler à la pression atmosphérique [BOU 01]. Cependant en raison de la capacité de dessalement relativement faible, les performances du système doivent être améliorées avant qu'il puisse être économiquement compétitif.

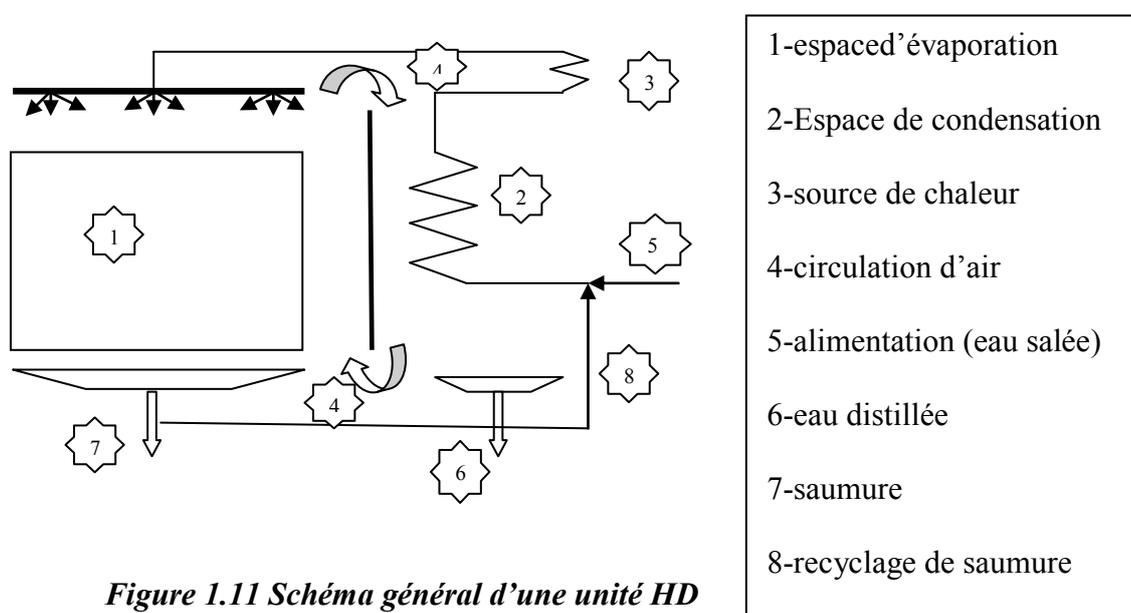


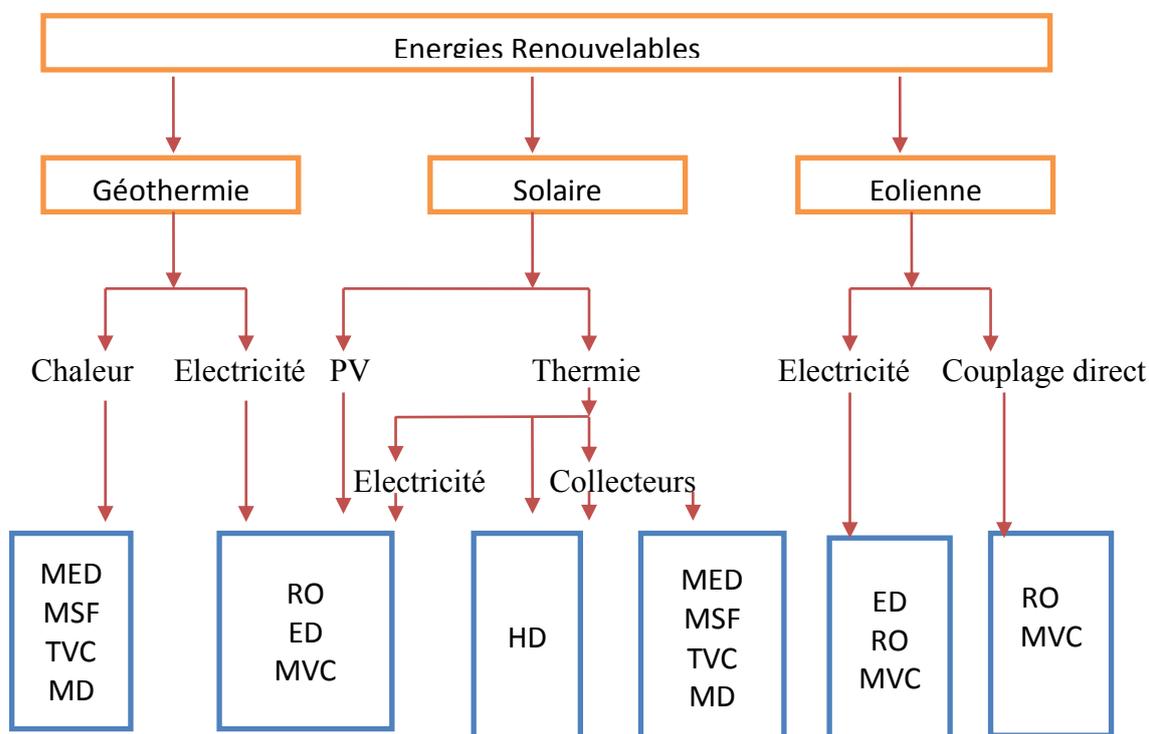
Figure 1.11 Schéma général d'une unité HD

### 1.4 Systèmes de dessalement associés aux énergies renouvelables.

L'utilisation des sources d'énergie renouvelables, tels que le soleil (thermique et photovoltaïque) et le vent, dans les systèmes de dessalement autonomes ont été largement discutés [MIR 01] [THO 03] [TUR 08][ WEI 11]. En outre, les sources marémotrice et géothermique ont également été considérées [HAN 94] de même que les piles à combustibles et la bioénergie [DAW 10]. Le dessalement est considéré comme une application particulièrement prometteuse qui implique de vastes champs d'étude. Cela a conduit à proposer un bon nombre de solutions dans ces applications. Même si l'on se concentre sur une

source d'énergie renouvelable et une méthode particulière de dessalement, il y a peut-être encore beaucoup d'options disponibles en fonction de la configuration du système final.

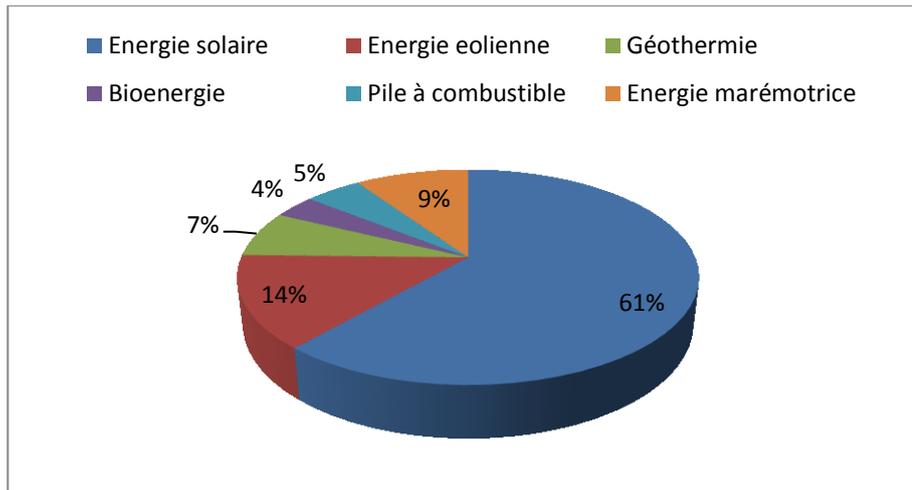
La figure 1.12 illustre les combinaisons techniquement possibles des sources d'énergies renouvelables et des techniques de dessalement les plus employées.



**Figure 1.12 Représentation de quelques combinaisons possibles des sources d'énergies renouvelables et les procédés de dessalement.**

L'énergie solaire et l'énergie éolienne sont les sources d'énergies renouvelables qui connaissent un grand essor dans cette association avec les procédés de dessalement. Les choix s'orientent vers l'utilisation des procédés de distillation avec la thermie et les méthodes membranaires avec les systèmes de conversion électromécanique. Toutefois les membranes d'osmose inverse sont les plus favorisées dans les systèmes de dessalement renouvelables suivi des procédés MED et MSF [MAT 07].

La figure 1.13 illustre la tendance des recherches dans les publications durant les trente dernières années concernant les énergies renouvelables utilisées avec les procédés de dessalement [DAW 10].



*Figure 1.13 publications (1980-2010) sur le dessalement par les énergies renouvelables*

Toutefois, il est nécessaire de souligner qu'il y a quelques facteurs qui limitent l'intégration de toutes les sources des énergies renouvelables dans les applications du dessalement. Le premier est l'imprévisibilité de la source renouvelable qui ne peut pas satisfaire la demande en eau douce à tout moment. Le second est que la plupart des technologies de dessalement ne sont pas adaptés pour un fonctionnement à puissance variable. D'autre part, la taille de l'installation intervient fortement comme critère décisif pour le choix de tel ou tel source d'énergie. Le tableau 1.1 ci-dessous montre les combinaisons des sources d'énergie renouvelable et les procédés de dessalement les plus convenables selon la puissance de production de l'installation de ces systèmes [MAT 07].

Eau d'alimentation	Eau produite	Source d'énergie	Dimension du système			Combinaison convenable
			Petit Grand	moyen		
			1-50m3/J	50-250m3/j		
Eau saumâtre	Distillée	solaire	X			Distillation solaire
	potable	solaire	X			PV-RO
	potable	solaire	X			PV-ED
	potable	éolienne	X	X		Eolien-RO
	Distillée	éolienne	X	X		Eolien-ED
Eau de mer	Distillée	solaire	X			Distillation solaire
	Distillée	solaire		x	X	Thermo solaire-MED
	potable	solaire			X	Thermo solaire-MED
	potable	solaire	X			PV-RO
	potable	solaire	X			PV-ED
	potable	éolienne	X	X		Eolien-RO
	potable	éolienne	X	X		Eolien-ED
	potable	éolienne		X	X	Eolien-MVC
	potable	géothermale		X	X	Géothermale-MED
potable	géothermale			X	Géothermale-MED	

**Tableau 1.1** *Combinaisons convenables des procédés de dessalement et des sources d'énergies renouvelables*

### 1.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé un état de l'art des procédés de dessalement associés aux énergies renouvelables. Cela nous permettra d'adopter une configuration d'un système de dessalement renouvelable qui sera présenté dans le chapitre suivant.

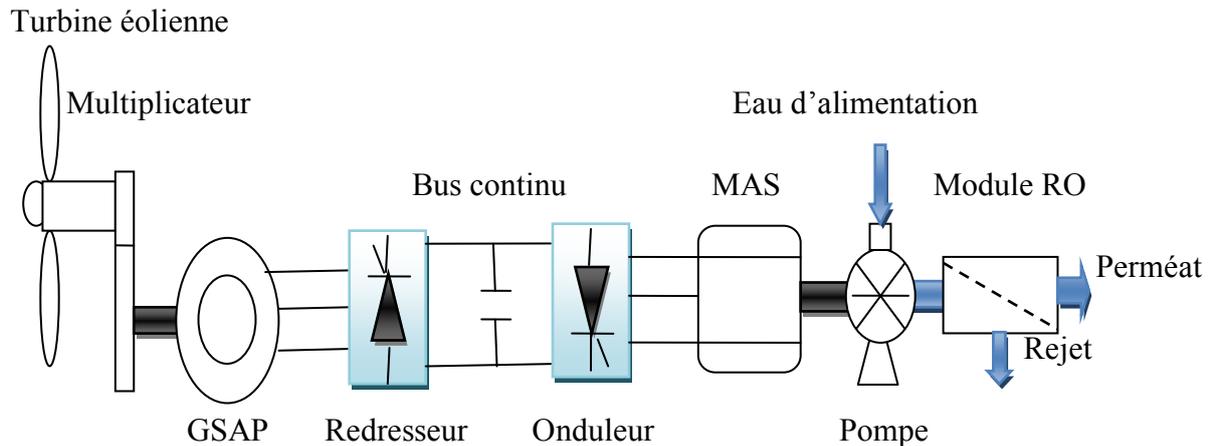
## 2.1 Introduction

Plusieurs combinaisons de systèmes de dessalement à énergie renouvelables existent mais certains seulement sont techniquement et économiquement réalisables. Ils dépendent de plusieurs facteurs tels que la disponibilité de ressource d'énergies renouvelables, la présence de stockage hydraulique et de la qualité d'eau à dessaler. En outre certains sont adaptés pour les installations de grande taille, tandis que d'autres sont utiles pour des installations de petite taille. Dans ce qui suit nous présenterons la configuration de notre système de dessalement renouvelable et la motivation pour notre choix. Les différentes parties du système seront modélisées tandis que les approches de commandes seront présentées dans le chapitre suivant.

## 2.2 Configuration du système de dessalement renouvelable

Pour notre système, l'énergie éolienne est choisie comme source d'alimentation pour une unité d'osmose inverse en considérant que la technologie éolienne est plus attrayante dans le court terme puisque la technologie est bien développée et économiquement très compétitive et que le procédé d'osmose inverse a gagné une importance considérable en raison des avantages qu'offre cette technologie par rapport aux techniques thermiques de dessalement. En effet, la flexibilité dans les dimensions des installations (RO), la consommation d'énergie réduite et l'amélioration dans les membranes les ont rendus des processus à rendement économique très compétitifs [ABB 05]. En outre, la nature des systèmes modulaires (RO) permet au processus de s'adapter facilement aux changements du climat lors de l'alimentation par des systèmes d'énergies renouvelables. L'implantation d'un tel système doit bien sûr se faire dans un site présentant un potentiel suffisant d'énergie éolienne.

Le système présenté dans la figure 2.1, a été proposé pour une unité de dessalement (BWRO) à petite échelle. Il est techniquement possible d'introduire une source d'énergie éolienne pour entraîner une unité d'osmose inverse (RO). Le système est autonome et sans stockage dans des batteries.



**Figure 2.1 Schéma représentatif du système de dessalement éolien**

Le système de dessalement renouvelable éolien se présente comme suit:

- a- Un générateur éolien de 2.2 KW composé d'une turbine éolienne entraînant une machine synchrone à aimant permanent fonctionnant en mode générateur. L'accouplement est assuré par le biais d'un multiplicateur qui a pour rôle l'augmentation de la vitesse de la GSAP.
- b- Un convertisseur à MLI (redresseur) formé de six interrupteurs permettant de redresser la tension à la sortie de la GSAP au bus continu.
- c- Un convertisseur MLI (onduleur) formé de six interrupteurs relié à l'autre côté du bus continu. Il a pour fonction de maintenir la tension au bus continu et assurer le fonctionnement de la machine à induction à la puissance maximale que peut fournir la turbine éolienne.
- d- un moteur asynchrone(MAS) d'une puissance de 2.2 KW alimenté par l'onduleur et qui sert à entraîner une pompe haute pression (HP).
- e- une pompe haute pression entraînée par la MAS qui alimentera le module d'osmose inverse en eau saumâtre.
- f- Un module d'osmose inverse(RO) formé d'une membrane en spirale.

Les paramètres des différents éléments qui composent le système sont présentés en Annexes

## 2.3 Modélisation de la turbine éolienne

### 2.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales non orientables et de longueur  $R_t$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{turbine}$  qui est relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure 2.2). [ELA 04], [DAV 05],[BEL 10],[CIM 05]

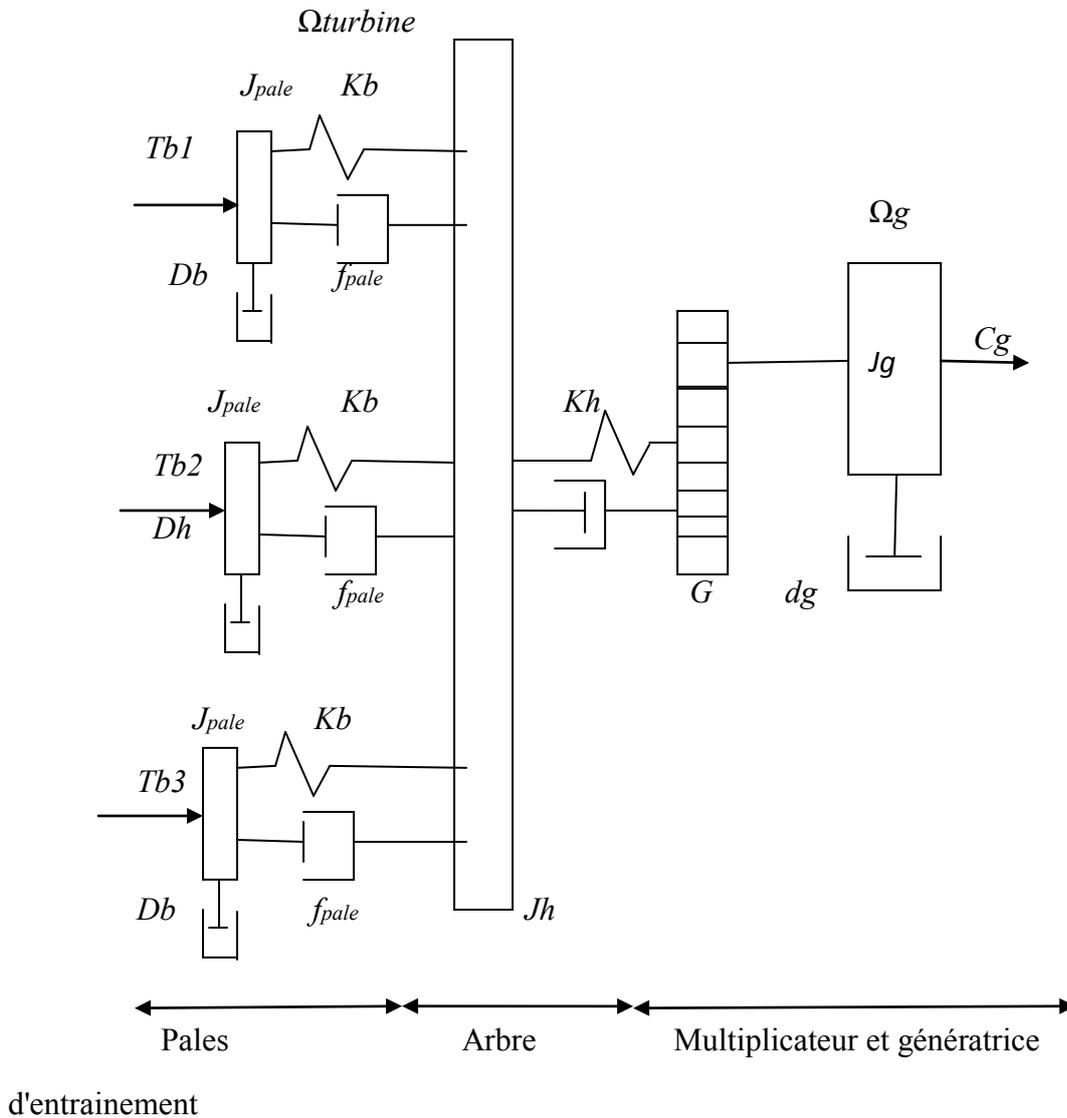


Figure 2.2 Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc:

- la même inertie  $J_{pale}$
- la même élasticité  $Kb$
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $db$

Ces pales présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ . Chaque pale reçoit une force  $Tb_1, Tb_2, Tb_3$  qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par:

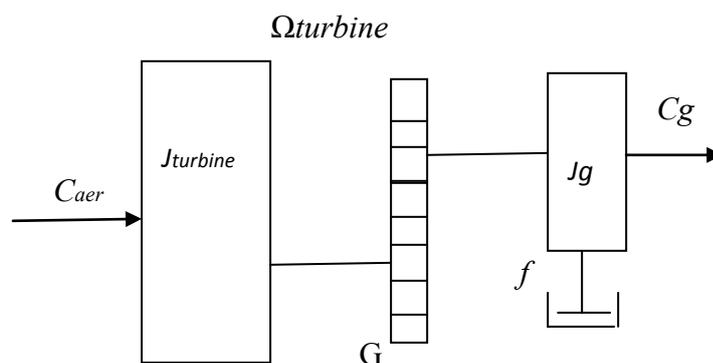
- son inertie  $J_h$ .
- son élasticité  $Kh$ .
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $Dh$ .

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie  $J_g$ .
- un coefficient de frottement  $dg$ .

Ce rotor transmet un couple entraînant ( $Cg$ ) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée  $\Omega_{mec}$ .

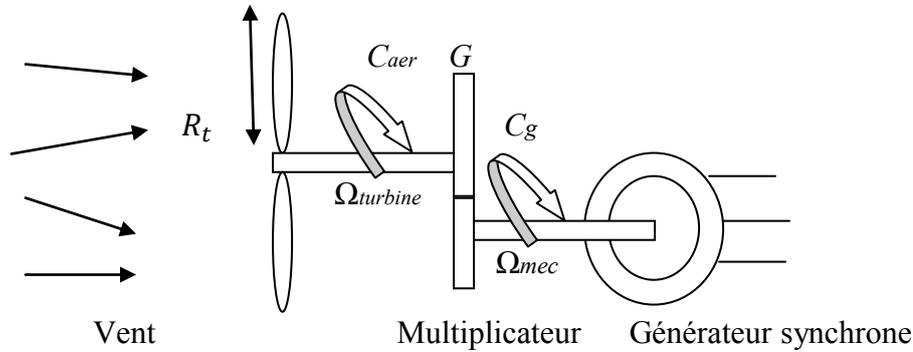
Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ( $Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$ ) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. A cause de la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air ( $db$ ) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure 2.3).



**Figure 2.3** Modèle mécanique simplifié de la turbine

### 2.3.2 Modélisation de la turbine

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R_t$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  (figure 2.4).



**Figure 2.4 – Schéma de la turbine éolienne**

La turbine éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique à partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  balayée par les pales de la turbine, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (2.1)$$

Où:

- $\rho$  représente la masse volumique de l'air (approx 1.23kg/m<sup>3</sup> à la pression atmosphérique à 15°C),

- $V$  la vitesse du vent (m/s),

- $S$  la surface utile traversée par le vent et a pour expression:

$$S = \pi R_t^2 \quad (2.2)$$

Où:

- $R_t$  représente le rayon de la pale (m).

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite spécifique (Ratio)  $\lambda$  qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit:

$$\lambda = R_t \times \frac{\Omega_{turbine}}{V} \quad (2.3)$$

Avec:

-  $\Omega_{turbine}$  la vitesse angulaire de rotation des pâles (rad/s).

En utilisant le coefficient de puissance  $C_p(\lambda)$ , la puissance aérodynamique est calculée ainsi:

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 V^3 C_p(\lambda) \quad (2.4)$$

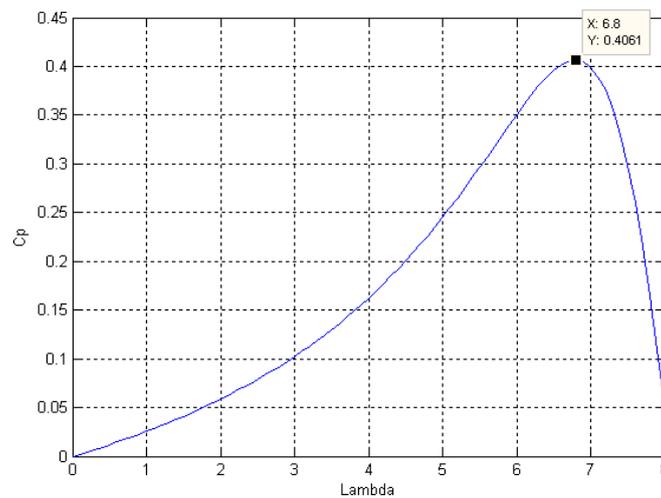
Le coefficient de puissance  $C_p(\lambda)$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Le coefficient  $C_p$  ne peut théoriquement pas dépasser la limite dite de Betz  $C_{p\_limite} = 0.59$  [POI 03] :

Une turbine est typiquement caractérisée par sa courbe  $C_p = f(\lambda)$

L'équation analytique de  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour une éolienne de petite puissance choisie pour notre application est la suivante [LOP 06]:

$$C_p(\lambda) = \frac{C_0 \lambda (\lambda_0 - \lambda)}{a_0^2 + (\lambda_0 - \lambda)^2} \quad (2.5)$$

La figure 2.5 représente le tracé de la caractéristique  $C_p(\lambda)$  où apparaît un maximum de 0.4061 pour une vitesse réduite de 6.8.



**Figure 2.5 - Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse de la turbine**

Le couple aérodynamique entraînant la génératrice s'écrit comme suit:

$$C_{aer} = P_{aer} / \Omega_{turbine} \quad (2.6)$$

En remplaçant (2.3) et (2.4) dans (2.6) on obtient:

$$C_{aer} = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 V^2 C_p(\lambda) / \lambda \quad (2.7)$$

### 2.3.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. C'est une sorte de boîte à vitesse qui a pour rôle l'augmentation de la vitesse de la génératrice afin qu'elle atteigne sa vitesse nominale (figure 2.4). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.8)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.9)$$

Où :  $C_g$  est couple appliqué au rotor du générateur synchrone.

$C_{aer}$  est le couple aérodynamique.

$\Omega_{turbine}$  est la vitesse de rotation de l'arbre de la turbine.

$\Omega_{mec}$  est la vitesse de rotation de l'arbre du générateur synchrone.

### 2.3.4 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.10)$$

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.11)$$

Où  $J$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_f$ , et le couple issu du multiplicateur  $C_g$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (2.12)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$ :

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.13)$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la (figure 2.6)

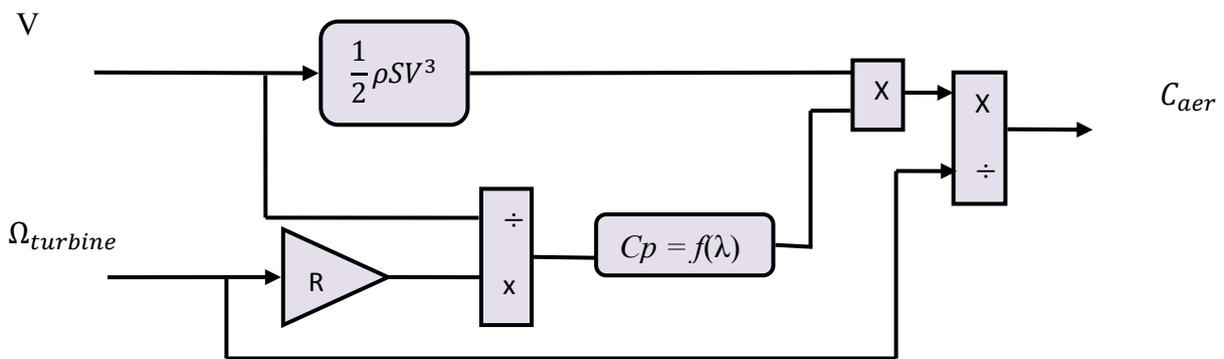


Figure 2.6 Schéma bloc du modèle de la turbine

## 2.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

### 2.4.1 Présentation de la machine synchrone.

Les machines synchrones en général, sont alimentées au stator par des enroulements triphasés et au rotor par une tension continue. Alimentée à fréquence constante, sa vitesse est synchrone avec le champ tournant et ne dépend que de la fréquence de l'alimentation et du nombre de pôles de la machine.

Au rotor, la bobine d'excitation peut être remplacée par des aimants permanents, la machine est dite alors machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ce type de machine possède un bon rendement puisque les pertes Joule sont localisées au stator. En

outre, la compacité du rotor conduit à un bon rapport couple/inertie, autorisant des accélérations élevées.

Inversement, lorsque l'arbre du rotor est entraîné à une certaine vitesse, le moteur fonctionne en mode générateur et génère des tensions triphasées au stator à une fréquence proportionnelle à la vitesse d'entraînement [SMI 00].

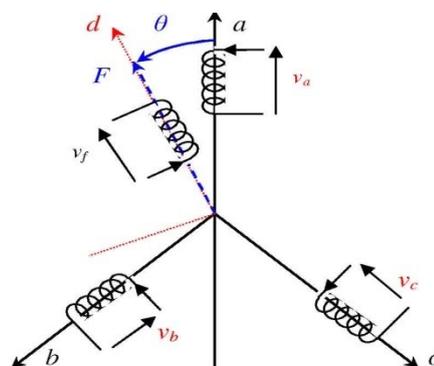
### 2.4.2 Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents, nous adopterons les hypothèses simplificatrices suivantes:

- Les équations de la machine sont établies en convention moteur.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encoche négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- On admet que la FMM créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

### 2.4.3 Mise en équation de la machine synchrone

Pour établir des relations simples entre les tensions d'alimentation du moteur et ses courants, nous considérons le modèle de la machine synchrone idéal suivant:



*Figure 2.7 Schéma de la machine synchrone dans le repère abc.*

A partir de la figure 2.7, nous écrivons les équations de la machine synchrone dans le repère fixe au stator, en notation matricielle :

○ **Expression des tensions statoriques**

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (2.14)$$

○ **Expression des flux statoriques**

$$[\varphi_s] = [L_{abc}] \cdot [i_s] + [\varphi_{sf}] \quad (2.15)$$

Où :

$$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^T \quad : \text{Vecteur tensions statoriques}$$

$$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad : \text{Vecteur courants statoriques}$$

$$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T \quad : \text{Vecteur flux statoriques}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad : \text{Matrice résistance du stator}$$

$$[L_{abc}] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad : \text{Matrice inductance du stator}$$

$$[\varphi_{sf}] = [\varphi_{af} \ \varphi_{bf} \ \varphi_{cf}] \quad : \text{Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique.}$$

### 2.4.3.1 Application de la transformation de *Park*

La transformation de *Park* est souvent appelée transformation à deux axes. Physiquement, l'application de cette transformation à la MSAP correspond à une transformation des trois bobines (statoriques) à deux bobines équivalentes reprenant les mêmes considérations ou aspects en termes de f.m.m, de flux, de couple ou du moins une image qui leur sera parfaitement proportionnelle [SMI 00].

On définit une matrice unique de transformation pour les courants, les tensions et les flux. Elle conserve l'invariance de la puissance et est orthogonale. De plus, on fait l'hypothèse que toutes les grandeurs homopolaires sont nulles. La transformation qui traduit ce passage du système triphasé (a, b, c) au système biphasé (d,q) est donnée par :

$$\begin{aligned}
 [V_{dq0}] &= [T][V_{abc}] \\
 [i_{dq0}] &= [T][i_{abc}] \\
 [\varphi_{dq0}] &= [T][\varphi_{abc}]
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

tel que :

$[T]$  : est la matrice de *Park* normalisée, définie par :

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}
 \tag{2.17}$$

### 2.4.3.2 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère lié au rotor

La figure 2.8 illustre la schématisation d'une machine synchrone à aimants permanents, biphasée, équivalente, issue de la transformation de *Park* [SMI 00].

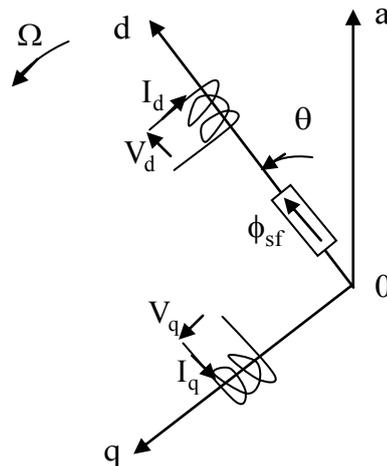


Figure 2.8 - Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q).

En reportant les transformations dans les expressions des flux et tensions, on obtient :

#### a-Expressions des tensions

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \dot{\varphi}_d - w\varphi_q
 \tag{2.18}$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \dot{\varphi}_q + w\varphi_d
 \tag{2.19}$$

Avec :  $w = P\Omega$  tel que  $w, P, \Omega$  sont respectivement la pulsation des courants statoriques, le nombre de paire de pôles et la vitesse de rotation du rotor.

### b-Expressions des flux

$$\begin{aligned}\varphi_d &= L_d I_{sd} + \varphi_{sf} \\ \varphi_q &= L_q I_{sq}\end{aligned}\quad (2.20)$$

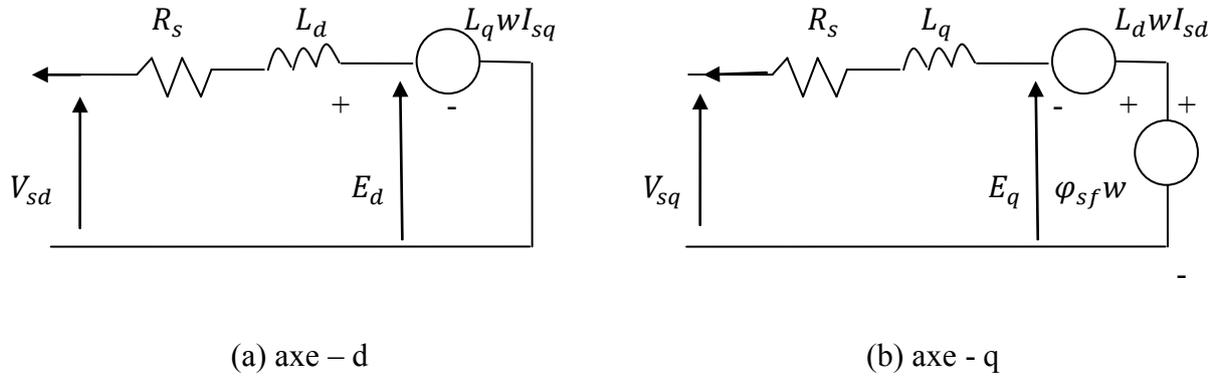
$\varphi_{sf}$  : Flux total dû aux aimants et qui se ferme sur le stator.

En rapportant les équations (2.20) dans les équations (2.18) et (2.19), nous obtenons:

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + L_d \frac{dI_{sd}}{dt} - L_q w I_{sq} \quad (2.21)$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + L_q \frac{dI_{sq}}{dt} + L_d w I_{sd} + \varphi_{sf} w \quad (2.22)$$

Le schéma équivalent de la MSAP en mode générateur sur l'axe d et l'axe q est représenté sur la figure 2.9



**Figure 2.9** Modèle équivalente de la GSAP sur l'axe d-q

Dans la figure 2.9  $E_d$  et  $E_q$  représentent les FEM produites de l'axe direct et en quadrature respectivement et qu'on peut exprimer par:

$$E_{ds} = -L_q w I_{sq} \quad (2.23)$$

$$E_{qs} = L_d w I_{sd} + \varphi_{sf} w \quad (2.24)$$

### c-Expression du couple électromagnétique

La puissance mécanique développée par la GSAP s'exprime par:

$$P_m = E_{sd}I_{sd} + E_{sq}I_{sq} \quad (2.25)$$

Le couple électromagnétique s'écrit comme suit:

$$C_{em} = \frac{P}{\omega} \cdot P_m \quad (2.26)$$

Des équation (2.23),(2.24),(2.25)et (2.26) ,le couple électromagnétique dans le référentiel (d,q) est donné par l'expression suivante:

$$C_{em} = P[(L_d - L_q)I_{sd}I_{sq} + \varphi_{sf}I_{sq}] \quad (2.27)$$

La GSAP considérée dans cette étude est à rotor lisse( $L_d = L_q = L_s$ ). Alors, l'expression du couple magnétique se réduit à :

$$C_e = P\varphi_{sf}I_{sq} \quad (2.28)$$

## 2.5 Modèle du convertisseur

Différents types de configurations de convertisseurs de puissance peuvent être utilisés pour les éoliennes fonctionnant à vitesse variables. L'une des solutions consiste à utiliser un redresseur tout diode suivie d'un hacheur commandé pour ramener la tension continu du bus continu à la tension désiré [VAL 08]. L'autre solution est le redresseur à thyristors à commande MLI. Nous proposons dans cette thèse la configuration de deux convertisseurs dos à dos à commande MLI (un redresseur en amont du bus continu et un onduleur en aval).La seule différence entre le redresseur et l'onduleur est la définition de signe de puissance [SIN 10].

La modélisation du convertisseur avec interrupteurs idéaux est tirée de [DAV 05] en considérant la Figure 2.10.

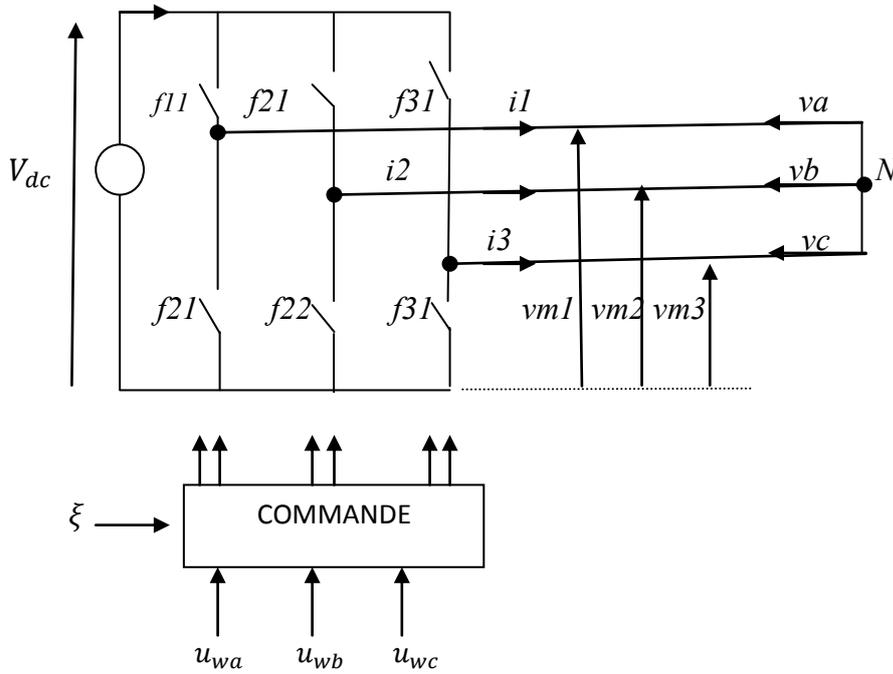


Figure 2.10 - structure du convertisseur MLI

$u_{wj}$  représente les signaux de commande ( $j= a, b$  ou  $c$ ) et  $\xi$  représente le signal triangulaire. On compare l'onde de modulation triangulaire  $\xi$  et les tensions de référence  $u_{wa}, u_{wb}$  et  $u_{wc}$  qui fixent les tensions  $V_{m1}, V_{m2}$  et  $V_{m3}$  définies à la Figure 2.10.

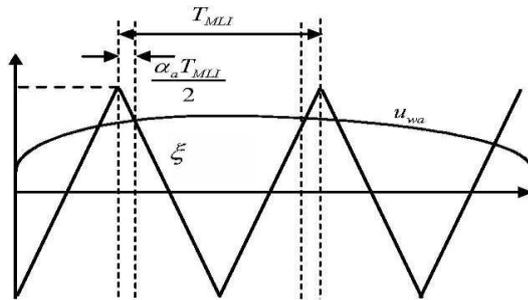


Figure 2.11 : Comparaison d'un signal triangulaire  $\xi$  et d'un signal sinusoïdal  $u_{wj}$

En supposant que le signal de référence  $u_{wa}$  varie peu durant une période MLI, c'est-à-dire que la période  $T_{MLI}$  de  $\xi(t)$  est très petite devant la période  $T$  du signal  $u_{wa}$  ( $f_{MLI} \gg f$ ), alors on peut calculer les tensions moyennes  $v_{m10}$  des tensions  $v_{mi}$ , (avec  $i = 1, 2$  ou  $3$ ) sur une période de la MLI :

$$V_{m10} = \frac{1}{T_{MLI/2}} \int_{\alpha_a T_{MLI/2}}^{T_{MLI/2}} V_{dc} dt = V_{dc} (1 - \alpha_a) \tag{2.29}$$

On confond la valeur moyenne  $v_{m10}$  avec le fondamentale de  $v_{mi}$  appelé  $v_{m1f}$ .  $v_{m10}$  est une discrétisation de  $v_{m1f}$ .

A partir de (2.29), on a:

$$\alpha_a = \left(1 - \frac{v_{m1f}}{V_{dc}}\right) \quad (2.30)$$

D'après la Figure 2.11 :

-Sachant que  $\alpha_a \in [0, 1]$  et que  $u_{wa} \in [-1, 1]$

-En conservant l'hypothèse que  $f_{MLI} \gg f$

-En considérant les deux premières intersections de la porteuse triangulaire avec le signal de référence  $u_{wa}(t)$  ;

-En considérant que la valeur de  $u_{wa}(t)$  ne varie pas entre ces deux intersections, on a:

$$\alpha_a = \frac{1}{2}(1 - u_{wa}) \quad (2.31)$$

En égalisant les relations (2.30) et (2.31), on obtient:

$$\begin{aligned} v_{m1f} &= \frac{1}{2}V_{dc}(1 + u_{wa}) \\ v_{m2f} &= \frac{1}{2}V_{dc}(1 + u_{wb}) \\ v_{m3f} &= \frac{1}{2}V_{dc}(1 + u_{wc}) \end{aligned} \quad (2.32)$$

En appliquant la loi des mailles et en considérant que  $v_{af} + v_{bf} + v_{cf} = 0$ , on obtient:

$$\begin{bmatrix} v_{af} \\ v_{bf} \\ v_{cf} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{m1f} \\ v_{m2f} \\ v_{m3f} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

En introduisant (2.32) dans les relations (2.33), on trouve:

$$\begin{bmatrix} v_{af} \\ v_{bf} \\ v_{cf} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} u_{wa} \\ u_{wb} \\ u_{wc} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

En appliquant la loi de conservation de la puissance aux deux côtés du convertisseur :

$$V_{dc}i_m = v_{af}i_{1f} + v_{2f}i_{2f} + v_{3f}i_{2f} \quad (2.35)$$

Par substitution de (2.34) dans (2.35), on obtient:

$$i_m = \frac{1}{2}(u_{wa}i_{1f} + u_{wb}i_{2f} + u_{wc}i_{2f}) \quad (2.36).$$

Soit sous la forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} v_{af} \\ v_{bf} \\ v_{cf} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} u_{wa} \\ u_{wb} \\ u_{wc} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$i_m = \frac{1}{2} [i_1 i_2 i_2] \begin{bmatrix} u_{wa} \\ u_{wb} \\ u_{wc} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

## 2.6 Modélisation du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif:

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_c \quad (2.39)$$

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur (figure 3.13) :

$$I_c = I_{dc} - I_s \quad (2.40)$$

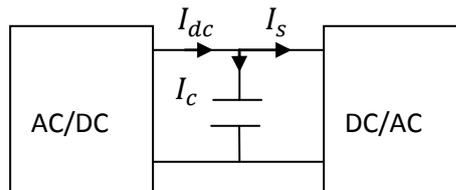


Figure 2.12 – Représentation du bus continu

La puissance du bus continu peut se déterminer comme suit:

$$P_{dc} = V_{dc}I_{dc} = V_d I_d + V_q I_q \quad (2.41)$$

Le courant continu généré par le redresseur MLI s'écrit comme suit:

$$I_{dc} = \frac{1}{V_{dc}} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (2.42)$$

## 2.7 Modélisation du moteur asynchrone

La machine à induction comme actionneur, est l'un des plus complexes à commander puisque le couple que développe cette machine dépend des courants évoluant dans la cage. Ces courants sont, par construction de la machine, inaccessibles.

Cette machine est un système complexe, non linéaire, avec un couplage entre les variables principales. Cette non linéarité et cette complexité des propriétés dynamiques du système exigent une commande complexe. Ceci nous conduit à chercher une commande aussi simple que possible, dans le but de commander notre machine de la même façon qu'un moteur à courant continu à excitation séparée avec un contrôle découplé du couple et du flux. Une des méthodes les plus utilisées et des plus performantes est la commande vectorielle par orientation du flux [LOU 04][BAG 99].

Pour simuler et commander la machine à partir des équations dynamiques, on se base sur certaines hypothèses simplificatrices :

- On ne considère que le premier harmonique d'espace de la distribution de la force magnétomotrice (structure sinusoïdale).
- On suppose le circuit magnétique parfaitement feuilleté : seuls les enroulements sont parcourus par des courants.
- Les variations des résistances  $R_s$  et  $R_r$  en fonction de la température sont très lentes à l'échelle des autres grandeurs

### 2.7.1 Modèle dynamique de la machine à induction

La figure (2.13) décrit les trois enroulements statoriques sur les axes statoriques (A,B,C), et les enroulements rotoriques qui représentent la cage sur les axes rotoriques (a,b,c).

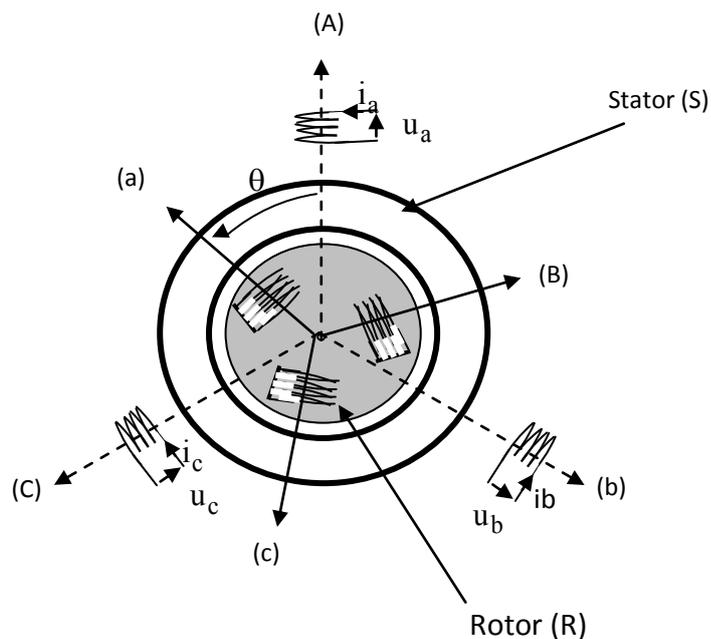


Figure 2.13 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

### 2.7.2 Equation de la machine à induction en régime linéaire

Les enroulements des trois phases statorique et rotorique dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué en figure (2.13). Les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles-mêmes.  $\theta$  est l'angle électrique entre l'axe de la phase statorique A et la phase rotorique a.

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$V = Ri + \frac{d\varphi}{dt} \tag{2.43}$$

Pour les 3 phases statoriques on résume cette écriture par l'écriture matricielle condensée :

$$[V_{ABCS}] = R_s [i_{ABCS}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{ABCS}] \tag{2.44}$$

La résistance statorique étant la même pour les 3 phases, il n'y pas lieu d'écrire une matrice de résistances.

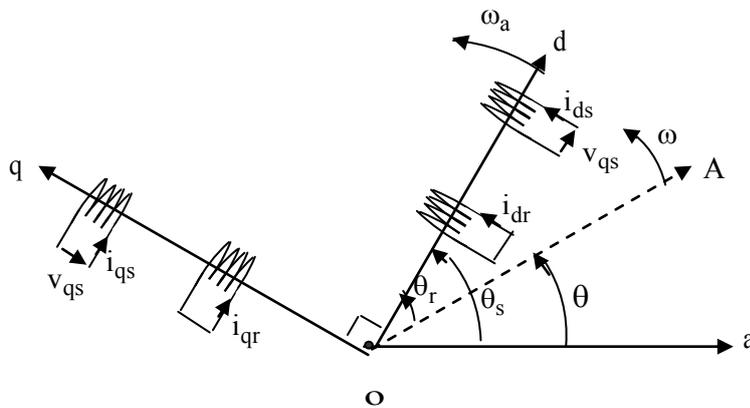
De même pour le rotor :

$$[V_{abcr}] = R_r [i_{abcr}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abcr}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.45}$$

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

### 2.7.3 Équations de la machine dans le plan Park

En appliquant la transformation de Park (équation 2.17), nous pouvons passer du système triphasé (abc) à un système diphasé (dq) en considérant la figure (2.14).



**Figure 2.14 Représentation schématique de la transformation des enroulements réels en enroulements équivalents (Transformation de Park)**

Les grandeurs statoriques dans le repère diphasé sont transformées de la façon suivante :

$$[X_{dq0}] = [T][X_{abc}] \quad (2.46)$$

Le passage inverse s'effectue ainsi :

$$[X_{dq0}] = [T]^{-1}[X_{abc}] \quad (2.47)$$

Tel que:

X : peut être la tension, le courant ou le flux.

[T] : est la matrice de transformation directe de Park.

[T]<sup>-1</sup>: est la matrice de transformation inverse de Park.

Les équations des tensions deviennent :

$$[v_{dqs}] = [T][v_{ABC}] \quad (2.48)$$

$$[v_{dqr}] = [T][v_{abc}] \quad (2.49)$$

Cependant, c'est au niveau de l'écriture des flux que ça devient intéressant :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{dqs} \\ \varphi_{dqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dqs} \\ i_{dqr} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

En effet, les sous matrices sont maintenant diagonales et ne dépendent plus de  $\theta$  (l'angle électrique entre le stator et le rotor).

Le système matriciel peut également être écrit sous la forme suivante :

Pour les flux :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = M i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \varphi_{qr} = M i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (2.51)$$

Et les tensions :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (2.52)$$

A son tour le couple électromagnétique s'exprime par :

$$C_e = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \quad (2.53)$$

L'équation mécanique s'écrit:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - C_f \quad (2.54)$$

Avec:

$J$  : Moment d'inertie

$C_r$  : Couple résistant

$C_f$  : Couple de frottement

Avec  $C_f = f\Omega_r$

### 2.7.4 Choix du référentiel

Jusqu'à présent, nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère  $dq$  qui fait un angle électrique  $\theta_s$  avec le stator et qui fait également un angle électrique  $\theta_r$  avec le rotor. Il existe trois choix importants. On peut fixer le repère  $dq$  au stator, au rotor ou au champ tournant. Rappelons que le repère  $dq$  est le repère mobile, c'est-à-dire qu'il nous appartient de calculer les angles des transformations de PARK  $\theta_s$  et  $\theta_r$  afin d'effectuer les rotations. On peut donc le lier à un référentiel mobile comme le champ tournant.

Le champ tournant est créé par le bobinage statorique qui tourne au synchronisme. Il est symbolisé par le vecteur flux statorique. Le vecteur champ tournant permet de donner une idée visuelle de la phase et du module d'amplitude du flux.

Le flux rotorique, quant à lui est représenté par un vecteur flux rotorique qui tourne également à la même vitesse, c'est-à-dire au synchronisme. En effet, c'est le rotor qui « glisse » par rapport au champ tournant. Mais en régime permanent, les deux flux statorique et rotorique tournent à la même vitesse au synchronisme [BAG 99].

#### 2.7.4.1 Référentiel lié au champ tournant

On se place dans un repère lié au champ tournant :

Notons que  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$  est la pulsation statorique. De même, nous noterons  $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$  la

pulsation rotorique et  $\omega = \omega_s - \omega_r = \frac{d\theta}{dt} = P\Omega$  la pulsation mécanique.

Nous pouvons alors écrire :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (2.55)$$

En manipulant les équations (2.55) et (2.51) on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_s \left( \sigma L_s i_{qs} + \frac{M}{L_r} \varphi_{qr} \right). \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_s \left[ \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} + \sigma L_s i_{ds} \right]. \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \varphi_{dr} + \omega_{sl} \varphi_{qr}. \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{qs} - \frac{1}{T_r} \varphi_{qr} - \omega_{sl} \varphi_{dr}. \end{cases} \quad (2.56)$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel, est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent.

## 2.8 Modélisation de la pompe haute pression (HP)

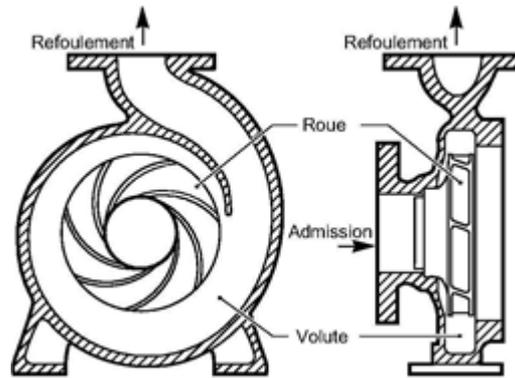
Les pompes centrifuges multi-étages ou multicellulaires conçues pour un fonctionnement à vitesse variable sont la technologie la plus utilisée dans les systèmes d'osmose inverse. Elles permettent de transformer la vitesse de rotation du moteur asynchrone en un débit d'eau à haute pression capable de vaincre la pression opposée due au phénomène de l'osmose.

Elles sont simples, à prix réduit et sont disponibles pour une large gamme de débit [ARR 07]. Dans la présente étude, le principe de base d'opération de la pompe centrifuge et le modèle mathématique sont développés pour décrire son comportement opérationnel.

### 2.8.1 Principe de fonctionnement et construction

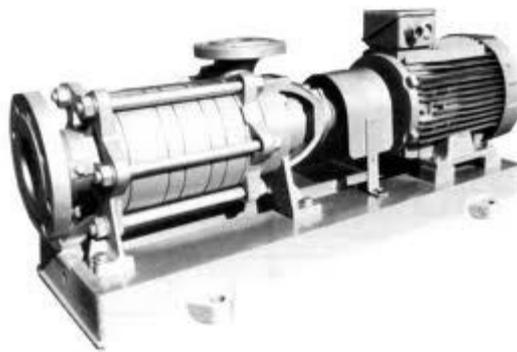
Le principe consiste à actionner une roue à ailettes qui communique au fluide de l'énergie mécanique, transformée en énergie potentielle (représentée par la pression) et cinétique (représentée par le débit). Sur la **figure 2.15** sont représentés les principaux constituants d'une pompe centrifuge simple à une seule roue :

- le corps de pompe comportant les tubulures d'admission et de refoulement.
- la roue à ailette solidaire de l'arbre d'entraînement



*Figure 2.15 : Les principaux constituants d'une pompe centrifuge*

Une augmentation de la pression peut être obtenue par mise en série de plusieurs corps de pompes. Un exemple de construction multicellulaire est représenté sur la **figure 2.16**.



*Figure 2.16 Pompe multicellulaire entraînée par un moteur asynchrone*

### 2.8.2 Caractéristiques fondamentales de la pompe

La fonction de base d'une pompe est de faire circuler une certaine quantité de fluide et de lui communiquer une certaine pression. Les grandeurs significatives utilisées en pompes sont le **débit**, et la **hauteur manométrique**. Le débit  $Q$  représente le volume de fluide transporté par unité de temps, exprimé en  $m^3/s$ . La hauteur manométrique ( $H$ ) représente la pression en un point donné du circuit, exprimée en hauteur de colonne du fluide transporté (en m). La relation entre hauteur manométrique et pression s'écrit comme suit :

$$P = \rho \cdot g \cdot H \quad (2.57)$$

Tel que :

$P$  : pression (Pa)

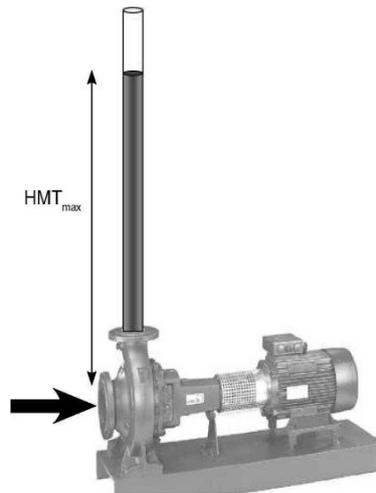
$\rho$ : masse volumique du fluide (kg/m<sup>3</sup>)

$g$ : accélération de la pesanteur (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$H$ : Hauteur manométrique (m)

**La hauteur manométrique Totale (HMT)** d'une pompe représente le différentiel de pression apporté au fluide par la pompe, entre l'entrée et la sortie, exprimé en hauteur de colonne de fluide transporté. La HMT varie en fonction du débit. La courbe représentant la HMT en fonction du débit est caractéristique de la pompe. Il existe une courbe de HMT pour chaque valeur de vitesse d'entraînement de la pompe.

**La hauteur manométrique totale maximale (HMT<sub>max</sub>) ou Hauteur de barbotage** est la pression maximale que la pompe peut communiquer au fluide, à débit nul. Ceci correspond à la hauteur maximale de colonne de fluide que la pompe peut maintenir, comme illustré sur la **figure 2.17**



**Figure 2.17 : Illustration : Hauteur manométrique totale maximale.**

### 2.8.2.1 Caractéristique Hauteur manométrique – Débit : $H(Q)$

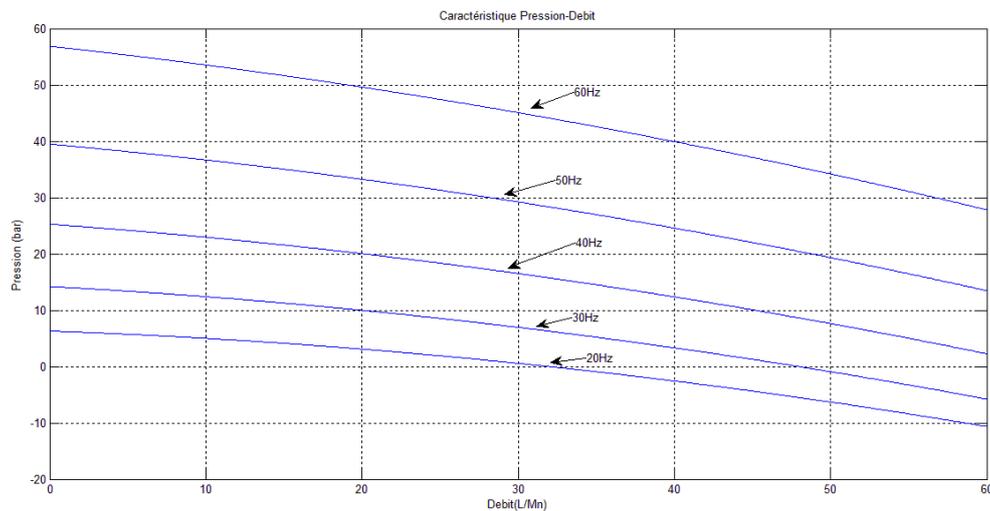
Les pompes sont généralement décrites par leurs caractéristiques  $H(Q)$ .  $H$  (en mètre), est la charge hydraulique appliquée par le fluide sur la roue à aubes et  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) est le débit de la pompe. La relation reliant la pression au débit et la vitesse de rotation de la pompe est exprimée par la relation "Pleiderer et Peterman" [TUR 09], [BET 03] ainsi:

$$P = a\Omega^2 + b\Omega Q + cQ^2 \quad (2.58)$$

Tel que :

- a et b sont les paramètres de la pompe.
- c est le paramètre correspondant aux pertes de la pompe.
- $\Omega$  est la vitesse de rotation de l'arbre de la pompe.(rd/s).
- $Q$  est le débit en m<sup>3</sup>/s.

Pour notre installation, nous avons choisi une pompe centrifuge d'une puissance de 1.8 kW dont les paramètres sont donnés en Annexe. La figure suivante illustre sa caractéristique Pression-débit pour différentes vitesses de rotation.



**Figure 2.18** Courbe caractéristique Pression-débit de la pompe HP pour différentes fréquences.

### 3.8.2.2 Caractéristique du couple

Le couple de la pompe centrifuge est de forme quadratique .il s'écrit ainsi [TUR 09]:

$$T_r = aQ^2 + bQ\Omega \quad (2.59)$$

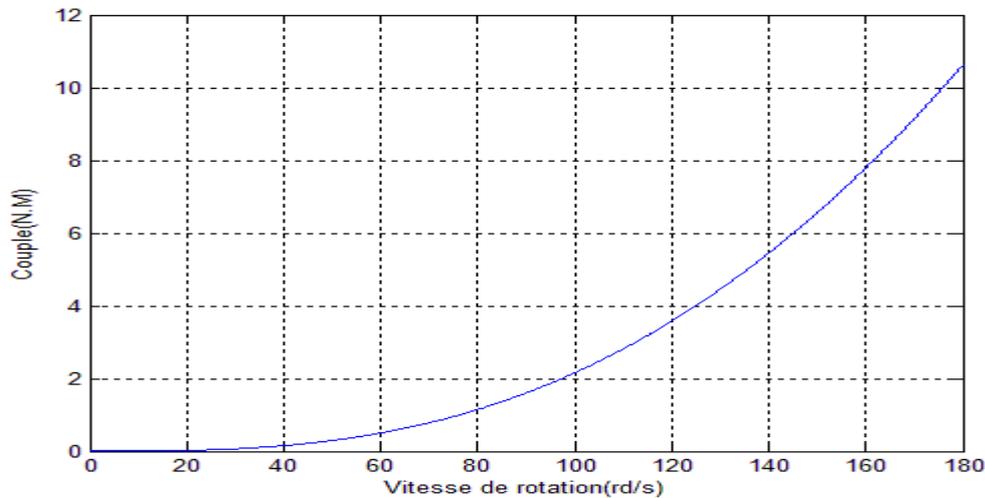
Où:

Q :débit.

$T_r$ : le couple statique.

$\Omega$  : la vitesse de rotation de l'arbre de la pompe

La figure 2.18 représente l'évolution du couple de la pompe en fonction de la vitesse de rotation



*Figure 2.19 Caractéristique du couple résistant de la pompe*

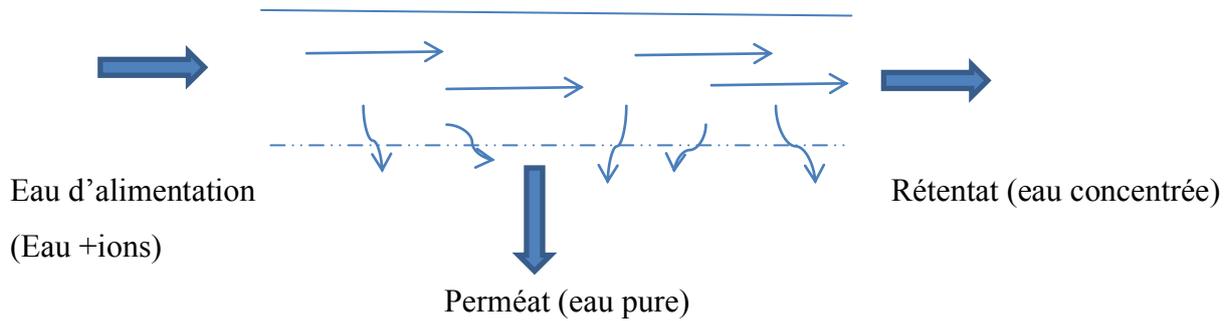
## 2.9 Modèle de la membrane d'osmose inverse

Il existe plusieurs modèles dans la littérature pour l'étude du comportement de la membrane lors de son fonctionnement [ABB 05]. Toutefois les deux grandes théories utilisées sont le modèle développé par Kimura et Sourirajan [SOU 75] qui tient compte des effets de convection à l'intérieur de la membrane et celui de Spiegler, Kedem et Katchalsky [SPI 66] qui ont utilisé une approche thermodynamique pour décrire le transport du solvant à l'intérieur de la membrane. On se contente du premier modèle qui sera présenté par la suite.

La membrane RO est une membrane semi perméable qui sépare le liquide sous le gradient de la pression. L'écoulement s'effectue en continu tangentiellement à la membrane à travers le film semi-perméable qui ne laisse passer que les molécules d'eau. Une partie de la solution à traiter (débit  $Q_f$ ) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes:

- Une partie (débit  $Q_p$ ) passe à travers la membrane (perméat)
- Une partie qui ne passe pas à travers la membrane (concentrat ou rétentat) et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane (figure 2.19).

Une grande partie de l'eau à dessaler sert au nettoyage de la membrane afin d'éviter son colmatage qui peut affecter le débit de l'eau produite.



**Figure 2.20 Diffusion de l'eau dans la membrane.**

Un facteur important dans le procédé d'osmose inverse c'est le taux de recouvrement de la membrane qui est le rapport du débit d'eau produite sur le débit d'eau d'alimentation défini par:

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (2.60)$$

Un second facteur qui n'est pas moins important que le premier c'est la sélectivité d'une membrane définie par le taux de rejet Y (ou taux de rétention) de l'espèce que la membrane est censée retenir:

$$Y = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2.61)$$

Avec  $C_p$  et  $C_f$  sont respectivement la concentration de l'eau produite et celle de l'eau d'alimentation.

Le modèle choisi fait intervenir la solution –diffusion modèle qui tient en compte les deux paramètres du solvant (l'eau) et le soluté (ions) à la fois à la couche de surface de la membrane et qui diffusent à travers la membrane et qui sont la perméabilité de la membrane à l'eau(A) et la perméabilité de la membrane au soluté(B).

Le débit massique du perméat à travers la membrane est défini par [SAS 10] [DJE 08] :

$$Q_p = J_w S_m \quad (2.62)$$

Avec  $Q_p$  le débit massique du perméat en  $K_g/s$ ,  $J_w$  le flux massique du perméat à travers la membrane en  $K_g \cdot m^{-2} s^{-1}$ ,  $J_s$  le flux massique des Sels à travers la membrane en  $K_g \cdot m^{-2} s^{-1}$  et  $S_m$  la surface active de la membrane en  $m^2$ .

Le bilan de masse de l'eau et des sels dans la membrane donne :

$$\begin{cases} Q_f = Q_p + Q_c \\ Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c \end{cases} \quad (2.63)$$

Avec  $Q$  débit massique,  $C$  concentration en  $K_g$  de sel par  $K_g$  d'eau et les indices  $\{f,p,c\}$  renvoient respectivement à l'alimentation (feed en Anglais), perméat et concentrat.

Le de flux de masse du perméat  $J_w$  à travers la membrane est modélisée par la loi de Fick:

$$J_w = A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (2.64)$$

Avec  $A$  la perméabilité de la membrane à l'eau en  $K_g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ ,  $\Delta P$  la pression transmembranaire exercée par la pompe en  $Pa$  et  $\Delta \pi$  la pression d'osmose en  $Pa$ .

Le flux de masse des Sels  $J_s$  à travers la membrane en tenant compte du phénomène de polarisation dû à la concentration élevée du solvant à la paroi de la membrane par rapport à la concentration à l'entrée et la sortie de la membrane est modélisée par :

$$J_s = B(C_w - C_p) \quad (2.65)$$

Avec  $B$  la perméabilité de la membrane aux Sels en  $K_g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ,  $C_w$  la concentration de la masse des Sels à la paroi de la membrane en  $K_g$  de sel par  $K_g$  d'eau et  $C_p$  la concentration en Sels du perméat en  $K_g$  de sel par  $K_g$  d'eau.

L'hypothèse est faite que le flux de masse du soluté est égal au flux de masse du perméat multiplié par la concentration en sels du perméat :

$$J_s = J_w C_p \quad (2.66)$$

La difficulté de ce modèle qui tient en compte le phénomène de la polarisation a imposé la recherche d'approximations moins complexes pour étudier le comportement statique et dynamique de ce modèle. L'une de ces approche est celle développée par FILMTEC [DOW 96] pour les membranes enroulées en spiral pour l'évaluation du facteur de polarisation basée sur les travaux Taylor et al [MIR 01]:

$$C_w - C_p = e^{k.R} \quad (2.67)$$

Avec,  $R$  le taux de recouvrement et  $k=0.7$  (une constante).

La pression transmembranaire en négligeant la pression due au perméat est définie par :

$$\Delta P = P - \frac{\Delta P_d}{2} \quad (2.68)$$

Tel que  $\Delta P_d$  représente la chute de pression le long du canal de la membrane et  $P$  la pression imposée par la pompe en  $Pa$ .

La chute de pression le long de la membrane est approximée par [SCH 01][DOW 96]:

$$\Delta P_d = \delta \left[ \frac{Q_f + Q_c}{2\rho} \right]^\tau \quad (2.69)$$

Avec :  $\delta = 9.5 \times 10^8$  et  $\tau = 1.7$

La pression osmotique peut être approximée par la relation suivante dérivée de la loi de Van'tHoff en considérant que le NaCl [MIR 01]:

$$\Delta \pi = K_{NaCl} (T_{NaCl} + 273) \frac{C_{NaCl}}{1000 - \frac{C_{NaCl}}{1000}} \quad (2.70)$$

Où :  $-C_{NaCl}$  est la concentration de l'eau à dessaler en sel (mg/l)

$-T_{NaCl}$  est la température de la solution concentrée (°C)

$-K_{NaCl}$  est la constante osmotique du NaCl ( $K_{NaCl} = 2.6545 \text{ bar.l/}^\circ\text{k.g}$ )

Le coefficient de perméabilité à l'eau tenant compte de la température et le facteur de colmatage peut s'écrire ainsi :

$$A = A_{ref} \cdot TCF \cdot FF \quad (2.71)$$

Avec  $A_{ref}$  le facteur de perméabilité de référence de la membrane donné par le constructeur,  $TCF$  le facteur de correction de la température et  $FF$  (*Fouling Factor*) le facteur de colmatage qui tient compte du dépôt de quelques sels sur les pores de la membrane et qui varie entre 100% pour une nouvelle membrane et 80% pour 4 ans de fonctionnement.

Le facteur de correction de température est exprimée par :

$$TCF = \exp \left( \frac{e}{R_g} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (2.71)$$

Avec  $T$  la température de l'eau en K,  $T_0$  la température de référence (298 K),  $R_g$  la constante des gaz parfaits ( $8.314 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) et  $e$  énergie d'activation de la membrane en  $\text{J.mol}^{-1}$  Approximée par la documentation technique de DOW par 25000 quand  $T < 298\text{K}$  et 22000 quand  $T > 298$  [DOW 96].

## 2.10 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une modélisation des différents constituants du système de dessalement éolien. Cette modélisation nous permettra de prédire les performances du système une fois que les approches de commande pour l'optimisation du système seront suggérées au chapitre suivant.

### 3.1 Introduction

Le but envisagé via la conception des lois de commande proposées vise :

- L'écoulement de toute la puissance générée par le système de conversion d'énergie éolienne vers l'unité d'osmose inverse.
- Assurer une permutation souple et fiable entre les modes de fonctionnement de la turbine (MPPT et régulation de puissance) en dépit des variations du vent.
- Optimisation du débit du perméat avec une concentration acceptable par une commande de l'actionneur asynchrone.

La figure 3.1 représente un schéma synoptique de la stratégie de commande du système de dessalement éolien. Au niveau de l'aérogénérateur, une méthode basée sur l'orientation du flux est utilisée pour asservir le couple en vue d'assurer un fonctionnement en mode (MPPT). Une commande vectorielle est appliquée au niveau de la machine asynchrone par la commande du couple afin d'assurer un transfert de toute la puissance capturée par l'aérogénérateur.

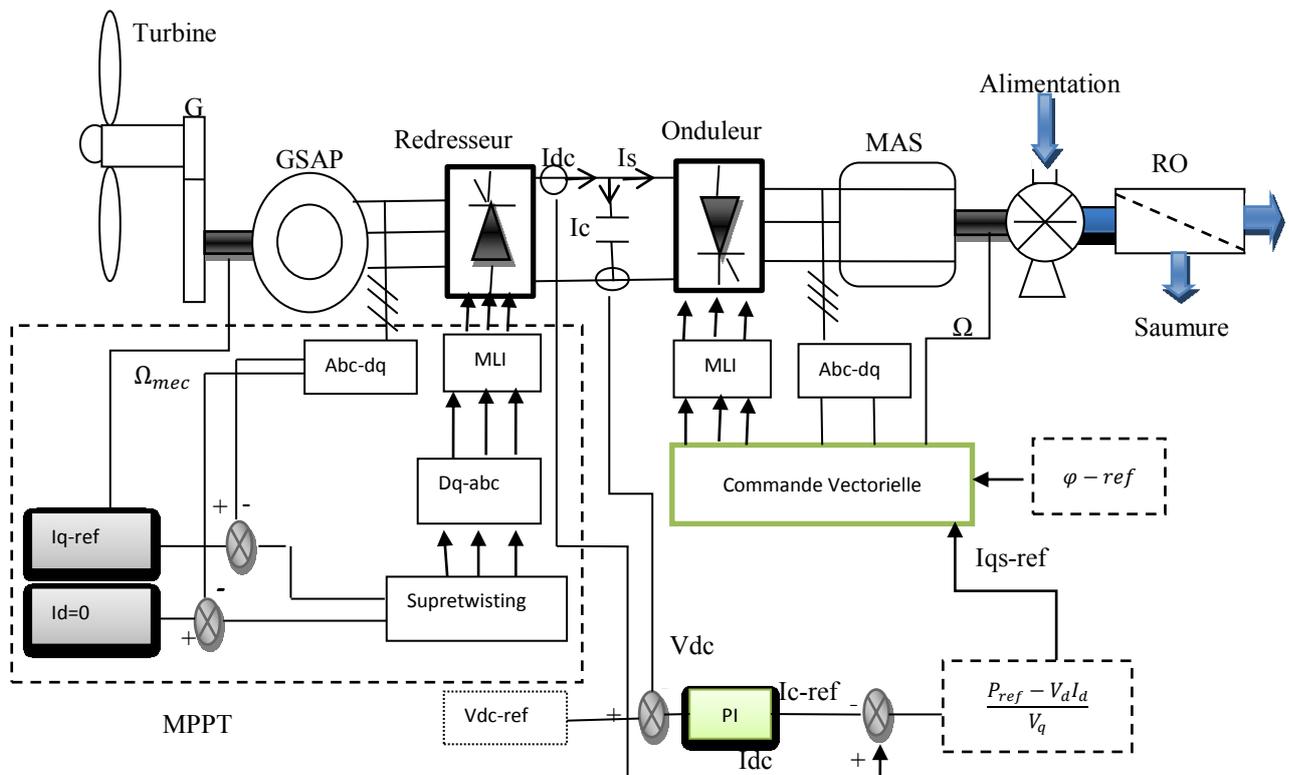
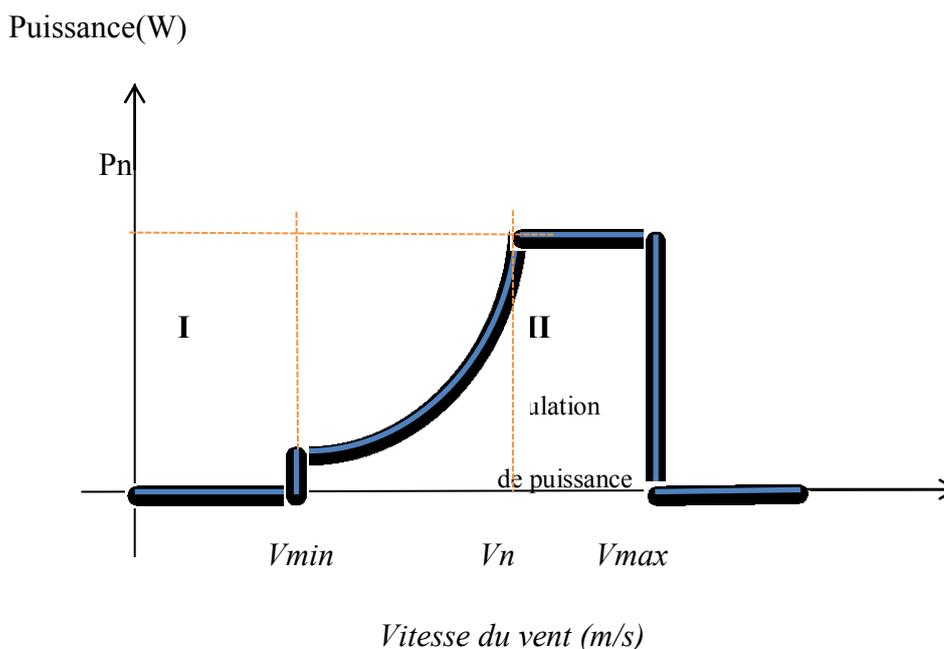


Figure 3.1 Schéma synoptique de la stratégie de commande du système de dessalement éolien

### 3.2 Commande du système de conversion d'énergie éolienne.

#### 3.2.1 Zones de fonctionnement de l'éolienne.

Pour une éolienne, la capacité de production spécifique combien de puissance peut être extraite du vent en tenant compte à la fois des contraintes physiques et économiques. Cette capacité est représentée par une courbe puissance- vitesse de l'éolienne qui se compose de trois zones (figure 3.2).[FER 07 ]



**Figure 3.2 Zones de fonctionnement de l'aérogénérateur**

**Dans la zone I**, l'éolienne est arrêtée car le vent n'est pas assez fort pour que la production d'énergie soit rentable vis à vis de l'énergie de fonctionnement. Le démarrage de l'aérogénérateur s'effectue au-delà d'une vitesse minimale du vent  $V_{min}$ .

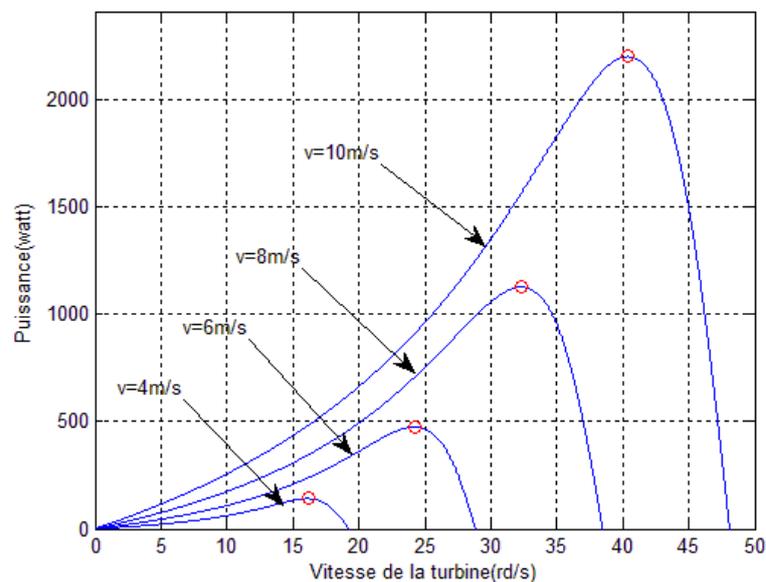
**Dans la zone II**, l'aérogénérateur fonctionne en charge partielle. L'objectif dans cette zone est d'optimiser le rendement énergétique. Ainsi, la vitesse de rotation évolue en fonction de la vitesse du vent de sorte à se maintenir dans le point de fonctionnement de rendement aérodynamique maximal qui correspond au coefficient  $C_p$ -max.

**La zone III** (vent fort) correspond au fonctionnement à pleine charge pour une vitesse de vent  $V_n$  et l'aérogénérateur arrive à sa puissance nominale. Il faut limiter la puissance afin

de ne pas abîmer le système. Au-delà d'une vitesse  $V_{max}$ , un système d'urgence est actionné pour arrêter le fonctionnement du système.

### 3.2.2 Discussion des stratégies de commande de l'éolienne.

Afin d'assurer un fonctionnement optimal du générateur éolien en zone II, il est indispensable d'imposer au système un fonctionnement qui permet de soutirer le maximum de puissance que peut offrir la vitesse du vent disponible. En raison de la variation de la vitesse du vent, la courbe de puissance de l'éolienne change ainsi le point de fonctionnement du générateur se trouvera décalé du point correspondant au point de puissance maximale. Si le générateur continue à fonctionner à vitesse fixe, cela entrainera une dégradation du rendement du système de conversion d'énergie éolienne. Pour garder un fonctionnement optimal du système, une stratégie de commande est employée pour poursuivre le point de fonctionnement de la puissance maximale dite **MPPT** (Maximum power point tracker) basée sur un fonctionnement à vitesse variable (figure 3.3).



*Figure 3.3 Courbe Puissance-vitesse de la turbine éolienne*

Plusieurs commandes basées sur ce principe ont fait l'objet de recherches pour tester les performances du système de conversion d'énergie éolienne. Toutefois il est à noter qu'elles sont toutes basées sur deux possibilités de commande, soit une commande en vitesse ou bien un control du couple électromagnétique et qui sont présentés par la suite.

**a- La commande en vitesse :**

Comme l'objectif de la technique MPPT est d'atteindre un fonctionnement assurant une puissance maximale, il est possible d'imposer à la génératrice synchrone de fonctionner à une vitesse de référence qui poursuit le point de puissance maximale sur la courbe caractéristique de la voilure de l'éolienne. Le calcul de cette vitesse est possible à partir de la valeur de la puissance optimale donnée par :

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_{pmax} \quad (3.1)$$

$C_{pmax}$  correspond à la valeur maximale du coefficient de puissance.

En reprenant l'équation (2.3), on peut écrire la vitesse de référence de la turbine ainsi:

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{op} V}{R} \quad (3.2)$$

Où  $\lambda_{op}$  est la vitesse réduite spécifique qui correspond au point  $C_{pmax}$  sur la courbe caractéristique de la voilure de l'éolienne.

En remplaçant la vitesse du vent à partir de l'équation (3.2) dans l'équation (3.1), la puissance maximale extractible du vent peut s'écrire sous la forme :

$$P_{max} = K \Omega_{turbine-ref}^3 \quad (3.3)$$

Avec :

$$K = \frac{0.5 \pi \rho C_{pmax} R^5}{\lambda_{op}^3} \quad (3.4)$$

En multipliant la vitesse de la turbine de référence par le gain du multiplicateur, la vitesse de la turbine de référence devient :

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{turbine-ref} \quad (3.5)$$

Cette méthode de contrôle illustrée par la figure 3.4 régule la vitesse de rotation du générateur afin de maintenir la vitesse spécifique à une valeur optimale à laquelle la puissance capturée est maximale. Elle nécessite à la fois la mesure ou l'estimation de la

vitesse du vent et la vitesse de la turbine, en plus de la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure de la turbine.

Cette méthode n'est pas très favorable, vu la nécessité de deux mesures pour commander l'éolienne. Une mesure erronée de la vitesse du vent par l'anémomètre peut conduire à une dégradation de la puissance captée selon cette technique [ELM 09].

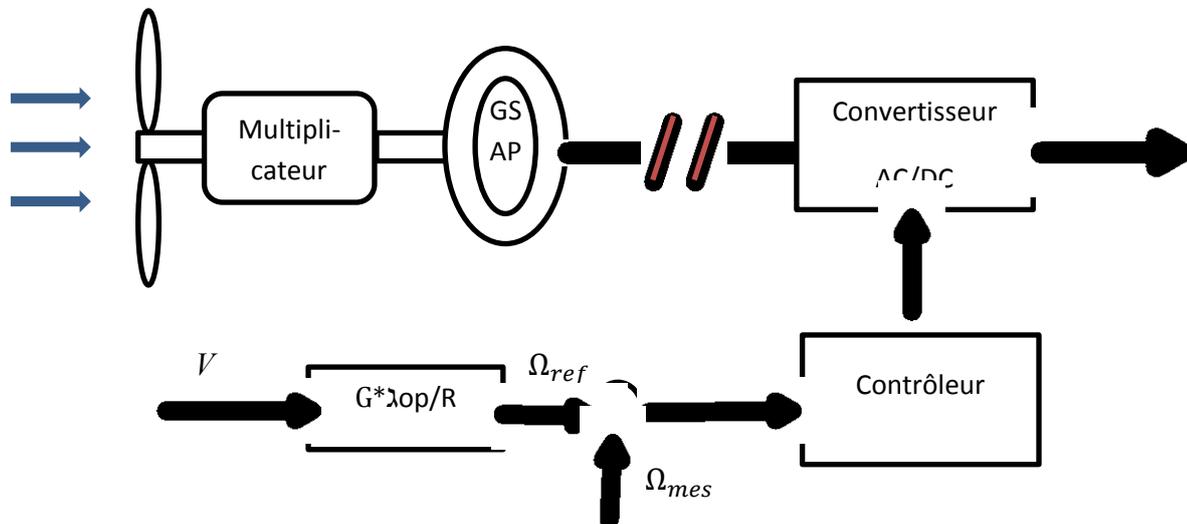


Figure 3.4 Schéma synoptique d'une commande MPPT en vitesse.

### b- Commande en couple

Comme pour la commande en vitesse, nous utiliserons la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure éolienne pour la commander en couple. Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [ELA 04]:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_f \quad (3.6)$$

En négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ( $C_f = 0$ ) et en considérant que le couple dynamique développé étant nul en régime permanent, on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (3.7)$$

En reprenant les équations (2.3)(2.7),(2.8) et (2.9) et en les regroupant, on peut écrire le couple électromagnétique de la GSAP sous cette forme :

$$C_{em} = \frac{C_p \rho \pi R_t^5}{\lambda^3} \frac{1}{2} \frac{1}{G^3} \Omega_{mec}^2 \quad (3.8)$$

Afin d'imposer à la GSAP de fonctionner à un couple optimal, il est remarquable à partir de l'équation (3.8) qu'il faut maintenir la valeur du couple au point de fonctionnement correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance  $C_{p-max}$  pour la valeur optimale de la vitesse réduite spécifique  $\lambda_{op}$ .

Le couple électromagnétique de référence à imposer s'écrira comme suit :

$$C_{em-ref} = K_{op} \Omega_{mec}^2 \quad (3.9)$$

Avec 
$$K_{op} = \frac{C_{p-max} \rho \pi R_t^5}{\lambda_{op}^3} \frac{1}{2} \frac{1}{G^3} \quad (3.10)$$

Cette loi de commande, en plus de la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure de l'éolienne, ne nécessite qu'une seule grandeur à mesurer ou à estimer : la vitesse mécanique du générateur synchrone à aimants permanents  $\Omega_{mec}$ . Toutefois cette loi de commande ne peut être appliquée que pour le fonctionnement en **Zone II**. Si la puissance capturée dépasse la puissance nominale de l'éolienne  $P_g$  (**Zone III**), il faut concevoir une seconde loi de commande qui limiterait la puissance de l'éolienne à sa valeur nominale. Le couple électromagnétique de référence s'écrira alors :

$$C_{em-ref} = P_n / \Omega_{mec} \quad (3.11)$$

Avec  $P_n$  la puissance nominale de la génératrice synchrone (2.2 kW pour notre cas)

La stratégie de commande à puissance de référence désirée est illustrée par le tableau suivant:

Modes	Mode I	Mode II
Condition	$P_g < P_n$	$P_g > P_n$
$C_{em-ref}$	$K\Omega^2$	$P_n / \Omega_{mec}$

**Tableau 3.1 Modes de contrôle du couple électromagnétique de la GSAP**

Alors qu'en Mode I, le couple électromagnétique de référence permet un fonctionnement en mode MPPT dans la zone II de fonctionnement de la turbine éolienne, Le

Mode II est actionné quand la turbine bascule en Zone III permettant à la GSAP de fonctionner à sa puissance nominale.

Sur la figure 3.5 est illustré la stratégie proposée de commande en couple de la turbine. Une commande par mode glissant d'ordre deux servira à travers le contrôle du courant en quadrature de la GSAP à se positionner en permanence sur le point de puissance maximale de la turbine et de soutirer le maximum de puissance. Le degré de liberté sera l'angle d'amorçage du redresseur commandé.

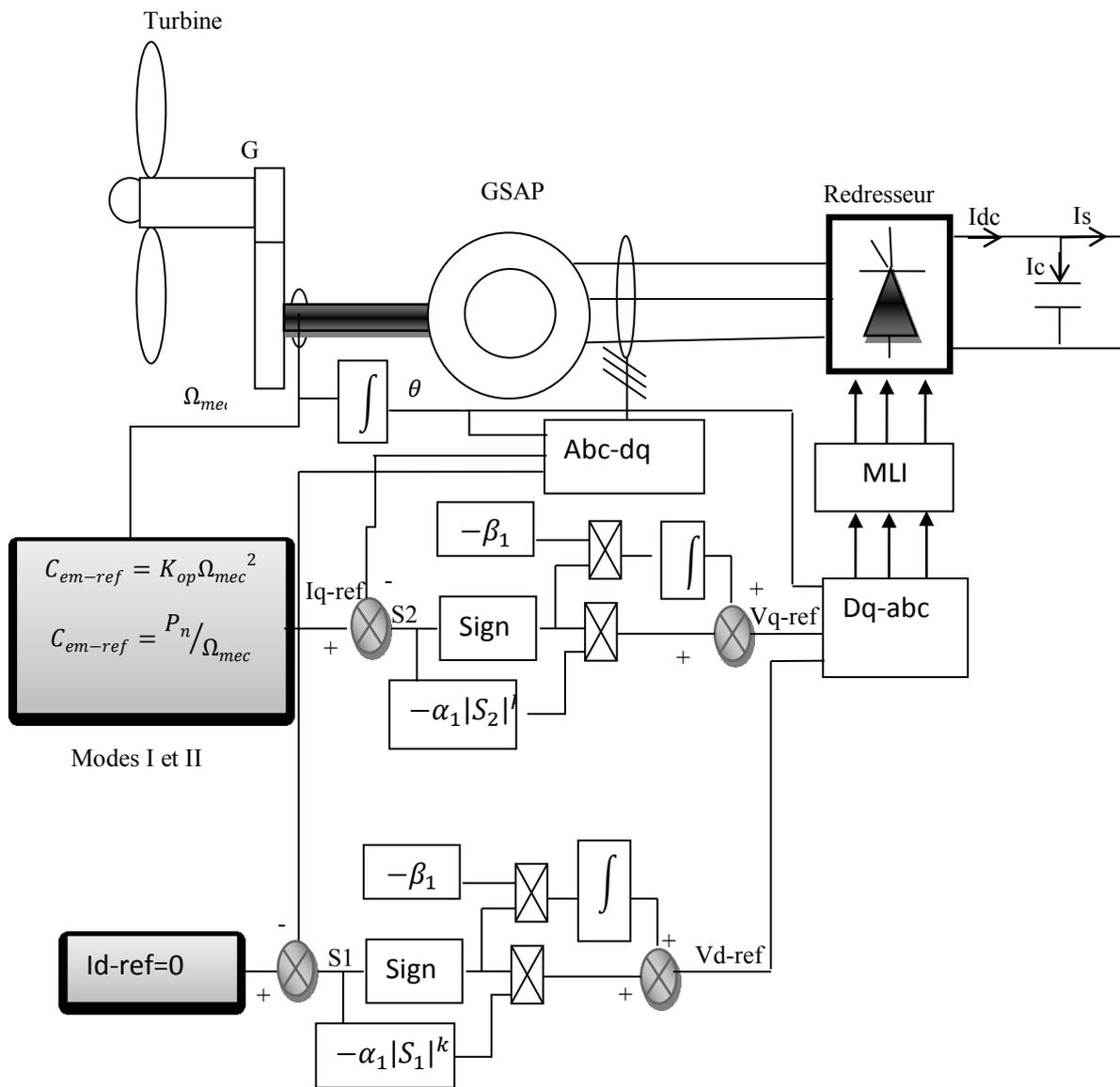


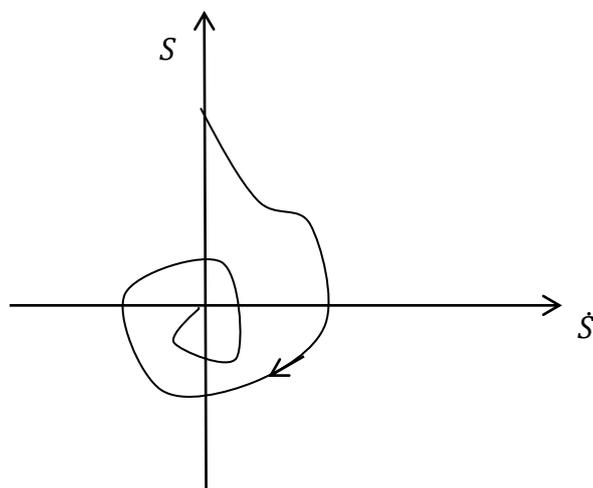
Figure 3.5 Commande par Mode glissant d'ordre deux de la GSAP

### 3.2.3 Commande par mode glissant d'ordre deux

Le contrôle de cette partie du système a pour objectif d'assurer l'écoulement du maximum de la puissance que peut générer la turbine éolienne vers le bus continu à travers la commande du redresseur lorsqu'elle fonctionne en zone II. Parmi les techniques de contrôle des générateur éoliens, l'approche par mode glissant a fait preuve d'une efficacité satisfaisante vu la nature de la source d'énergie éolienne caractérisée par ses turbulences. Le mode glissant d'ordre un quoique simple à implémenter, son majeur inconvénient est le phénomène de broutement (chattering en anglais). Pour un contrôle plus robuste, nous proposons un contrôle par mode glissant d'ordre deux (supertwisting) qui sera présenté par la suite.

#### 3.2.3.1 Description de la commande par mode glissant d'ordre 2

La commande par mode glissant d'ordre 2 est une technique généralisée du mode glissant d'ordre un. La commande d'ordre supérieur (d'ordre  $n$ ) agit sur les dérivées  $n$  de la surface de glissement ce qui permet d'éliminer l'inconvénient du phénomène de broutement tout en bénéficiant de la robustesse du contrôle par mode glissant standard. Alors que le mode glissant d'ordre élevé ( $n > 2$ ) nécessite d'avoir des informations sur les  $n$  dérivées de la surface de glissement  $S$ , l'algorithme du supertwisting, n'a besoin que d'informations sur la surface glissante. Les trajectoires sur le plan de phase du glissement d'ordre 2 sont caractérisées par une torsion autour de l'origine (figure 3.6) [VAL 08].



*Figure 3.6 Trajectoire de l'algorithme du supertwisting sur le plan de phase*

Considérons le système non linéaire perturbé suivant :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3.12)$$

$$y = s(t, x) \quad (3.13)$$

Avec  $x \in R^n, u \in R$  et  $f(x), g(x)$  sont des fonctions incertaines lisses de  $x$  et  $y \in R$ .

De l'équation (3.13), la dérivée temporelle de la surface de glissement peut être écrite ainsi :

$$\dot{s} = \frac{\partial}{\partial t} s(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} s(t, x)(f(x) + g(x)u) \quad (3.14)$$

La dérivée seconde s'écrit sous la forme :

$$\ddot{s} = \mu(t, x) + \vartheta(t, x)\dot{u} \quad (3.15)$$

Avec  $\mu(t, x), \vartheta(t, x)$  sont des fonctions incertaines qui pour un certain degré d'incertitudes des paramètres et les paramètres opérationnels du système peuvent être limitées par :

$$|\mu| < \Phi ; 0 < \Gamma_m < \vartheta(t, x) < \Gamma_M ; \Phi > 0 \quad (3.16)$$

La dérivée seconde de la surface de glissement doit être contenue dans l'inclusion suivante :

$$\ddot{s} = [-C, C] + [\Gamma_m, \Gamma_M]\dot{u} \quad (3.17)$$

En gardant la dérivée seconde dans cette inclusion différentielle, la dynamique du système converge en un temps fini à l'origine du plan de phase tel que  $S = \dot{S} = 0$

La loi de contrôle est une combinaison de deux termes. Alors que le premier terme est une fonction continue de la variable de glissement, le second est une dérivée temporelle discontinue et s'écrit ainsi [FRI 02][BEN 09]:

$$u = -\alpha|S|^k \text{sing}(S) + u_1 \quad (3.18)$$

$$\dot{u}_1 = -\beta \text{sign}(S) \quad (3.19)$$

Pour une convergence du système en un temps fini, les gains peuvent être choisis de manière à satisfaire les inégalités suivantes :

$$\begin{cases} \alpha > \frac{\Phi}{\Gamma_m} \\ \beta^2 \geq \frac{4\Phi \Gamma_M(\alpha + \Phi)}{\Gamma_m^2 \Gamma_m(\alpha - \Phi)} \\ 0 < k < 0.5 \end{cases} \quad (3.20)$$

### 3.2.3.2 Conception des contrôleurs supertwisting

Pour assurer la poursuite du point de puissance maximale, nous définissons les courants de référence comme suit :

$$\begin{cases} I_{d-ref} = 0 \\ I_{q-ref} = \frac{T_{em-ref}}{p\varphi_f} \end{cases} \quad (3.21)$$

Pour assurer la convergence des courants vers leurs références, nous considérons les surfaces de glissement suivantes [BEN 09] :

$$\begin{cases} S_1 = I_d - I_{d-ref} \\ S_2 = I_q - I_{q-ref} \end{cases} \quad (3.22)$$

En fait, le maintien du courant direct à la valeur nulle garantit un fonctionnement à flux orienté de la GSAP alors que le courant en quadrature contrôle le couple électromagnétique et permet le fonctionnement en Mode MPPT (Zone II ou III).

En reprenant les équations de la MSAP (2.30), les dérivées des surfaces de glissement peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = \frac{-R}{L} I_d + w I_q + \frac{1}{L} V_d - \dot{I}_{d-ref} \\ \dot{S}_2 = \frac{-R}{L} I_q - w I_d - \frac{w}{L} \varphi + \frac{1}{L} V_q - \dot{I}_{q-ref} \end{cases} \quad (3.23)$$

Posons :

$$\begin{cases} G_1 = w I_q - \dot{I}_{d-ref} \\ G_2 = -w I_d - \frac{w}{L} \varphi - \dot{I}_{q-ref} \end{cases} \quad (3.24)$$

Les dérivées 2 des surfaces de glissement s'écrivent ainsi :

$$\begin{cases} \ddot{S}_1 = \frac{-R}{L} \dot{I}_d + \dot{G}_1 + \frac{1}{L} \dot{V}_d \\ \ddot{S}_2 = \frac{-R}{L} \dot{I}_q + \dot{G}_2 + \frac{1}{L} \dot{V}_q \end{cases} \quad (3.25)$$

Considérons les lois de commande suivante:

$$\begin{cases} V_d = u_1 + u_2 \\ V_q = w_1 + w_2 \end{cases} \quad (3.26)$$

$$\text{Tel que : } \begin{cases} u_1 = -\alpha_1 |S_1|^k \text{sign}(S_1) \\ \dot{u}_2 = -\beta_1 \text{sign}(S_1) \\ w_1 = -\alpha_2 |S_2|^k \text{sign}(S_2) \\ \dot{w}_2 = -\beta_2 \text{sign}(S_2) \end{cases} \quad (3.27)$$

Avec les constantes positives  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$ ,  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  qui satisfont les inégalités suivantes :

$\left| \frac{-R}{L} i_d + \dot{G}_1 \right| < \Phi 1, 0 < \Gamma_m < \frac{1}{L} < \Gamma_M$  et  $\left| \frac{-R}{L} i_q + \dot{G}_2 \right| < \Phi 2$  tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_i > \frac{\Phi_i}{\Gamma_{mi}} \\ \beta i^2 \geq \frac{4\Phi_i \Gamma_{Mi} (\alpha_i + \Phi_i)}{\Gamma_{mi}^2 \Gamma_{mi} (\alpha_i - \Phi_i)} \\ 0 < k < 0.5 \end{array} \right. \quad i = 1, 2 \quad (3.28)$$

### 3.3 Commande de la machine asynchrone

Dans cette partie du système, la machine asynchrone sert à entraîner la pompe haute pression qui alimente le module d'osmose inverse en eau saumâtre. Elle est reliée au bus continu par le biais d'un onduleur MLI. Comme la puissance générée par le système de conversion d'énergie éolienne est variable, il sera difficile de contrôler la MAS. Alors, nous devons d'abord adopter un choix de commande qui assure une tension fixe au bus continu afin de pouvoir commander la machine asynchrone. Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, de la vitesse ou même de la position. Le contrôle le plus primaire est celui des courants et donc du couple.

Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu où le découplage naturel entre le réglage du couple et du flux rend sa commande aisée. On se trouve confronté à une difficulté supplémentaire pour contrôler ce couple.

La commande vectorielle vient régler ce problème de découplage des réglages du flux à l'intérieure de la machine et celui du couple. Elle semble avoir la capacité d'obtenir de la machine asynchrone les meilleures performances dynamiques, tout en ayant une loi de commande de mise en œuvre simple [BAB 97][BAG 99].

#### 3.3.1 Principe de la commande vectorielle

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation), et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple.

En partant de l'écriture de l'équation du couple électromagnétique en régime quelconque suivante :

$$C_e = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} I_{qs} - \varphi_{qr} I_{ds}) \quad (3.29)$$

Il est remarquable que si on élimine le produit  $\varphi_{qr} I_{ds}$ , le couple ressemblerait fort à celui d'un moteur à courant continu. En faisant un choix judicieux par l'orientation du repère dq de manière à annuler la composante du flux en quadrature, le couple s'exprimera en fonction du flux rotorique  $\varphi_{dr}$  et le courant statorique  $I_{qs}$ . Pour cela, il faut choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe directe (d) (Figure 3.7) et donc d'avoir :

$$\begin{cases} \varphi_d = \varphi \\ \varphi_q = 0 \end{cases} \quad (3.30)$$

Le couple de la machine s'écrira ainsi :

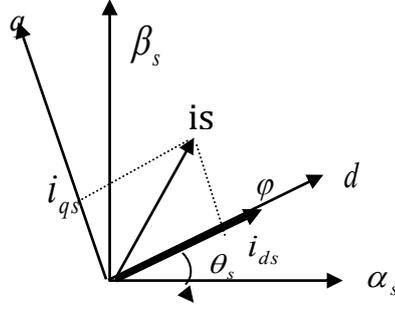
$$C_e = p \left( \frac{M}{L_r} \right) \varphi_{dr} i_{qs} \quad (3.31)$$

Il convient de régler le flux en agissant sur la composante  $I_{ds}$  du courant statorique et on régule le couple en agissant sur la composante  $I_{qs}$ . On voit clairement que la MAS devient analogue à un MCC.

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée car elle élimine l'influence des réactances de fuite rotorique et statorique et donnent de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer [BAG 99].

Il existe, essentiellement, deux méthodes de commande à flux orienté, l'une dite méthode directe, repose sur la connaissance du flux (position et norme). L'autre, appelée méthode indirecte, basée sur la connaissance de la position du flux seulement. Nous utiliserons la première commande pour notre application.

:



**Figure 3.7 Principe de la commande vectorielle**

En imposant  $\varphi_d = \varphi_r$  et  $\varphi_q = 0$ , les équations de la machines dans un référentiel lié au champ tournant deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left( -R_s i_{ds} + \omega_s \sigma L_s i_{qs} - \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_r}{dt} + v_{ds} \right) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left( -R_s i_{qs} - \omega_s \sigma L_s i_{ds} - \frac{M}{L_r} \omega_s \varphi_r + v_{qs} \right) \\ T_r \frac{d\varphi_r}{dt} + \varphi_r = M i_{ds} \\ \omega_{sl} = \left( \frac{M}{T_r} \right) \left( \frac{i_{qs}}{\varphi_r} \right) \\ \omega_s = \omega_r + \omega_{sl} \end{array} \right. \quad (3.32)$$

L'équation mécanique est exprimée comme suit :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - C_f \quad (3.33)$$

Après passage par une transformation de Laplace le système d'équations (3.32) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = (R_s + s\sigma L_s) i_{ds} + P \frac{M}{L_r} \varphi_r - \omega_s \sigma L_s i_{qs} \\ v_{qs} = (R_s + s\sigma L_s) i_{qs} + \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r + \omega_s \sigma L_s i_{ds} \\ \varphi_r = \frac{M}{1 + sT_r} i_{ds} \\ \omega_{sl} = \frac{M}{T_r \varphi_r} i_{qs} \end{array} \right. \quad (3.34)$$

En régime permanent nous exprimons le flux rotorique par :

$$\varphi_r = Mi_{ds} \quad (3.35)$$

### 3.3.2 Conception des contrôleurs de la MAS

Afin d'assurer l'écoulement de toute la puissance générée par le système de conversion d'énergie éolienne vers la MAS, nous proposons deux boucles de régulations. La première boucle commande le couple de la MAS et la seconde boucle pour la régulation du flux. Etant donné que la puissance au bus continue est variable, la boucle de régulation du couple comportera deux boucles en cascade pour fixer la tension au bus continu. La capacité du bus continu initialement chargée ne devrait pas être déchargée au cours du fonctionnement du système. Donc, nous devons imposer à la MAS de fonctionner à un couple électromagnétique qui assure une égalité des puissances générée par la source et la puissance consommée par la MAS. A la sortie des régulateurs, nous obtenons les tensions de références à imposer à la Mas par l'onduleur à commande MLI (figure 3.8).

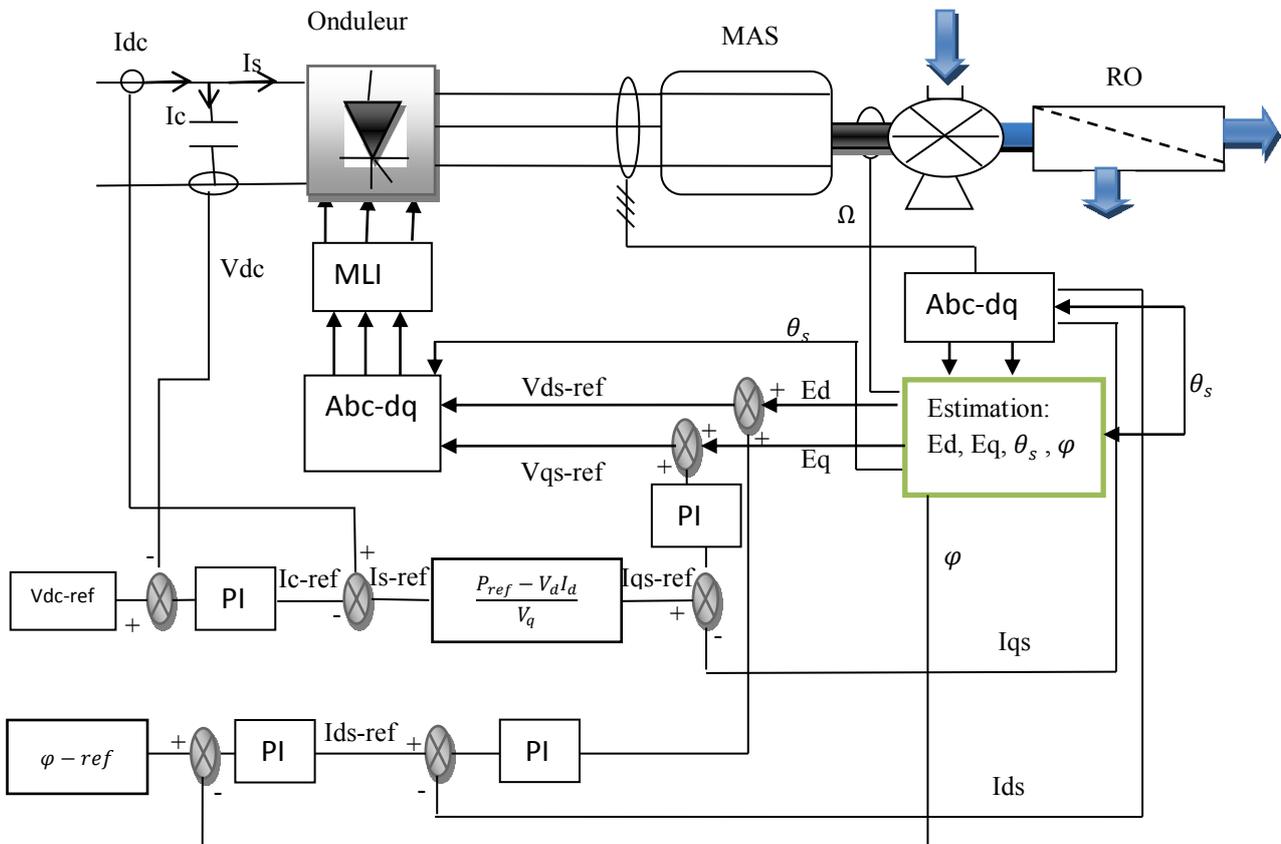


Figure 3.8 Schéma de commande de la MAS

### 3.3.2.1 Régulation du couple

#### a- Régulation de la tension au bus continu

La puissance transférée du bus continu vers la MAS est conservée par l'égalité suivante en considérant le convertisseur sans pertes :

$$V_{dc} I_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (3.36)$$

Pour assurer un transfert de toute la puissance générée par le système de conversion d'énergie éolienne, nous devons imposer à la MAS de fonctionner à une puissance de référence tel que :

$$P_{ref} = V_{dc} I_{dc} = V_{dc} I_s \quad (3.37)$$

L'objectif de la boucle de régulation du bus continu est de fixer la tension au bus continu qui devient une source d'alimentation de la MAS pour assurer le bon fonctionnement du convertisseur et imposer un fonctionnement à une puissance de référence égale à celle générée par le système de conversion d'énergie éolienne. Pour ce faire, la tension de référence doit être au moins égale au double de la tension maximale de la MAS [SIN 10] tel que :

$$V_{dc-ref} = 2\sqrt{2}V_{eff} \quad (3.38)$$

La tension du bus continu est comparée à  $V_{dc-ref}$  (tension de référence) et la différence est appliquée au contrôleur. La sortie définit le courant de référence  $I_{c-ref}$  qui représente le courant de charge de la capacité du bus continu. La régulation annule ce courant et maintient l'égalité des courants en amont et en aval du bus continu.

Nous utiliserons un régulateur PI pour ramener la tension du bus continu à sa référence. Le courant de charge de référence de la capacité du bus continu est issu du régulateur et s'écrit ainsi :

$$I_{c-ref} = (K_{pdc} + \frac{K_{idc}}{s})(V_{dc} - V_{dc-ref}) \quad (3.39)$$

Pour le calcul des gains du régulateur, nous considérons la boucle de contre action suivante :

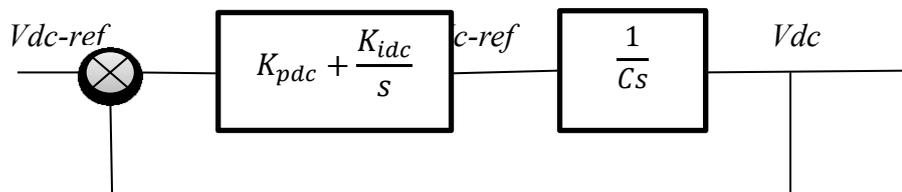


Figure 3.9 Schéma bloc de régulation de la tension au bus continu

L'équation caractéristique de la fonction de transfert en boucle fermée peut s'écrire ainsi :

$$s^2 + \frac{K_{pdc}}{C}s + \frac{K_{idc}}{C} = 0 \quad (3.40)$$

Par comparaison de cette équation caractéristique à la forme standard du second ordre, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} 2\xi w_n = \frac{1}{C} K_{pdc} \\ w_n^2 = \frac{1}{C} K_{idc} \end{cases} \quad (3.41)$$

Avec :  $\xi$  : coefficient d'amortissement.

$w_n$  : pulsation propre du système.

Par un simple placement de pôles, nous pouvons déterminer les valeurs des gains du régulateur  $K_{pdc}$  et  $K_{idc}$ .

### ***b-Régulation du courant en quadrature***

En reprenant les courants du bus continu :

$$I_{dc} = I_{c-ref} + I_s \quad (3.42)$$

Nous pouvons obtenir le courant en amont de l'onduleur par l'équation :

$$I_{s-ref} = I_{dc} - I_{c-ref} \quad (3.43)$$

La puissance de référence qui nous assure l'égalité des puissances s'écrit :

$$P_{ref} = V_{dc} I_{s-ref} \quad (3.44)$$

Le courant en quadrature de référence peut être écrit ainsi :

$$I_{q-ref} = \frac{V_{dc} I_{s-ref} - V_{ds} I_{ds}}{V_{qs}} \quad (3.45)$$

La boucle de régulation du courant en quadrature est représentée par la figure suivante [TUR 08] :

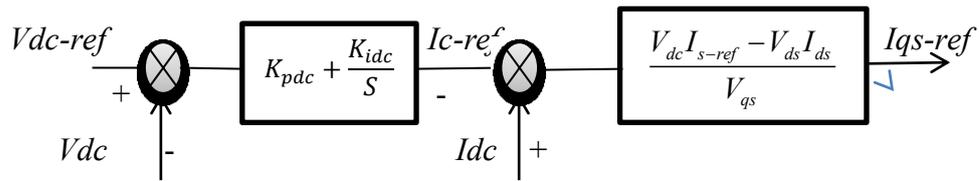


Figure 3.10 Schéma –bloc de génération du courant  $I_{q-ref}$

### 3.3.2.2 Régulation du flux

La seconde boucle de régulation maintient le flux de la machine à sa valeur nominale. Le flux mesuré ou estimé est comparé au flux nominal de la MAS et la différence est appliquée à un régulateur PI pour déterminer le courant direct  $I_{d-ref}$  à imposer comme signal de référence pour la MAS.

En considérant l'équation qui relie le flux au courant direct (3.34), nous pouvons obtenir le schéma-bloc suivant (figure 3.11) :

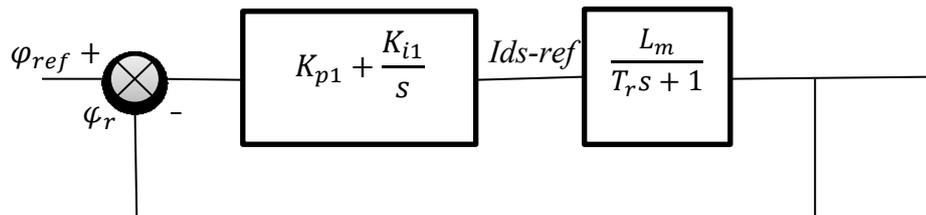


Figure 3.11 Schéma bloc de la boucle de régulation du flux

L'équation caractéristique de ce système est donnée par :

$$s^2 + \frac{1+L_m K_{p1}}{T_r} s + \frac{L_m K_{i1}}{T_r} = 0 \quad (3.46)$$

En comparant cette équation caractéristique à la forme standard du second ordre, on trouve :

$$\begin{cases} 2\xi\omega_n = \frac{1+L_m K_{p1}}{T_r} \\ \omega_n^2 = \frac{L_m K_{i1}}{T_r} \end{cases} \quad (3.47)$$

En prenant  $w_n = \frac{1}{\xi T_r}$ , les paramètres du système sont donnés par :

$$K_{p1} = \frac{1}{L_m} \quad (3.48)$$

$$K_{i1} = \frac{1}{\xi^2 L_m T_r} \quad (3.49)$$

### 3.3.3 Commande en tension de la MAS

Les courants de référence générés des boucles de régulation sont comparés aux courants mesurés pour déterminer les tensions de référence qu'on désire appliquer à la MAS. Des régulateurs PI sont utilisés pour cette fin. Une commande MLI est utilisée pour commander l'onduleur qui impose ces tensions à la MAS.

Les équations de la machine (3.32) sont fortement couplées donc il est intéressant d'ajouter des termes de découplage afin de rendre les axes  $dq$  complètement découplés. Ce découplage permet surtout d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer les coefficients des régulateurs.

Reprenons les équations (3.32) du moteur asynchrone commandé par orientation du flux rotorique.

$$\begin{cases} v_{ds} = (R_s + s\sigma L_s)i_{ds} - \omega_s \sigma L_s i_{qs} \\ v_{qs} = (R_s + s\sigma L_s)i_{qs} + \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r + \omega_s \sigma L_s i_{ds} \\ \varphi_r = \frac{M}{1 + sT_r} i_{ds} \\ \omega_{sl} = \frac{M}{T_r \varphi_r} i_{qs} \end{cases} \quad (3.50)$$

Les termes  $\omega_s \sigma L_s i_{qs}$ ,  $\omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r$  et  $\omega_s \sigma L_s i_{ds}$  correspondent aux termes de couplage

entre les axes  $dq$  que nous pouvons définir par :

$$\begin{cases} E_d = \omega_s \sigma L_s i_{qs} \\ E_q = -\omega_s \sigma L_s i_{ds} - \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r \end{cases} \quad (3.51)$$

Une solution consiste à ajouter des tensions identiques mais de signes opposés à la sortie des régulateurs de courant de manière à séparer les boucles de régulations d'axes  $d$  et  $q$  comme le montre la figure 3.12

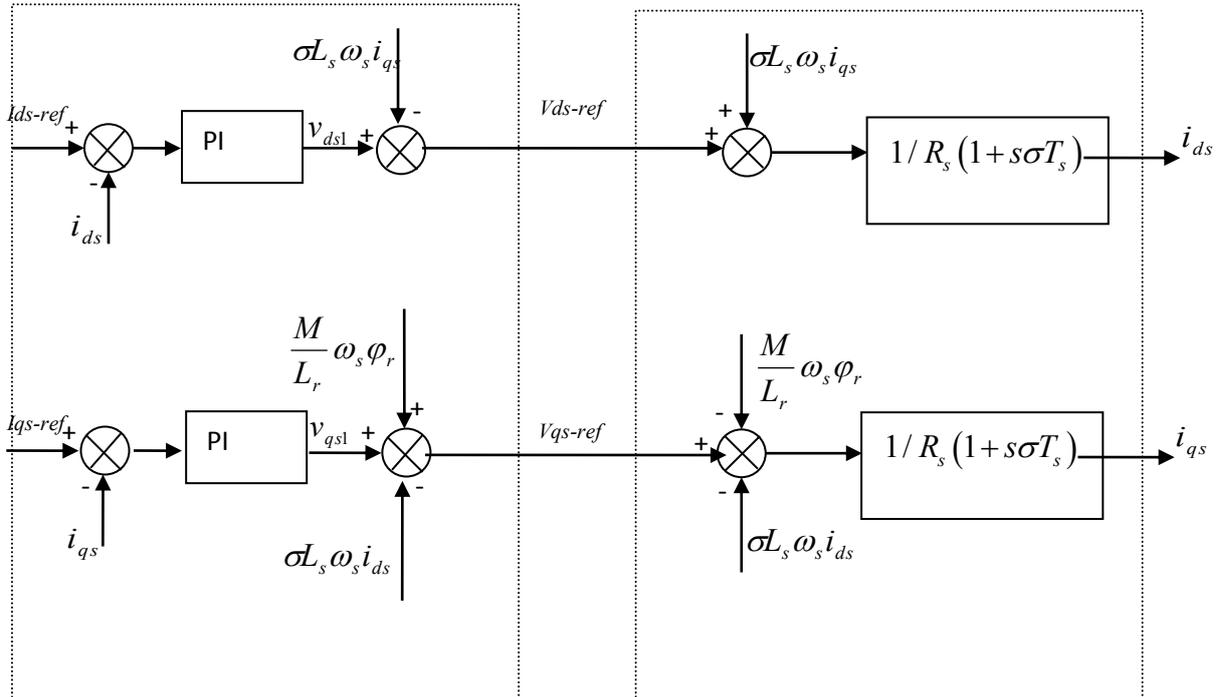


Figure 3.12 Commande en tension de la MAS

Le calcul des régulateurs des courants direct et en quadrature s'effectue d'une manière identique selon le schéma de la figure 3.13

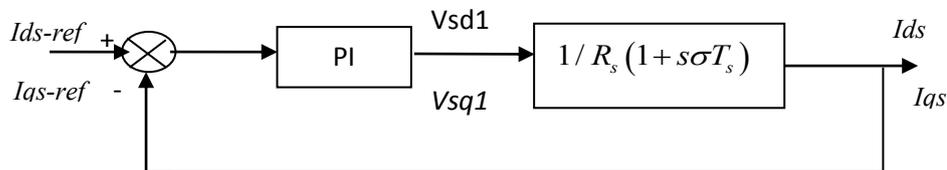


Figure 3.13 : Boucle de régulation des courants  $I_{ds}$ ,  $I_{qs}$  après découplage

### 3.3.3.1 Calcul des régulateurs

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$FTBO = \frac{K_i(\tau_r s + 1)}{pR_s(1 + sT_s)} \quad (3.52)$$

Avec :  $\tau_r = \frac{K_p}{K_i}$  et  $T_s = \frac{\sigma L_s}{R_s}$

Nous pouvons éliminer un pôle en choisissant  $\tau_r = T_s$ . La fonction de transfert deviendra alors :

$$FTBO = \frac{K_i}{sR_s} \quad (3.53)$$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit :

$$FTBO = \frac{1}{1+s\frac{R_s}{K_i}} \quad (3.54)$$

La fonction de transfert est celle d'un système du premier ordre dont le temps de réponse (à 5%) est :

$$t_r = 3 \frac{R_s}{K_i} \quad (3.55)$$

Pour déterminer les gains du régulateur  $K_p$  et  $K_i$ , on choisit un temps de réponse plus rapide que la constante de temps rotorique de la MAS :

$$t_r = \frac{T_r}{10} \quad (3.56)$$

### 3.4 Méthode d'optimisation du système de dessalement

L'objectif visé par l'optimisation du système de dessalement est l'amélioration de la quantité d'eau douce produite par le module d'osmose inverse avec une concentration en sel acceptable et ce via un contrôle judicieux du flux rotorique de l'actionneur asynchrone.

En fait, l'objectif de l'optimisation peut être atteint par une maximisation de la pression et le débit à l'entrée du module d'osmose inverse donc de la puissance hydraulique de la pompe et qui s'écrit ainsi :

$$P_{hyd} = QH \quad (3.57)$$

$Q, H$  sont respectivement le débit de la pompe et la hauteur manométrique.

Pour ce faire, il est indispensable de maximiser la puissance à l'entrée de la pompe qui représente la puissance utile développée par le moteur asynchrone. En Considérant le contrôle vectoriel en régime statique, cette puissance peut s'écrire comme suit :

$$P_u = K\varphi_r I_q \Omega \quad (3.58)$$

De l'équation (3.58), il est remarquable que les grandeurs de contrôle de la puissance utile du moteur asynchrone sont le courant en quadrature et le flux. Comme le courant en quadrature correspond à la puissance maximale générée par le bus continu et issue de la source éolienne, nous envisageons une maximisation de la vitesse mécanique en considérant le flux de la machine. Nous proposons alors un fonctionnement à flux variable au lieu d'un fonctionnement à flux constant et qui assurera une minimisation des pertes du moteur pour chaque vitesse du vent par minimisation du courant statorique dont le résultat sera une amélioration de la puissance utile développée par le moteur.

Le courant statorique dans le moteur, exprimé en fonction de ses deux composantes directe  $i_{ds}$  et en quadrature  $i_{qs}$  est donné par la relation suivante [BOU 07]:

$$i_s = \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} \quad (3.59)$$

avec :

$$i_{ds}^2 = \frac{\varphi_r^2}{M^2} \quad (3.60)$$

$$i_{qs}^2 = \frac{C_e^2 L_r^2}{p^2 M^2 \varphi_r^2} \quad (3.61)$$

En remplaçant les expressions (3.61) et (3.60) dans (3.59), nous obtenons la relation du courant en fonction du flux  $\varphi_r$

$$i_s = \sqrt{\frac{\varphi_r^2}{M^2} + \frac{C_e^2 L_r^2}{p^2 M^2 \varphi_r^2}} \quad (3.62)$$

L'équation (3.62) est alors la fonction objective à minimiser et qu'on peut écrire sous la forme :

$$Fobj(\varphi) = \sqrt{K_1 \varphi_r^2 + \frac{K_2 C_e^2}{\varphi_r^2}} \quad (3.63)$$

Avec :  $K_1 = \frac{1}{M^2}$  et  $K_2 = \frac{L_r^2}{p^2 M^2}$

Le flux optimal qui minimise le courant statorique du moteur doit être limité par deux valeurs. Une valeur maximale qui correspond au flux nominal afin de ne pas saturer excessivement le moteur :

$$(\varphi_r)_{Max} = (\varphi_r)_{Nom}$$

Et pour la valeur minimale qu'on peut imposer au niveau de flux, elle ne peut pas être nulle. Pour arriver à une limitation minimale du niveau de flux, nous tenons compte des travaux présentés par [BAB 97].

$$(\varphi_r)_{Min} = 20\%(\varphi_r)_{Nom}$$

Donc la plage de variation du flux dans la machine pour le fonctionnement à niveau de flux variable sera :

$$20\%(\varphi_r)_{Nom} \leq \varphi_r \leq (\varphi_r)_{Nom}$$

### 3.4.1 Optimisation par algorithmes génétiques

Plusieurs algorithmes d'optimisation de la fonction objective existent et dont l'objectif est la détermination d'un extremum global (minimum ou maximum). Toutefois certains algorithmes convergent vers un extremum local qui risquerait de donner des valeurs erronées pour le système. Nous proposons donc les algorithmes génétiques qui contournent cette difficulté.

#### 3.4.1.1 Présentation des algorithmes génétiques

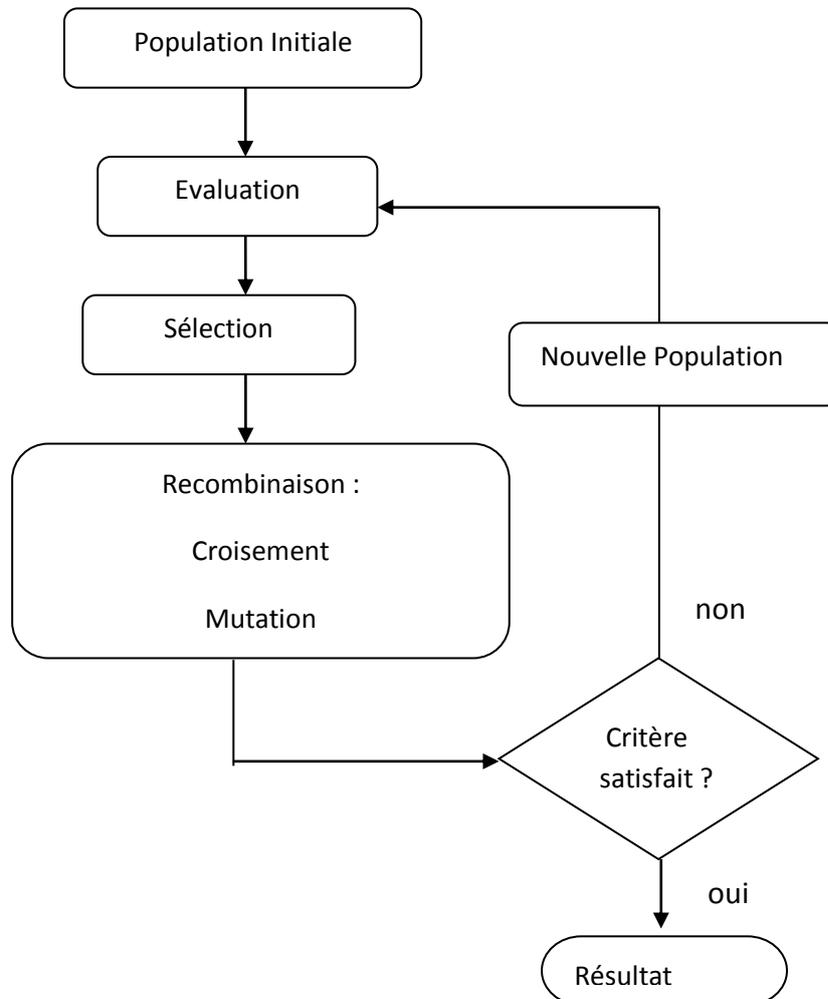
Les algorithmes génétiques (AG) sont des techniques de recherche et d'optimisation stochastique dérivées de la génétique et des mécanismes de la sélection naturelle et de l'évolution. Leurs champs d'application sont très vastes : économie, finance, optimisation de fonctions, planification, et bien d'autres domaines. La raison de ce grand nombre d'application est claire, la simplicité et l'efficacité.

Les premiers travaux sur les algorithmes génétiques ont été initialement développés par John Holland (1975) [HOL 75] qui a développé les principes fondamentaux des algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique. D'une manière globale, un algorithme génétique manipule les solutions potentielles d'un problème donné afin d'atteindre la solution optimale ou une solution jugée satisfaisante.

L'algorithme génétique est organisé en plusieurs étapes et fonctionne de manière itérative. La figure (3.14) représente l'algorithme génétique le plus simple [ZID 06]. Celui-ci met en œuvre différents opérateurs qui seront décrits ultérieurement. Mais avant, il est nécessaire de définir quelques termes de base rencontrés dans la littérature :

- **Individu** : solution potentielle du problème.
- **Chromosome** : solution potentielle du problème sous une forme codée, c-à-d une forme chaîne de caractères(figure 3.15).
- **Population** : ensemble fini d'individus (de solution).
- **Gène** : partie élémentaire (caractère) non divisible d'un chromosome.

- **Fitness** : terme anglo-saxon qui désigne la fonction d'évaluation d'un individu. Cette fonction est liée à la fonction à optimiser et permet de définir le degré de performance d'un individu (donc d'une solution) vis-à-vis du problème.



**Figure 3.14 Organigramme d'un algorithme génétique simple.**

Dans ce qui suit, nous allons décrire les différentes étapes de l'algorithme génétique.

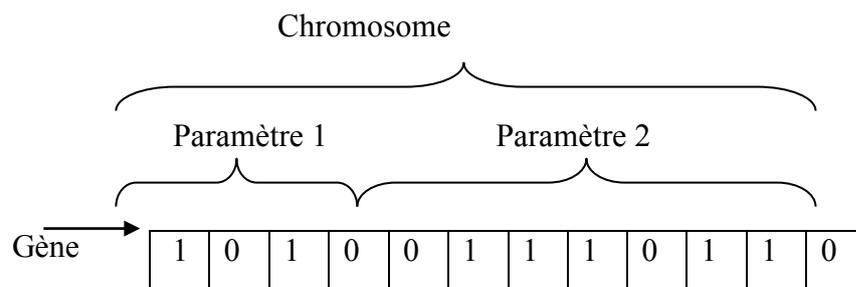
### **a- Codage initiale**

La première étape dans la procédure d'un algorithme génétique est le codage des paramètres du problème afin de constituer les chromosomes. Le type de codage le plus utilisé est le codage binaire (figure 3.15), mais d'autres types peuvent être utilisés [CHI 94], par exemple codage Gray, Réel..., etc. Aussi, nous pouvons facilement passer d'un codage à l'autre.

La transformation d'une chaîne binaire  $A=\{a_1, \dots, a_s\}$  en un nombre réel  $x$  dont l'espace de recherche permis est borné par les valeurs  $x_{min}$  et  $x_{max}$  peut alors s'exécuter en deux étapes [YIL 03] :

- conversion (de base 2 en base 10) :  $\hat{x} = \sum_{i=1}^s a_i 2^{s-i}$
- recherche du nombre réel correspondant :  $x = x_{min} + \hat{x} \frac{x_{max}-x_{min}}{2^s-1}$

La fonction de codage est inutile dans le cas où la population est initialisée aléatoirement. En effet, on peut tirer au hasard les individus directement dans leur représentation codée. Par contre, la fonction de décodage est nécessaire pour l'évaluation de ces individus.



**Figure 3.15** Exemple d'un chromosome en codage binaire.

### ***b- Evaluation***

L'évaluation consiste à mesurer la performance de chaque individu de la population. On utilise pour cela une fonction directement liée à la fonction objective (fonction à optimiser) appelée fonction fitness. C'est une fonction réelle positive qui reflète la force de l'individu. Un individu ayant une grande valeur fitness représente une bonne solution au problème, alors qu'un individu ayant une faible valeur fitness représente une solution médiocre. Dans le cas d'un problème de minimisation, la fonction fitness peut être obtenue en utilisant une des manières suivantes [KOR 06] :

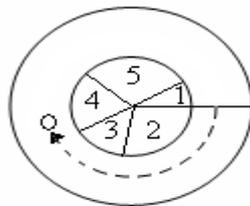
- $Fit(x) = N - F_{obj}(x)$  si  $F_{obj} \geq N$ , sinon  $Fit(x) = 0$  ( $N$  est une constante positive).
- $Fit(x) = \frac{1}{F_{obj}(x)}$
- $Fit(x) = -F_{obj}(x)$

### *c-Sélection*

Cet opérateur est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. En règle générale, la probabilité de survie d'un individu sera directement reliée à son efficacité relative au sein de la population. Une population dite intermédiaire est alors formée par les individus sélectionnés. Il existe plusieurs méthodes de sélection [BLI 95]. Nous citerons trois de ces méthodes

#### ❖ *Méthode de la roulette de loterie*

Selon cette méthode, chaque chromosome sera dupliqué dans une nouvelle population proportionnellement à sa valeur d'adaptation. Son principe est d'associer à chaque individu une portion d'une roue dont la surface dépend uniquement de sa valeur fitness. Un individu présentant une valeur fitness nulle ne sera pas représenté sur la roue, il n'aura donc aucune chance d'être sélectionné. Les individus ayant une grande valeur fitness auront une grande portion et auront, par conséquent, plus de chance d'être sélectionnés.



**Figure 3.16** *Sélection par la méthode de la roue de loterie.*

Pour réaliser la sélection, il suffit de faire tourner la roue autant de fois que le nombre d'individus. La figure (3.16) illustre un exemple de roue de loterie. Les numéros de 1 à 5 représentent les numéros des individus.

#### ❖ **Sélection par rang**

La sélection par roulette présente des inconvénients lorsque la valeur d'évaluation des individus varie énormément. En effet, on risquerait d'atteindre une situation de stagnation de l'évolution. Imaginons le cas où 90% de la roulette est allouée à l'individu qui a la meilleure évaluation, alors les autres individus auront une probabilité très faible d'être sélectionnés.

La sélection par rang trie d'abord la population par évaluation. Ensuite, chaque individu se voit associé un rang en fonction de sa position. Ainsi le plus mauvais individu aura le rang 1, le suivant 2, et ainsi de suite jusqu'au meilleur individu qui aura le rang  $N$ , pour une population de  $N$  individus. La sélection par rang d'un individu est identique à la sélection par roulette, mais les proportions sont en relation avec le rang plutôt qu'avec la valeur de l'évaluation. Avec cette méthode de sélection, tous les individus ont une chance d'être sélectionnés.

#### ❖ **Méthode du tournoi**

Cette méthode est celle avec laquelle on obtient les résultats les plus satisfaisants. Le principe de cette méthode est le suivant : on effectue un tirage avec remise de deux individus de  $P$ , et on les fait "combattre". Celui qui a la fitness la plus élevée l'emporte avec une probabilité  $p$  comprise entre 0.5 et 1. On répète ce processus  $n$  fois de manière à obtenir les  $n$  individus de  $P'$  qui serviront de parents. La variance de cette méthode est élevée et le fait d'augmenter ou de diminuer la valeur de  $p$  permet respectivement de diminuer ou d'augmenter la pression de la sélection.

#### ***d-Recombinaison***

La recombinaison agit directement sur la structure des chromosomes en modifiant leurs gènes pour obtenir les nouveaux chromosomes d'une nouvelle population. On dira alors, qu'une nouvelle génération d'individus est née. Lors du passage d'une génération à l'autre, le meilleur individu est supposé évalué afin d'atteindre l'optimum recherché correspondant à une très bonne solution de notre problème. Il existe deux catégories d'opérateurs de recombinaison : l'opérateur de croisement et l'opérateur de mutation.

#### ❖ **Croisement**

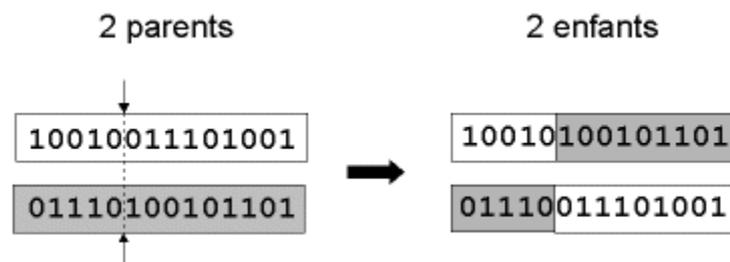
Cette technique nécessite deux parents afin d'effectuer l'échange des gènes entre eux. Cet échange permet de former deux descendants possédant des caractéristiques issues des deux parents. Chaque individu se voit attribuer une même probabilité  $P_{cross}$  de participer à un croisement.

L'opérateur de croisement favorise l'exploration de l'espace de recherche. Il assure le

brassage du matériel génétique et l'accumulation des mutations favorables. En d'autres termes, cet opérateur permet de créer de nouvelles combinaisons ayant des caractéristiques communes avec leurs parents. Souvent les meilleures caractéristiques sont transmises aux descendants. Seuls les individus les mieux adaptés vivent suffisamment longtemps pour se reproduire. Il existe différentes techniques de croisement. Chacune des techniques s'applique sur des chromosomes dont la représentation est soit binaire ou réelle. Nous citerons quelques techniques.

- **Le croisement simple :**

On choisit aléatoirement un point de croisement pour chaque couple d'individus sélectionnés. Notons que le croisement s'effectue directement au niveau des gènes représentés soit en binaires ou en réels. Un chromosome ne peut pas être coupé au milieu d'un gène. La figure 3.17 illustre ce croisement d'un seul point de coupure dans le cadre d'une représentation binaire.



*Figure 3.17 Croisement en un point.*

- **Le croisement multipoints :**

Plusieurs auteurs se sont penchés sur l'utilisation de plusieurs points de coupure concernant l'opérateur de croisement. Le nombre de points de coupure généré est en moyenne  $L/2$  où  $L$  est la taille du chromosome (figure 3.18). Cette technique s'applique autant pour une codification binaire que réelle des chromosomes. C'est une technique très utilisée dans différentes applications du fait que les résultats obtenus sont satisfaisants [BEN 02].

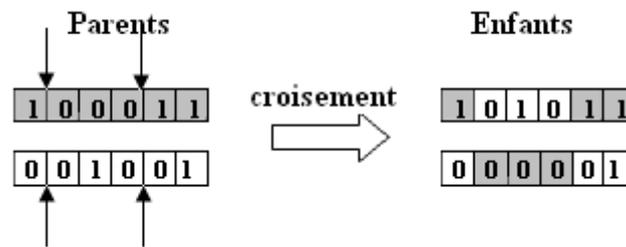


Figure 3.18 Croisement multipoints ( $P=2$ ) en codage binaire.

- Le **croisement uniforme** est une généralisation du croisement multipoints. Ici, chaque gène du chromosome peut constituer un point de croisement. Un chromosome nommé masque, de taille identique à celle des parents, est créé aléatoirement et la valeur des gènes du masque détermine de quel parent l'enfant recevra-t-il son gène selon le fonctionnement suivant : si la valeur du bit du masque est égale à 1 alors la valeur du gène du parent1 est copiée chez l'enfant1 et si la valeur du bit du masque est égale à 0 alors la valeur du gène du parent2 est transmise à l'enfant1. Les valeurs des gènes de l'enfant2 sont les suivantes : les valeurs des gènes du parents1 lorsque la valeur du bit du masque est égale à 0 et les valeurs des gènes du parent 2 lorsque la valeur du bit du masque est égale à 1 (figure 3.19).

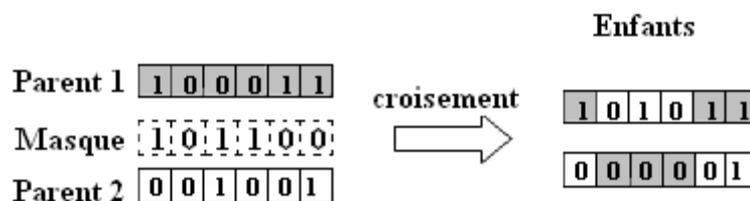
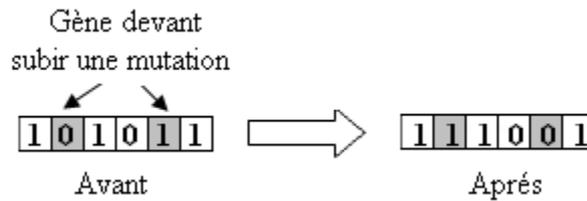


Figure 3.19 Croisement uniforme en codage binaire.

### ❖ Mutation

La mutation est définie comme étant la modification aléatoire d'un gène dans un chromosome. La figure 3.20 illustre la mutation appliquée à un chromosome binaire. Cet opérateur évite la convergence prématurée vers les extrémums locaux [ZID 06]. Il est appliqué avec une probabilité fixée  $pm$ . Le taux de mutation rend la recherche très aléatoire s'il est trop élevé et risque de stagner s'il est trop faible.



**Figure 3.20** Mutation dans le cas d'un codage binaire.

Contrairement à l'opérateur de croisement, la mutation est souvent considérée comme secondaire ayant pour rôle de restaurer des informations génétique perdues. Par exemple, si tous les chromosomes d'une population convergent vers un 0 à un emplacement donné, l'opérateur de croisement ne pourra pas faire apparaître le 1, par contre il est possible que l'opérateur de mutation le fasse.

#### *e-Critère d'arrêt*

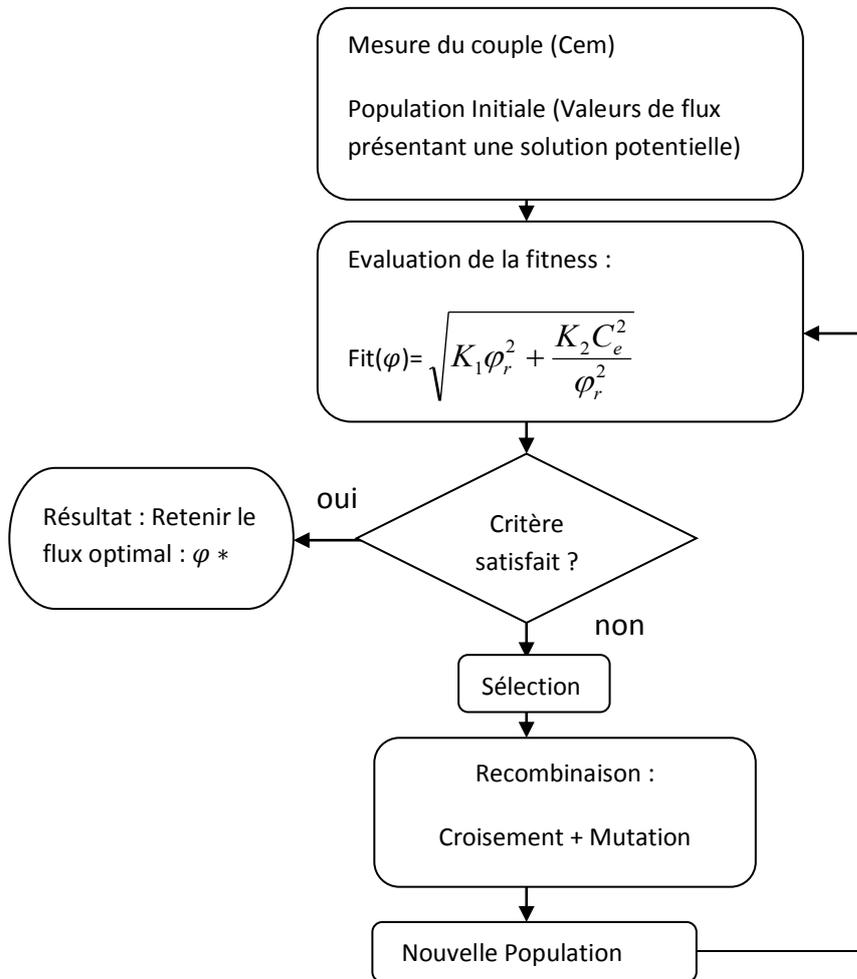
Comme dans tout algorithme itératif, il faut définir un critère d'arrêt. Celui-ci peut être formulé de différentes façons parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Arrêt de l'algorithme lorsque le résultat atteint une solution satisfaisante.
- Arrêt s'il n'y a pas d'amélioration pendant un certain nombre de générations.
- Arrêt si un certain nombre de générations est dépassé.

#### **3.4.1.2 Génération du flux optimal par algorithmes génétiques**

Alors que le courant en quadrature impose à la MAS d'assurer un fonctionnement à la puissance maximale générée par le système de conversion d'énergie éolienne SCEO. La composante directe du courant de référence est issue d'une régulation de la boucle du flux dont le flux de référence est le flux optimal qui est le résultat de calcul par les algorithmes génétiques qui selon la puissance de référence de la machine impose un flux qui minimise les pertes de la machine et améliore son rendement. En effet pour des vitesses de vent faibles, nous aurons un couple de charge faible et le fait de maintenir le flux à son niveau nominal n'offre pas un fonctionnement optimal du point de vue énergétique. Cette stratégie exige la connaissance du couple de la machine pour chaque vitesse de vent par mesure ou estimation.

La figure 3.21 représente l'organigramme de génération du flux optimal par algorithmes génétiques.



**Figure 3.21 Organigramme de génération du flux optimal par algorithmes génétiques.**

#### 4. Conclusion

Dans ce chapitre, une description explicite des stratégies de commande du système de dessalement a été décrite. Les différents algorithmes proposés permettent le contrôle des différents étages de conversion pour atteindre les objectifs annoncés à l'introduction.

## 4.1 Introduction

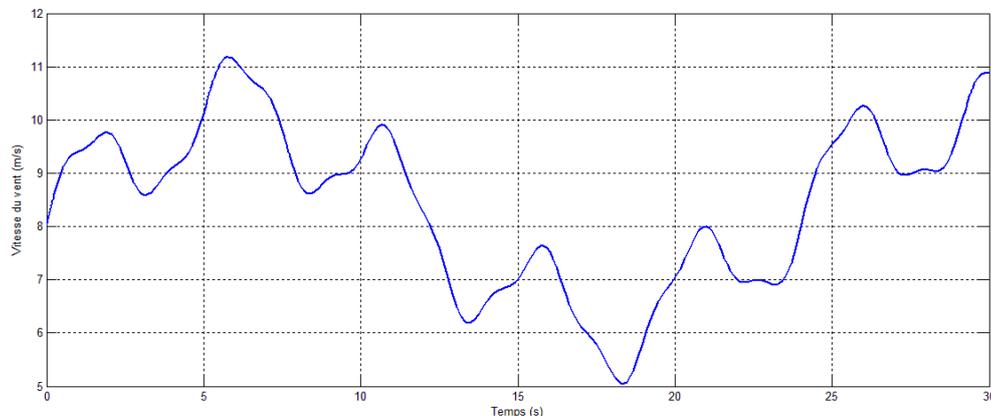
Dans le présent chapitre, nous présentons les résultats de simulation pour mettre en exergue les performances du système issues des lois de contrôle décrites dans le chapitre précédent. Comme le vent est la grandeur d'entrée de tout le système et vu sa nature variable, nous avons adopté un profil de vent donné en annexe ayant une vitesse moyenne de 8m/s. Cette vitesse permettra de visualiser les deux modes de fonctionnement de l'aérogénérateur.

Nous présentons d'abord les résultats de simulation de l'aérogénérateur en comparant la performance de la commande par mode glissant d'ordre deux à celle des régulateurs PI. Ensuite, on présente les résultats de la commande vectorielle du moteur asynchrone en comparant le fonctionnement à flux nominal à celui du flux optimal issu du calcul par algorithmes génétiques. En dernier lieu, nous comparons les résultats des deux fonctionnements pour la pompe dont les grandeurs de sortie sont la pression et le débit et le module d'osmose inverse dont les grandeurs de sortie sont le perméat et la concentration.

Par souci de clarté des résultats, la puissance et les courants sont pris en valeur absolue.

## 4.2 Résultats de simulation du système pour un vent moyen.

La figure 4.1 représente le profil d'un vent moyen pris comme grandeur d'entrée du système et dont la vitesse moyenne est de 8m/s.



**Figure 4.1 Profil du vent moyen**

### 4.2.1 Résultats de simulation de l'aérogénérateur

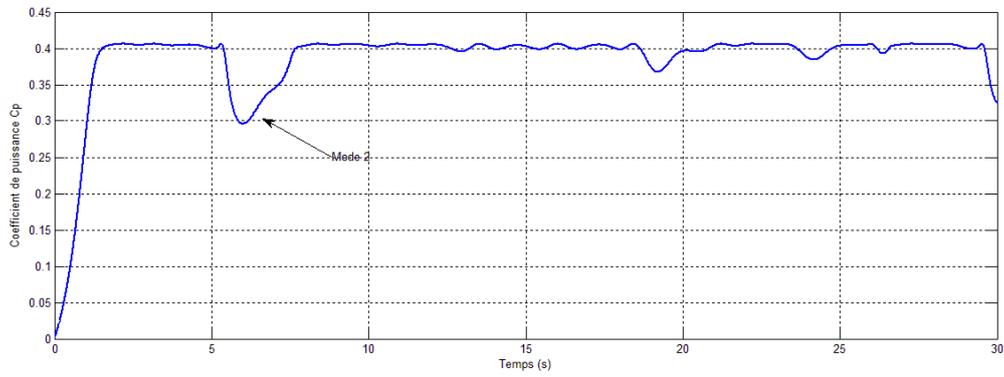


Figure 4.2 Allure du coefficient de puissance  $C_p$

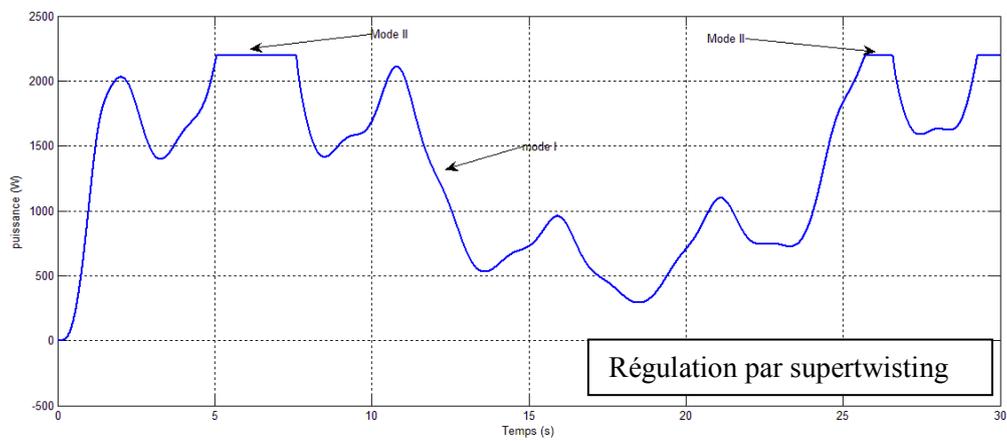
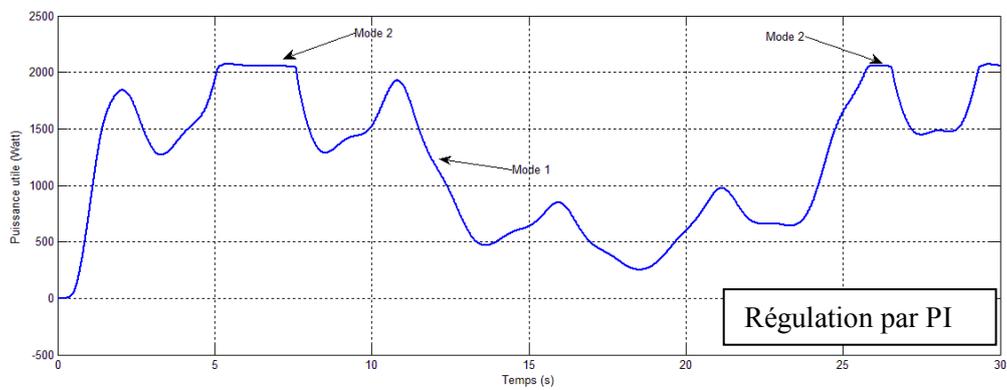
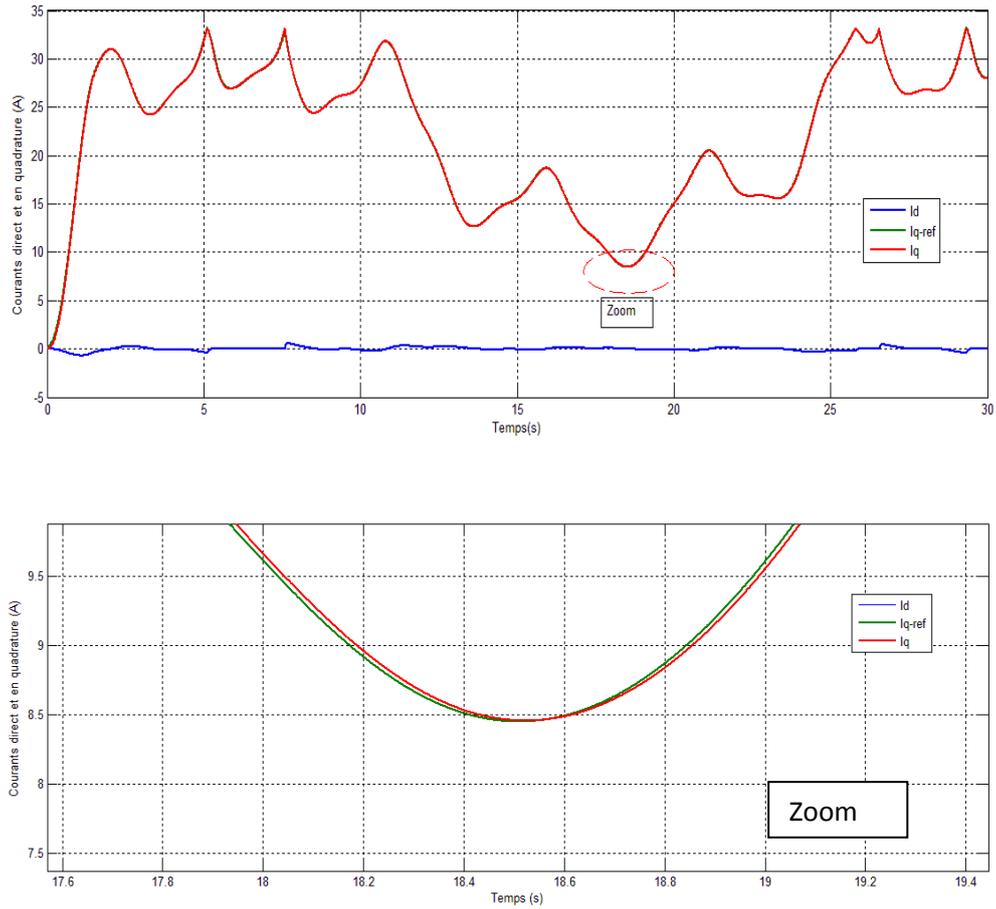
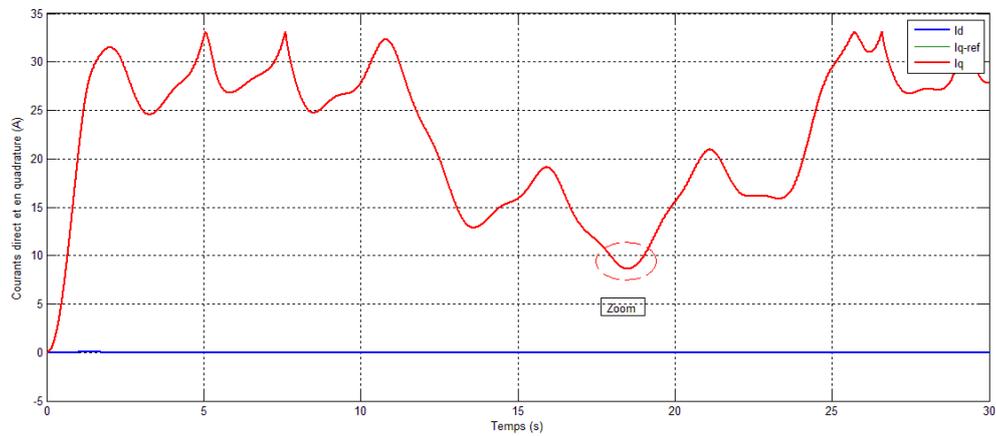
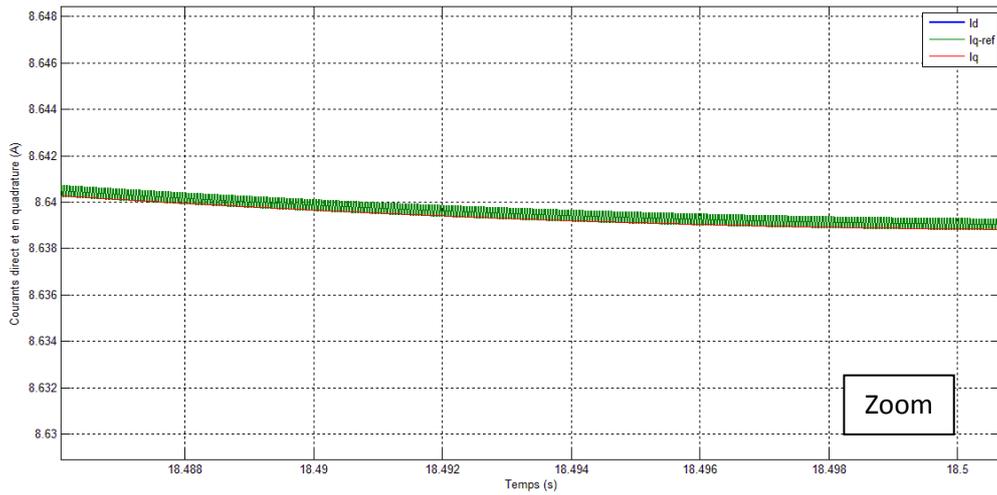


Figure 4.3 Allure de la Puissance fournie par la GSAP

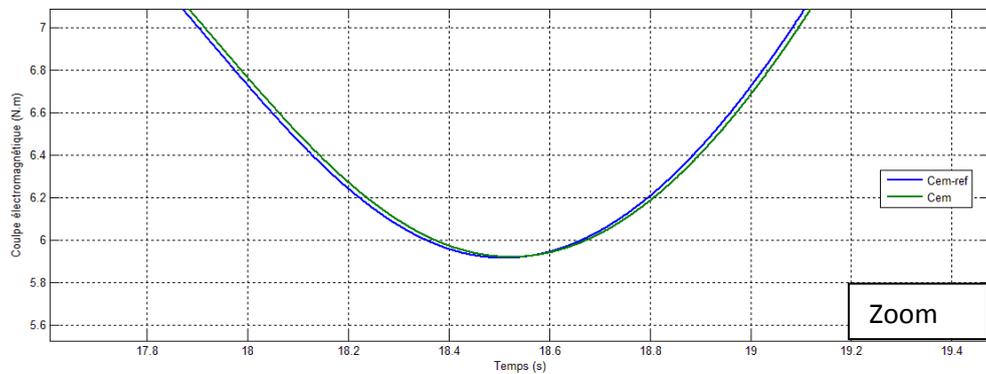
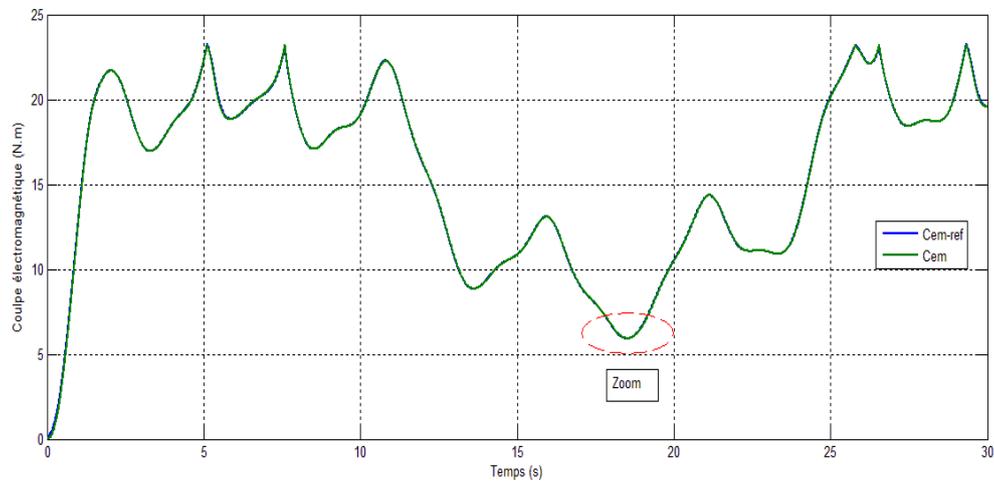


**Figure 4.4** Allure des courants direct et en quadrature(régulateurs PI)

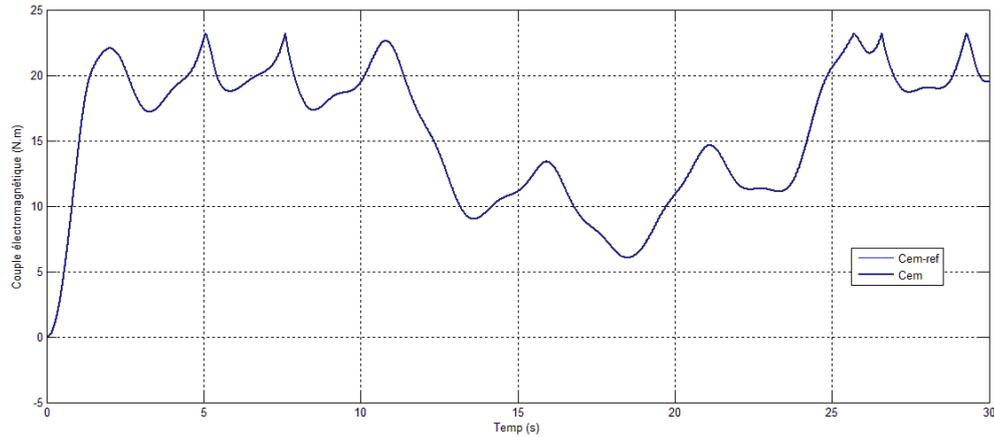




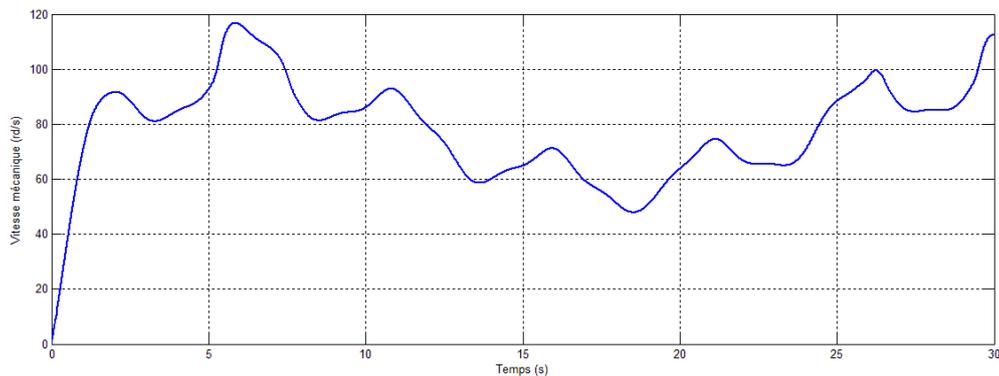
**Figure 4.5** Allure des courants direct et en quadrature(régulation par supertwisting)



**Figure 4.6** Allure du couple electromagnétique(régulateur PI)



**Figure 4.7** Allure du couple électromagnétique (régulation par supertwisting)



**Figure 4.8** Allure de la vitesse de la GSAP

La figure 4.2 montre l'allure du coefficient de puissance  $C_p$  qui durant le **mode de fonctionnement I** se maintient en permanence à sa valeur maximale qui est de l'ordre de 0.4061 par le contrôle du courant  $I_q$  de la GSAP. Cela conduit à conclure que la GSAP fonctionne au mode MPPT.

La figure 4.3 montre la puissance générée par la GSAP qui montre clairement les deux modes de fonctionnement de l'aérogénérateur. Alors qu'en **mode I**, la puissance suit l'allure du vent, elle se maintient à sa valeur nominale aux pertes près en **Mode II** avoisinant les 2.2 kW quand la vitesse du vent dépasse la valeur de 10 m/s. En comparant les deux approches de régulation, on remarque que la régulation par supertwisting est sans dépassements en **mode de fonctionnement II** alors que pour la régulation par PI, des petits dépassements sont remarquables sur l'allure de la puissance.

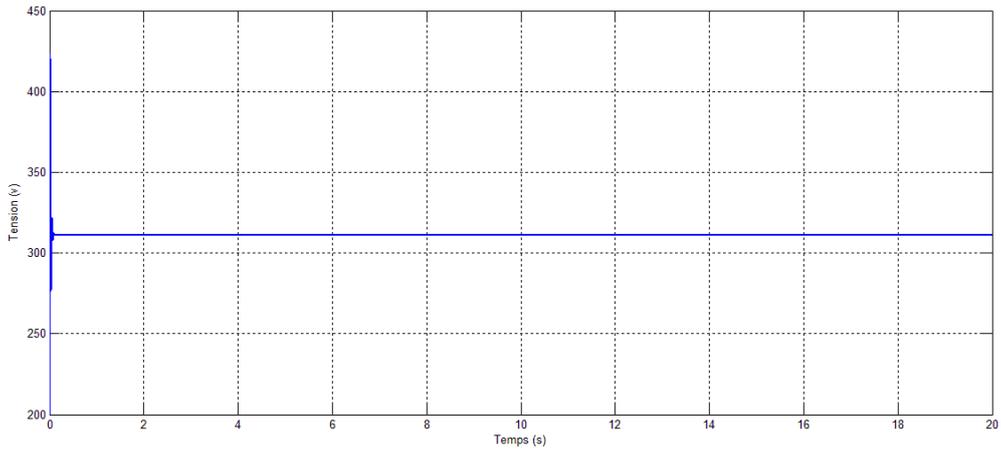
Sur les figures 4.4 et 4.5, l'allure des courants  $I_d$  et  $I_q$  met en évidence l'orientation du flux de la GSAP. Le courant direct  $I_d$  est maintenu à sa valeur nulle et le courant en quadrature prend l'allure du profil du vent. Une comparaison entre les deux approches de régulation permet de constater des erreurs statiques sur l'allure du courant  $I_d$  dans la régulation par PI. Cela est un inconvénient de ces régulateurs qui suivent mal les transitions rapides. Ces erreurs sont éliminées par la commande par mode glissant d'ordre deux (supertwisting). Un zoom sur le courant en quadrature  $I_q$  et sa référence  $I_{q-ref}$  fait constater une erreur statique entre le courant et sa référence pour la régulation par PI. Cependant pour la commande par mode glissant d'ordre deux, le courant  $I_q$  suit parfaitement sa référence.

Les figures 4.6 et 4.7 montrent l'évolution du couple électromagnétique du générateur synchrone à aimants permanent poursuivant le couple de référence qui impose le fonctionnement en Mode MPPT. Un zoom sur l'allure du couple électromagnétique régulé par PI permet de remarquer une erreur entre le couple électromagnétique et sa consigne. Alors que le couple électromagnétique régulé par mode glissant supérieur suit parfaitement sa référence. Cela prouve la robustesse de cette commande dans les entraînements à vitesse variables par rapport aux régulateurs PI.

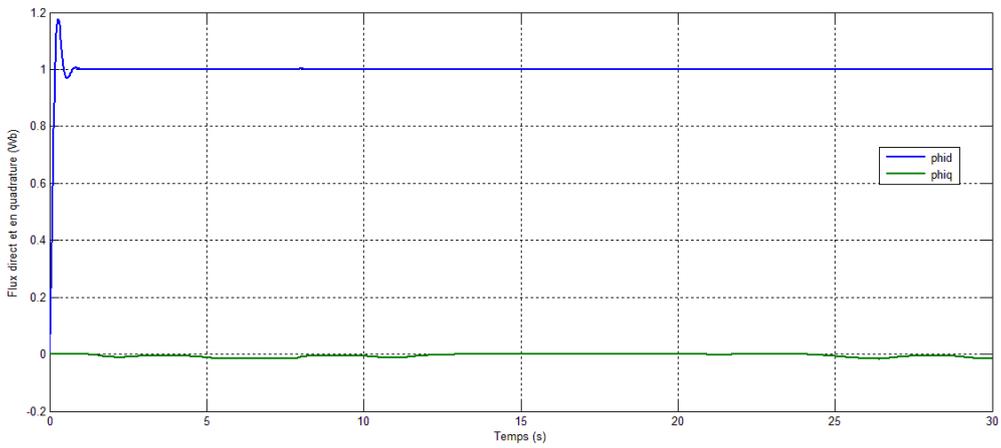
La figure 4.8 montre l'allure de la vitesse de la GSAP qui suit l'allure du profil du vent. A l'instant  $t=5s$ , la vitesse du vent atteint la valeur de 10m/s et la GSAP arrive à sa vitesse nominale qui est de l'ordre de 900 tr/mn.

#### 4.2.2 Résultats de simulation du moteur asynchrone

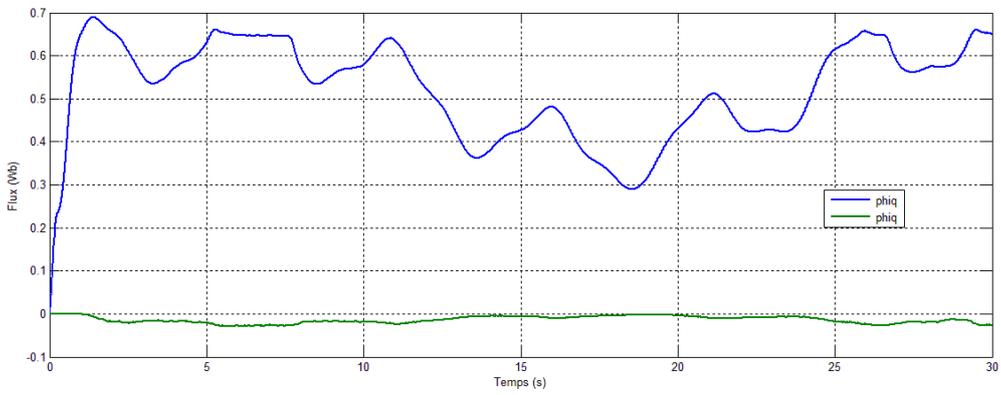
*Les résultats suivants présentent la réponse de la MAS pour le même profil du vent (Figure 4.1). La puissance générée par le système de conversion d'énergie éolienne est la grandeur d'entrée pour le moteur asynchrone.*



**Figure 4.9 Tension au bus continu**



**Figure 4.10 Orientation du flux (Fonctionnement à flux nominal)**



**Figure 4.11 Orientation du flux (Fonctionnement à flux optimal)**

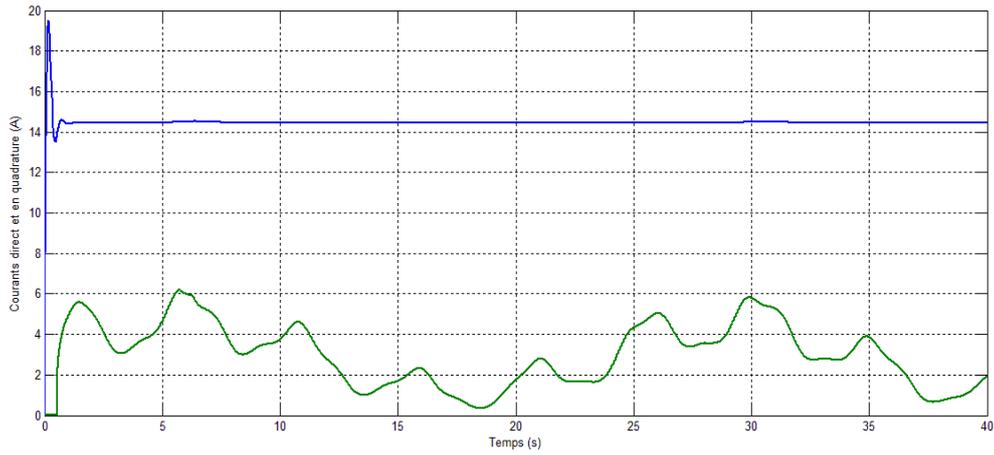


Figure 4.12 Allure des Courants direct et en quadrature (Fonctionnement à flux nominal)

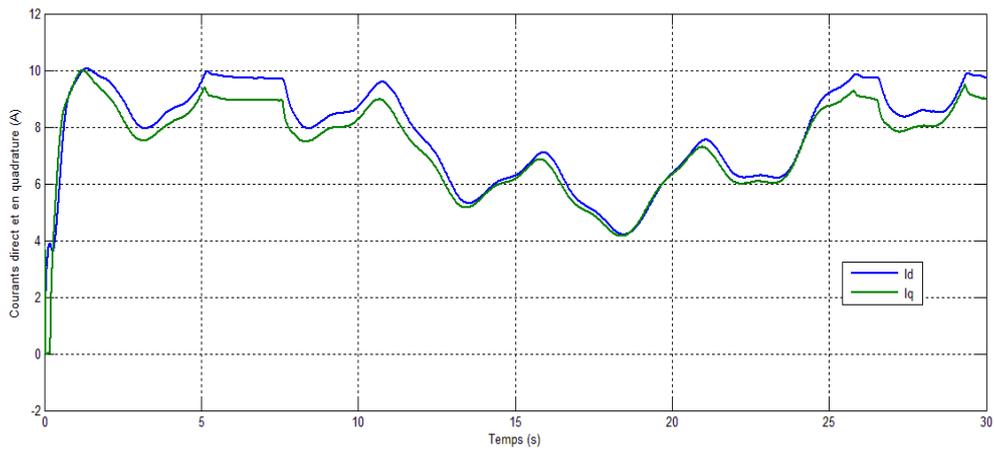


Figure 4.13 Allure des Courants direct et en quadrature (Fonctionnement à flux optimal)

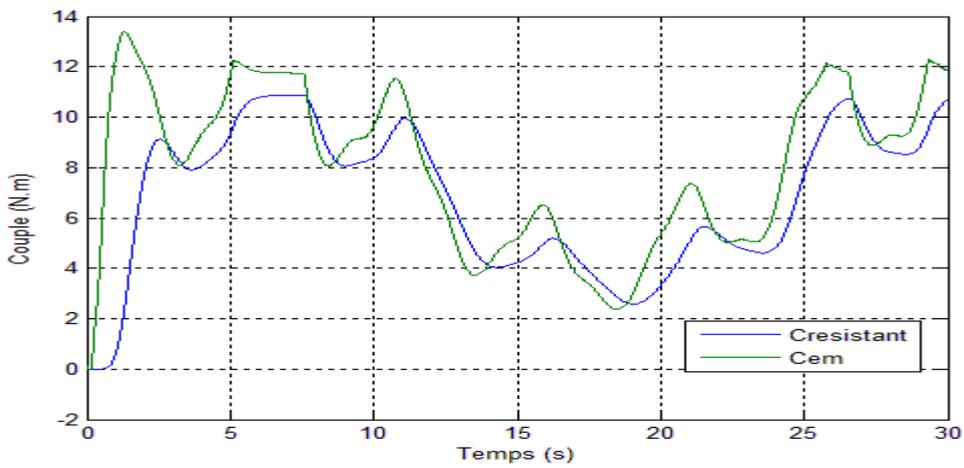
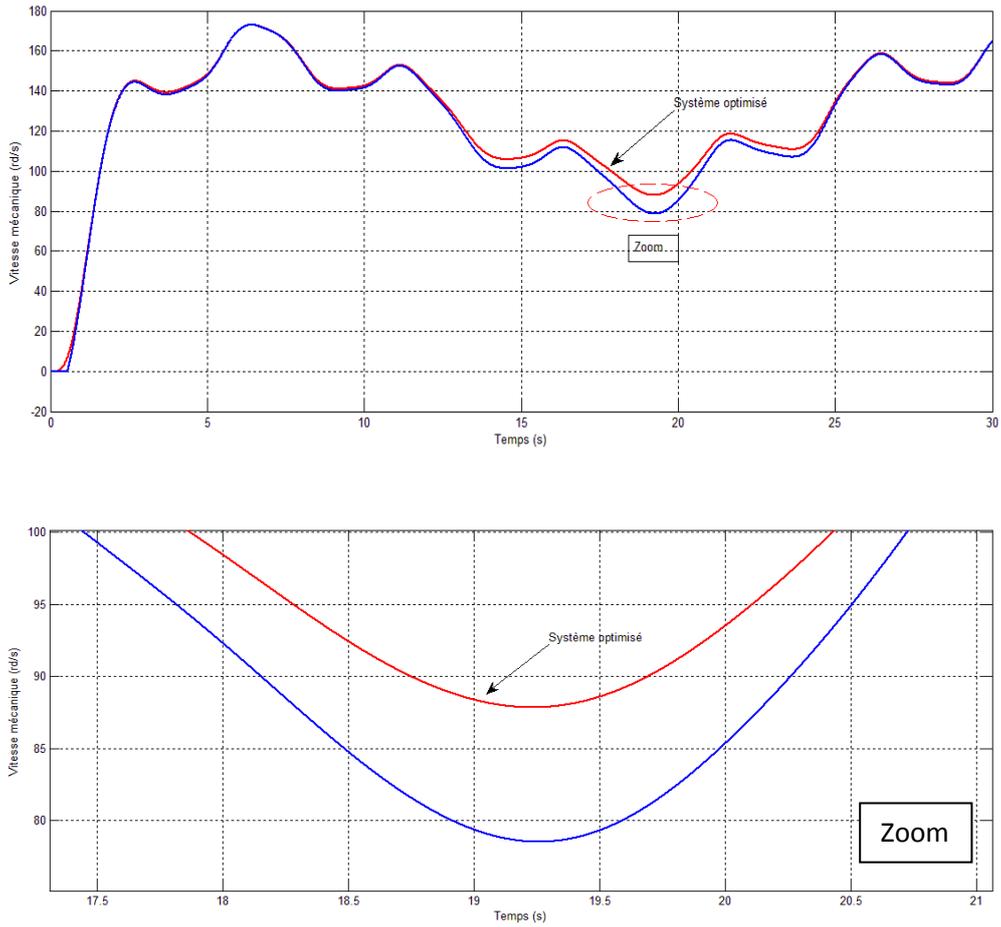
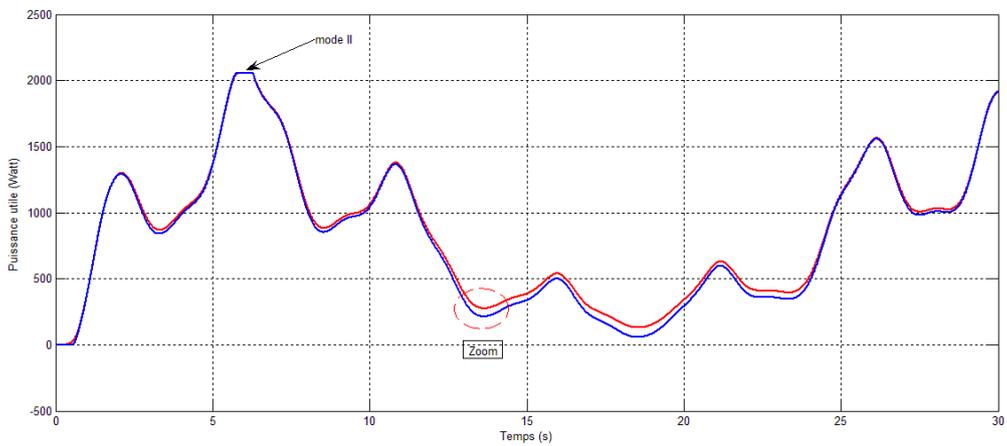
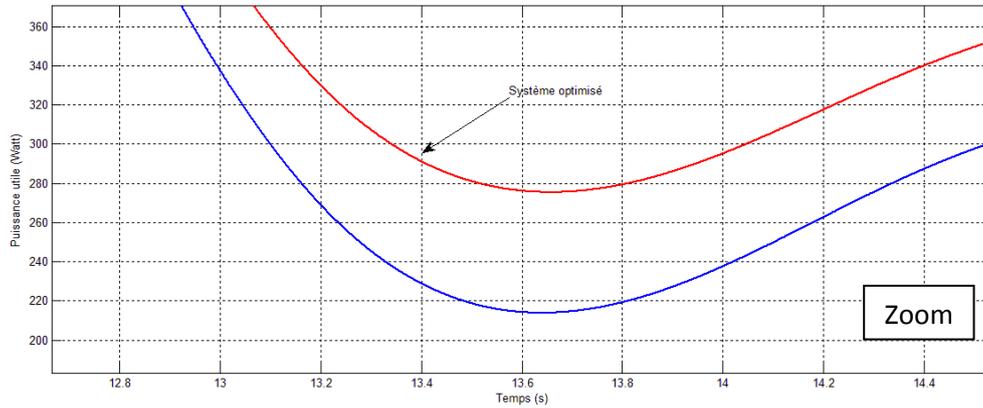


Figure 4.14 Allure du couple électromagnétique et du couple résistant

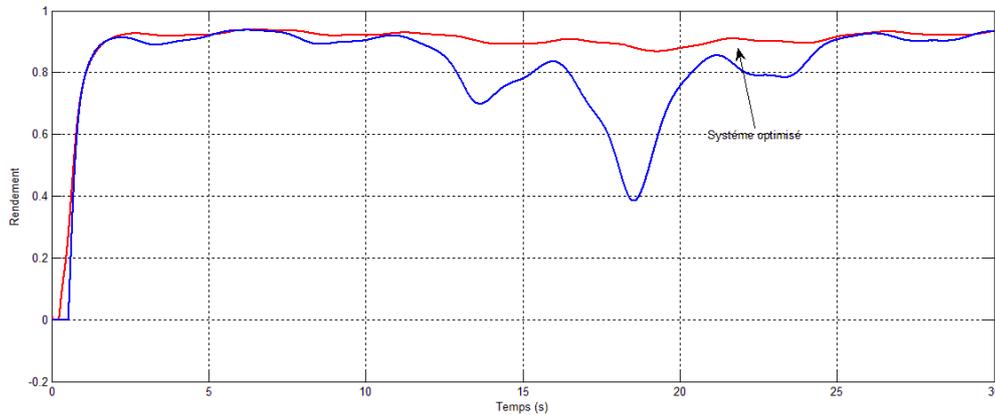


**Figure 4.15** Allure de la vitesse mécanique du moteur asynchrone





**Figure 4.16** Allure de la puissance utile du moteur asynchrone



**Figure 4.17** Allure du rendement du moteur asynchrone

La figure 4.9 montre l'allure de la tension au bus continu. Il est remarquable qu'elle se maintient à sa valeur de référence constante pour assurer le transit de la puissance à l'entrée du bus continu vers le moteur asynchrone.

Les figures 4.10 et 4.11 démontrent l'orientation du flux du moteur asynchrone selon l'axe direct. La composante du flux sur l'axe q est nulle pendant les deux fonctionnements (flux constant et flux variable). Nous pouvons remarquer sur la figure 4.11 que le flux direct  $\varphi_{dr}$  est variable et suit sa trajectoire optimale qui est imposée par les algorithmes génétiques. Cependant, la figure 4.12 montre que le flux direct est maintenu à sa valeur nominale (1 Wb) pour le fonctionnement à flux constant. Des erreurs statiques sont remarquées sur l'allure du flux en quadrature. Cela est dû à un petit couplage en transitoire.

Les figures 4.12 et 4.13 représentent les courants direct et en quadrature pendant les deux fonctionnements. Alors qu'à flux constant, le courant direct est constant en régime établi, il est variable pour le fonctionnement à flux variable. Pour ce fonctionnement les courants direct et en quadrature suivent une trajectoire qui minimisera le courant statorique du moteur asynchrone.

La figure 4.14 représente la trajectoire de fonctionnement du couple électromagnétique et le couple résistant. Nous pouvons remarquer que lors des variations brusques du vent, une différence notable entre le couple électromagnétique et le couple de charge car il compense le couple dynamique, le couple de charge et celui du frottement.

Sur la figure 4.15 fait apparaitre l'amélioration de la vitesse mécanique du moteur asynchrone due à l'optimisation du flux de la machine par les algorithmes génétiques. Nous constatons que l'amélioration est plus visible pour les faibles vitesses de vent. Cela s'explique par le fait que le couple de charge pour les faibles vents n'est pas très grand et ne demande pas que le flux soit à sa valeur nominale.

La figure 4.16 nous permet de distinguer la puissance utile du moteur asynchrone avant et après l'introduction des algorithmes génétiques. Le système optimisé fait apparaitre un gain en puissance qui accroît au fur et mesure que la vitesse du vent diminue. Cela s'explique par le fait qu'à vitesse réduite, les pertes de la machines sont diminuées en fonctionnant à flux optimal. Alors que le fonctionnement à flux nominal pour la faible vitesse entraine une dégradation du rendement de la machine. Un zoom montre un gain en puissance de l'ordre de 60 W pour une vitesse de vent de 6.23 m/s.

La figure 4.17 montre clairement l'effet de l'optimisation du flux rotorique sur le rendement du moteur asynchrone. Alors que pour le fonctionnement à flux constant, le rendement du moteur varie et chute jusqu'à la valeur de 0.4 pour les faibles vitesses de vent, il se maintient à une valeur optimale pour le fonctionnement à flux optimal et ce en dépit du fonctionnement à vitesse variable. Cela prouve l'efficacité de la méthode d'optimisation adoptée pour l'optimisation de la puissance utile du moteur.

### 4.2.3 Résultats de simulation de la pompe et le module d'osmose inverse

Dans ce qui suit sont présentées les performances de l'unité de dessalement à osmose inverse optimisées comparées à celles sans correction (Fonctionnement à flux constant).

Les résultats sont donnés pour deux concentrations différentes de l'eau saumâtre  $c_f = 3g/l$  et  $c_f = 8g/l$  en considérant une température  $T=35^\circ c$ .

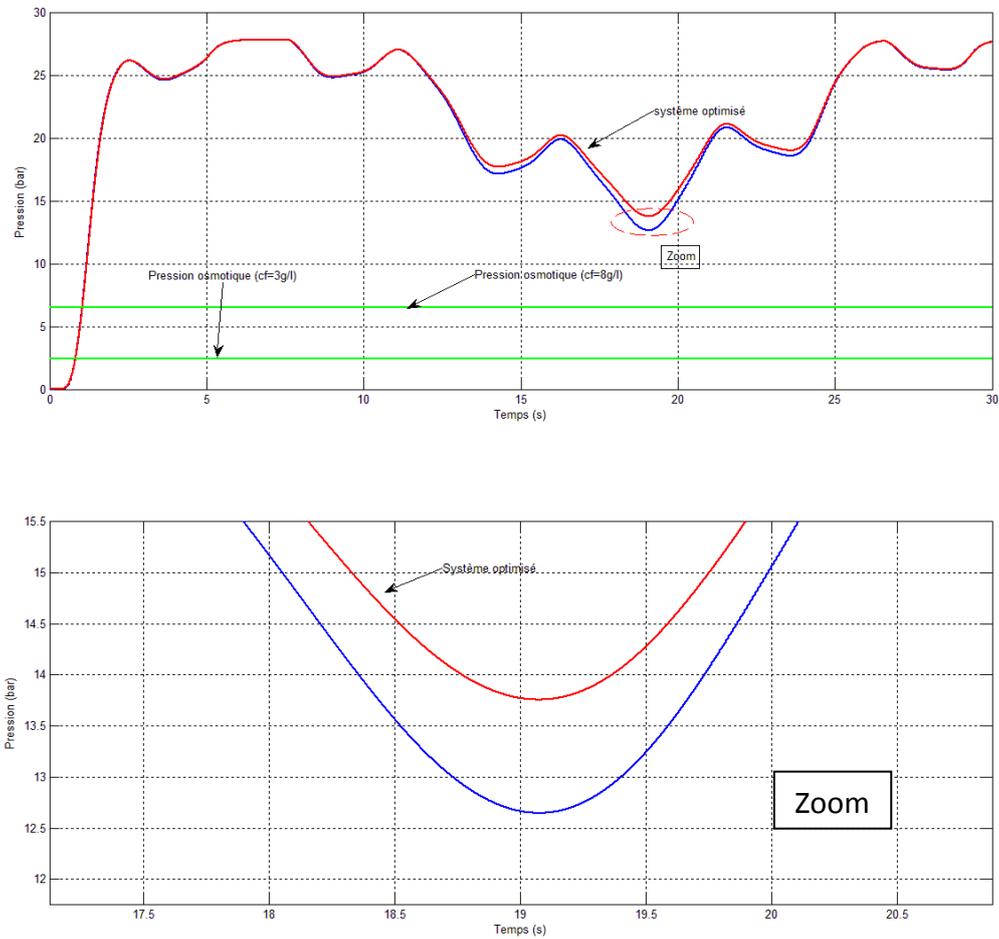
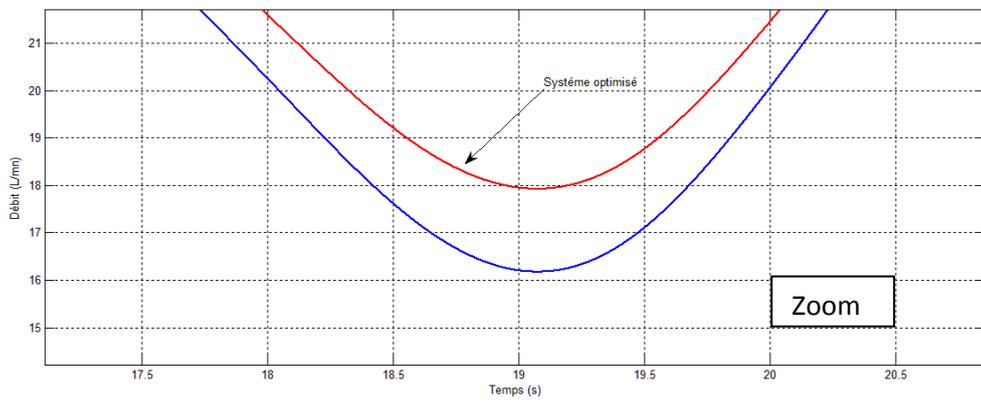
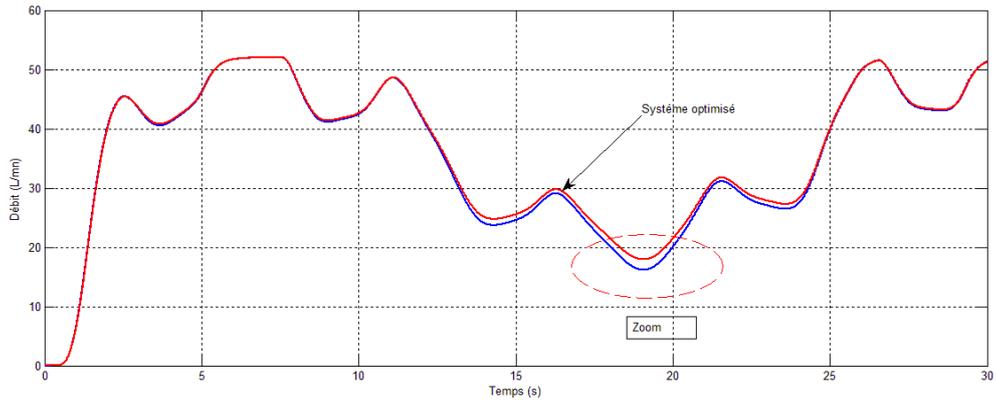
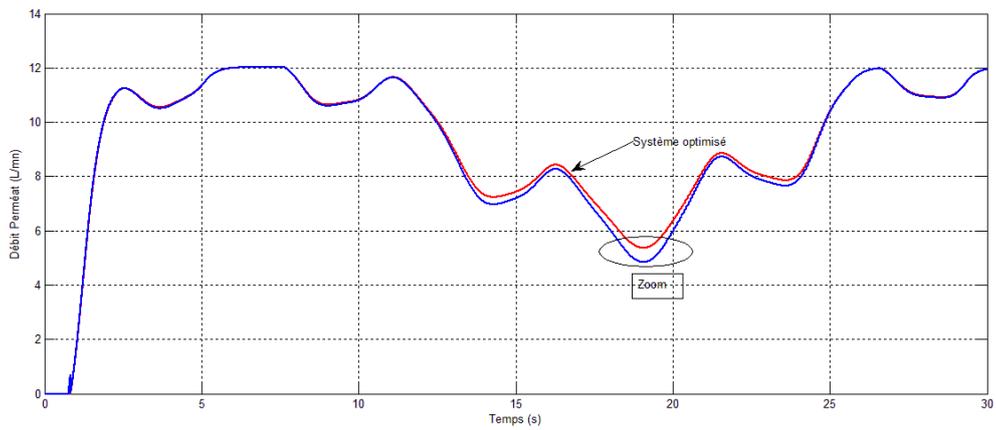
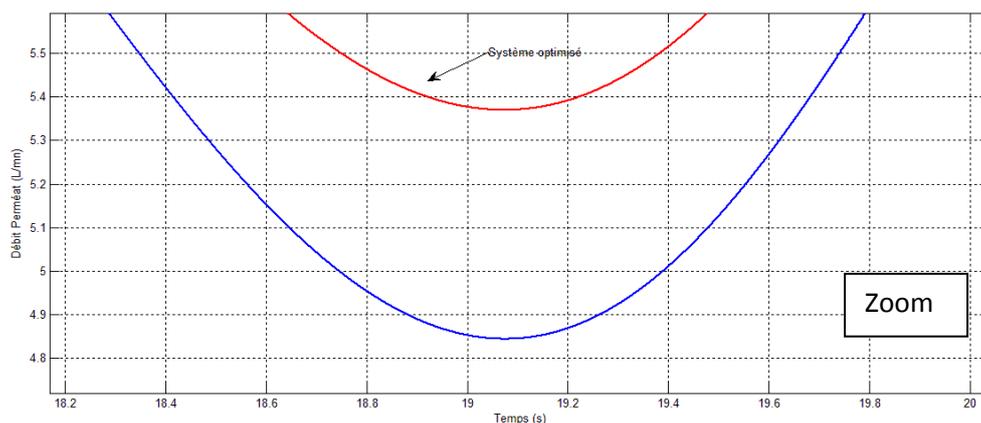


Figure 4.18 Allure de la pression de la pompe

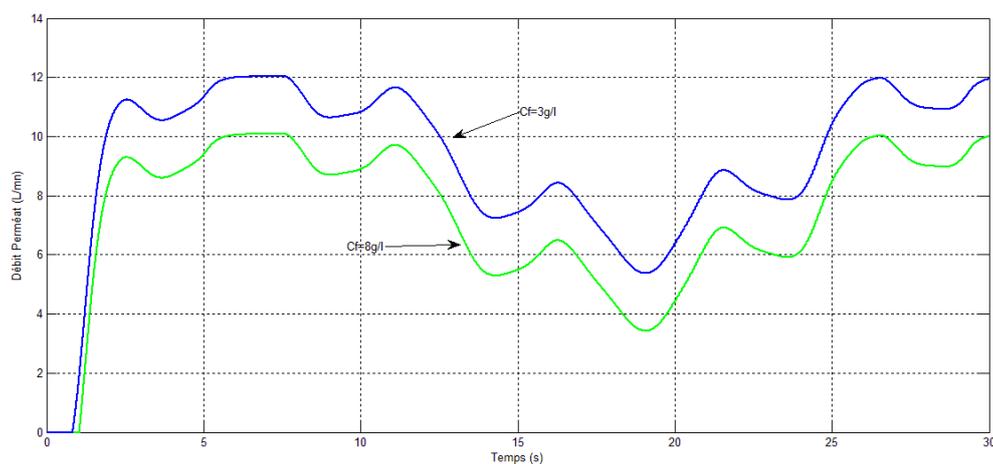


**Figure 4.19** Allure du débit de la pompe.

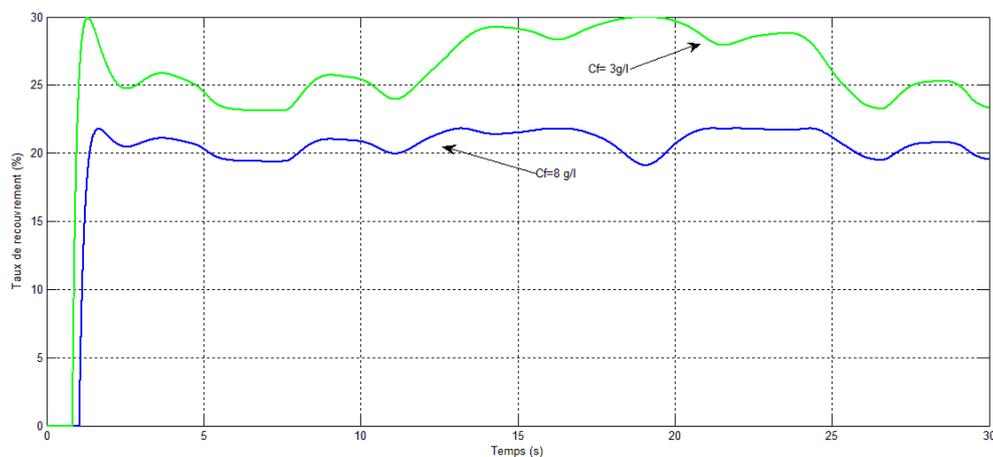




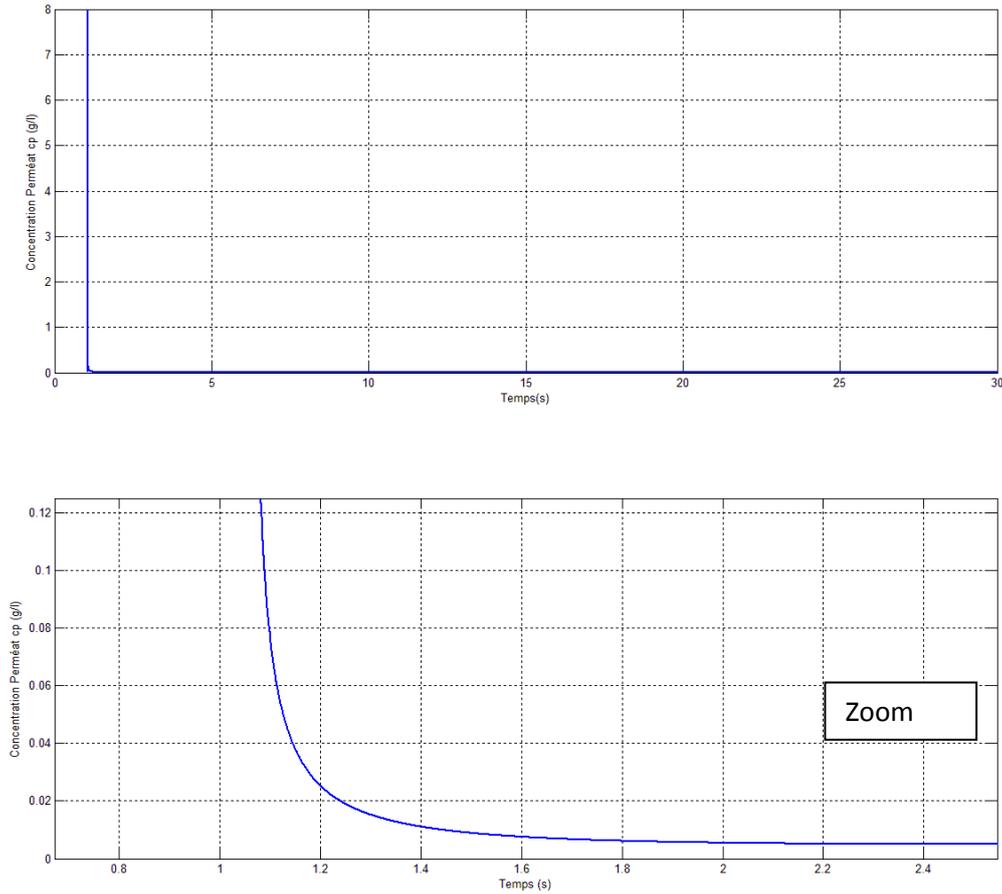
**Figure 4.20** Allure du débit du perméat pour  $C_f=3g/l$ .



**Figure 4.21** Allure du débit du perméat pour  $c_f=3g/l$  et  $c_f=8g/l$



**Figure 4.22** Allure du taux de recouvrement



**Figure 4.23 Concentration du perméat pour  $C_f=8g/l$**

La figure 4.18 fait apparaître une augmentation en pression de la pompe du système optimisé par rapport au système non corrigé. Cette amélioration de la pression est plus considérable pour les faibles vitesses de vent. Sur la même figure sont représentées les pressions osmotiques pour deux concentrations de l'eau saumâtre  $c_f = 3g/l$  et  $c_f = 8g/l$ . On peut remarquer que la croissance de la pression osmotique avec l'augmentation de la concentration. Un zoom sur l'allure de la pression pour la plus faible vitesse du vent permet de distinguer un surplus de pression de 1 bar environ.

Un gain en débit de pompage est aussi remarqué sur la figure 4.19 pour le système optimisé. Un zoom sur la plus faible vitesse de vent permet de constater un débit supplémentaire de 1.9 L/mn.

La figure 4.20 représente l'allure du débit du perméat pour une eau saumâtre de concentration  $C_f=3g/l$ . Nous constatons une amélioration du débit pour le système optimisé plus pour la vitesse de vent faible. Un Zoom sur l'allure du débit du perméat pour la plus

faible vitesse du profil du vent fait constater un gain de 0.52l/mn. Cette quantité représente un surplus de 748.8 litres par jour ce qui est une quantité considérable pour une petite installation.

Sur la figure 4.21 est présentée l'allure du débit du perméat pour les deux concentrations de l'eau saumâtre ( $c_f=3\text{g/l}$  et  $c_f=8\text{g/l}$ ). Il est remarquable que le débit est affecté par l'augmentation de la concentration de l'eau saumâtre qui est un critère qui intervient fortement dans le dessalement par osmose inverse. Le débit commence lorsque la pression de la pompe arrive à vaincre la pression osmotique.

La figure 4.22 présente l'évolution du taux de recouvrement pour les deux concentrations de l'eau saumâtre. Ce taux est dégradé par l'augmentation de la concentration de l'eau saumâtre du fait que le débit du perméat chute avec l'augmentation de la concentration de l'eau saumâtre.

La figure 4.28 montre l'allure de la concentration en sel du perméat. Le taux de sel rejeté par la membrane dépasse 99.5% qui agrée avec le critère donné par le constructeur de la membrane (Voir Annexe) .

Le tableau suivant résume des résultats numériques de l'optimisation des éléments de l'unité d'osmose inverse pour quelques vitesses du vent.

Vitesse du vent (m/s)		5.5	6	7	8	9
<b>Pression pompe</b> (bar)	Optimisée	<b>16.5705</b>	<b>18.1262</b>	<b>22.5010</b>	<b>24.4726</b>	<b>26.6791</b>
	Non optimisée	<b>15.8758</b>	<b>17.6205</b>	<b>22.3214</b>	<b>24.3571</b>	<b>26.6610</b>
<b>Débit pompe</b> (L/Mn)	optimisé	<b>22.6895</b>	<b>25.5685</b>	<b>34.9883</b>	<b>40.2041</b>	<b>47.3680</b>
	Non optimisé	<b>21.4638</b>	<b>24.6110</b>	<b>34.5509</b>	<b>39.8742</b>	<b>47.3006</b>
<b>Débit perméat</b> (L/Mn)	optimisé	<b>4.7620</b>	<b>5.5003</b>	<b>7.5751</b>	<b>8.5090</b>	<b>9.5529</b>
	Non optimisé	<b>4.4323</b>	<b>5.2604</b>	<b>7.4899</b>	<b>8.4543</b>	<b>9.5443</b>

*Tableau 4.1 Résultats de l'optimisation de l'unité d'osmose inverse*

### 4.3 Conclusion

Dans ce présent chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation de l'optimisation du système de dessalement à osmose inverse alimenté par un système de conversion d'énergie éolienne. Les approches de contrôle des différents étages du système et l'optimisation du flux par les algorithmes génétiques de la machine asynchrone ont amélioré la puissance à l'entrée de la pompe qui s'est répercuté sur sa puissance hydraulique en améliorant le débit du perméat à la sortie du module d'osmose inverse. Les résultats s'annoncent très satisfaisants surtout durant les faibles vitesses de vent où l'amélioration est très visible.

## Conclusion Générale

Dans cette étude nous avons présenté un système de dessalement éolien autonome. Ce système utilise un procédé de dessalement par osmose inverse alimenté par un système de conversion d'énergie éolienne. Nous avons modélisé les différents composants de notre système. Le but étant l'optimisation énergétique, nous avons pour cet effet adopté des stratégies de commande pour le contrôle des machines des différents étages de conversion. La commande de la source éolienne est basée sur la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) en contrôlant le couple de la machine synchrone à aimants permanents. Une approche par mode glissant d'ordre supérieur a été développée pour cette fin et un algorithme de supertwisting a fait l'objet de notre stratégie de contrôle. Au niveau de l'actionneur asynchrone, après une formulation du problème d'optimisation, nous avons adopté un fonctionnement à flux variable basé sur l'utilisation des algorithmes génétiques pour minimiser le courant statorique de la MAS, ce qui améliore son rendement et le rendement global du système. Les résultats de simulation mettent en exergue ces stratégies de commande par :

- L'augmentation de la puissance utile de la MAS.
- L'amélioration de la puissance hydraulique de la pompe
- Un surplus de débit du perméat à la sortie du module d'osmose inverse.

Toutefois, il est à noter que le système de dessalement à osmose inverse alimenté par une source d'énergie éolienne n'est pas sans inconvénients du fait que l'énergie éolienne est une source imprévisible. Cela conduit à penser à l'utilisation des sources hybrides comme solution à ce déficit et pousser des recherches sur les moyens de stockage de l'énergie qui peuvent apporter des améliorations aux systèmes de dessalement fonctionnant avec les énergies renouvelables.

## ANNEXES

**A- Dimensionnement de la turbine éolienne**

La puissance captée par l'éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et la section balayée par les pales. Pour cette étude, nous utiliserons une turbine entraînant une GSAP d'une puissance nominale de 2.2 KW. Nous considérons alors que la puissance nominale sera atteinte pour une vitesse de vent de 10 m/s.

Le rayon de pale de la turbine s'écrira ainsi :

$$R_t = \sqrt{\frac{P_n}{0.5\pi V^3 C_{pmax}}}$$

D'où  $R_t = 1.67 \text{ m}$

**B-Profile du vent [BEL 10] :**

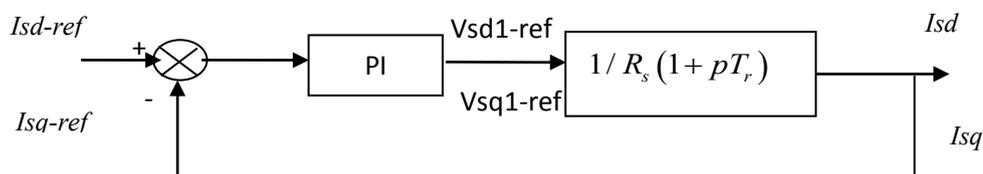
$$V = V_{moy} + 0.2x \sin(0.1047 t) + 2x \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2x \sin(3.6645t)$$

### C- Les paramètres des constituants du système de dessalement éolien

Composants	Paramètres	Symboles	Valeurs
Turbine éolienne	Rayon Pale Coefficient de puissance maximale Ratio de vitesse optimal Inertie Coefficient de Gain de la fonction du Cp $\lambda$ maximal de la fonction du Cp Coefficient de la fonction du Cp	R Cp-max $\lambda_{op}$ Jt G0 $\lambda_0$ a	1.47m 0.4061 6.8 0.089 0.19 8.08 1.56
GSAP	Puissance nominale Tension entre lignes fréquence Flux Inertie du rotor Coefficient de frottement Résistance stator Inductance Pôles multiplicateur	Pn Un f $\phi_r$ J F Rs Ld=Lq 2P G	2.2 Kw 220V 60 Hz 0.175wb 0.089 0.005 0.2 $\Omega$ 0.0085 H 8 7/3
MAS	Puissance nominale Tension entre lignes fréquence Inertie rotor Coefficient de frottement Résistance au rotor Inductance au rotor Inductance au stator Inductance mutuelle Résistance au stator Flux nominal	Pn Un f J F Rr Lr Ls M Rs $\phi_n$	2.2 Kw 220 V 60 Hz 0.089 0.005 0.816 $\Omega$ 0.071H 0.002H 0.06931 H 0.0816 $\Omega$ 1wb
Pompe	Parameters caractéristiques	a b c	0.0017 -0.0017 -0.0032
Bus continu	Capacité	C	1000 $\mu$ F

### D- Calcul des coefficients des régulateurs PI de la GSAP :

Nous adoptons la même méthode de calcul utilisée pour calculer les gains des régulateurs PI de la MAS en considérant le schéma de la boucle de contre action de la MSAP suivant :



La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$FTBO = \frac{K_i(\tau_r p + 1)}{p R_s(1 + p T_r)}$$

Avec :  $\tau_r = \frac{K_p}{K_i}$  et  $T_r = \frac{L_s}{R_s}$

Nous pouvons éliminer un pôle en choisissant  $\tau_r = T_r$ . La fonction de transfert deviendra alors :

$$FTBO = \frac{K_i}{p R_s}$$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit :

$$FTBO = \frac{1}{1 + p \frac{R_s}{K_i}}$$

La fonction de transfert est celle d'un système du premier ordre dont le temps de réponse

(à 5%) est :  $t_r = 3 \frac{R_s}{K_i}$

Pour déterminer les gains du régulateur  $K_p$  et  $K_i$ , on choisit un temps de réponse plus rapide que la constante de temps rotorique de la MSAP :

$$t_r = \frac{T_r}{10} .$$

Les résultats de calcul donnent :

$$K_p = 6 \qquad K_i = 141.1765$$

**E- Coefficients d'inégalité de l'algorithme du mode glissant d'ordre deux :**

$$\Phi_1 = \Phi_2 = 2 \ ; \ \alpha_1 = 0.02 \ , \ \alpha_2 = 0.02 \quad \beta_1 = 0.02 \ , \ \beta_2 = 0.02 \ , \ k = 0.4$$

$$\Gamma_m = 110 \ ; \ \Gamma_M = 130$$

**F-Coefficients des régulateurs PI de la MAS :****a-Régulation du flux**

En choisissant un coefficient d'amortissement optimal  $\xi = 0.7$ :

$$K_{p1} = 1.4286 \quad K_{i1} = 336.9363$$

**b-Régulation des courants Id et Iq :**

$$K_p = 1.35 \quad K_i = 149.33$$

**G-Coefficients du régulateur PI de la tension au bus continu**

$$K_{pdc} = 6.3 \times 10^{-6} \quad K_{idc} = 0.162$$

**H-Membrane Toray TM 710 :**

<b>Surface active S (m<sup>2</sup>)</b>	<b>7</b>
<b>Rejet minimal en sel (%)</b>	<b>99</b>
<b>Pression de service maximale (bar)</b>	<b>69</b>
<b>Débit minimal du Perméat (m<sup>3</sup>/jour)</b>	<b>5</b>
<b>Température maximale de l'alimentation (°c)</b>	<b>45</b>
<b>Facteur de perméabilité de référence de la membrane ( <math>K_g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}</math> )</b>	<b><math>7.0926 \times 10^{-10}</math></b>



## Références bibliographiques

- [ABB 05] Abderrahim Abbas ;”Simulation and analysis of an industrial water desalination plant .Chemical engineering and processing 44(2005) 999-1004 , ELSEVIER.
- [ADI 08] ADIRA Handbook; "*Autonomos desalination system concepts in rural areas with renewable energies*", MEDA water.
- [ALA 95] Alawaji, S, Smiai, MS, Rafique, S, Stafford, B; " *PV-powered water pumping and desalination plant for remote areas in Saudi Arabia*". Applied Energy (1995), 52 (2-3), 283-289.
- [ALS 98] Khawla A Al-Shayji; "*Modeling, Simulation, and Optimization of Large-Scale Commercial Desalination Plants*", These de doctorat de Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998
- [ARR 07] Mohamed Arrouf, “Optimisation de l’ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque ", Thèse de Doctorat de l’Université Mentouri Constantine 2007.
- [BAB 97] A. BABA « *Optimisation du flux dans la machine à induction par une commande vectorielle : Minimisation des perte* ». Thèse de Doctorat de l’Université PIERRE et MARIE CURIE (PARIS VI), Janvier 1997.
- [BAG 99] Baghli, L.;"*Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurone et des algorithmes génétiques*", thèse de doctorat de l'université Henry Poincaré,Nancy I.1999
- [BAR 09] Alex R. Bartman, Charles W. McFall, Panagiotis D. Christofides , Yoram Cohen;" *Model-predictive control of feed flow reversal in a reverse osmosis*";Journal of Process Control 19 (2009) 433–442.
- [BEL 10] S. Belakehal\*, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla;" *Modélisation et commande d’une génératrice Synchrones à aimants permanents dédiée à la conversion de l’énergie éolienne*";*Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1 (2010) 149 - 161*
- [BEN 09] S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, T. Ahmed-Ali et I. Munteanu, “High-Order Sliding Mode Control of a Marine Current Turbine Driven Permanent Magnet Synchronous Generator”,IEEE, Electric Mchines and Drives Conference 2009.

- [BET 04] A. Betka and A. Moussi, "Performance optimization of a photovoltaic induction motor pumping system", *Renewable energy*, vol 29, 2167–2181, 2004.
- [BLI 95] T. Blickle and L. Thiele, "*A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithms*", TIK-Report Nr. 11 (Version 2), December 1995, Switzzeland.
- [BOU 01] K .Bourouni et al. "*Water desalination by humidification and dehumidification of air: state of the art*". *Desalination* 2001:137, pp. 167-176.
- [BOU 07] A. Bouhelifa, " Les éléments d'optimisation d'une machine asynchrone en vue d'un contrôle vectoriel". Thèse de doctorat de l'Ecole National Polytechnique, 2007
- [BOU 11] K. Bourouni , T. Ben M'Barek , A. Al Tae; "*Design and optimization of desalination reverse osmosis plants driven by renewable energies using genetic algorithms*"; *Renewable Energy* 36 (2011) 936-950
- [CHI 94] A. Chipperfield, P. Fleming, H. Polhlheim et C Fonseca, "*Genetic Algorithm Toolbox User's Guide*", Version 1.2, Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield.
- [CIM 05] Cimuka Octavian Gabriel; "*Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens*" Thèse de doctorat de l'école centrale d'arts et de métiers de Lille.2005
- [DAM 03] J.A. Daminguez, S. Lorenzo, "Advanced control for pumping PV systems, INCA Modules", 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion May 11-18, 2003 Osaka, Japan.
- [DAV 08] Davigny.A ; "*Participation aux services système aux fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie*" Thèse de doctorat de l'école doctorale Sciences Pour l'Ingénieur de Lille.2008
- [DAW 10] Gihan Dawelbait, Toufic Mezher, Wei Lee Woon, Andreas Henschel" Taxonomy Based Trend Discovery of Renewable Energy Technologies in Desalination and Power Generation", IEEE, 978-1-890843-21-0/10,
- [DJE 08] Djebedjian B , Gad H, Khaled I et Abou Rayan M ; "*Optimization of reverse osmosis system using genetic algorithms technique*", Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008, Alexandria, Egypt
- [DOW 96] DOW Chemical Corporation. *FILMTEC Membrane Elements Guide*. (1996).

- [ELM 09] M. El Mokadem , V. Courtecuisse , C. Saudemont , B. Robyns , J. Deuse  
“Experimental study of variable speed wind generator contribution  
to primary frequency control” ; *Renewable Energy* 34 (2009) 833–844
- [EHM 96] Ehmman, H, Wobben, A, Cendagorta, M. PRODESAL "*Development  
and Pilot Operation of the First Wind Powered RO Sea Water  
Desalination Plant.*"; Proceedings of the Mediterranean Conference on  
RES for Water Production (1996),84-87.
- [ELA 04] El Aimani, S ;"*Modélisation de différentes technologies d'éolienne  
intégrés dans un réseau de moyenne tension*" Thèse de doctorat de  
l'école centrale et l'université des sciences et technologies de Lille.
- [FER 07] Fernando D. Bianchi, Hernán De Battista and Ricardo J. Mantz;” *Wind  
Turbine Control Systems Principles, Modelling and Gain Scheduling  
Design*” SPRINGER 2007.
- [FRI 02] L. Fridman and A. Levant, “Higher Order Sliding Modes,” in *Sliding  
Mode Control in Engineering*, New York: Marcel Dekker, 2002, ch. 3,  
pp.53–101.
- [GLA 98] Glater, J. "*The Early History of Reverse Osmosis Membrane  
Development.*"; *Desalination* (1998), 117,297-309.
- [HAN 94] Hanafi, A. "*Desalination using renewable energy sources*".  
*Desalination* (1994),97 (1-3), 339-352.
- [HOL 75] J.H. Holland, “*Adaptation in Natural and Artificial System*”, University of  
Michigan press, 1975.
- [HYU 09] Hyun-Je Oh, Tae-Mun Hwang, Sangho Lee; "*A simplified simulation  
model of RO systems for seawater desalination*"; *Desalination* 238  
(2009) 128–139
- [KAM 10] Kamal M. Sassi and Iqbal M. Mujtaba; "*Simulation and Optimization of  
Full Scale Reverse Osmosis Desalination Plant.*"; *Computer Aided  
Chemical Engineering, Volume 28, 2010, Pages 895-900*
- [KEL 04 ] Kelvin Tan, and Syed Islam, “Optimum Control Strategies in Energy  
Conversion of PMSG Wind Turbine System without Mechanical  
Sensors”; *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*,  
VOL. 19, NO. 2, JUNE 2004.

- [KIR 97] Kiranoudis, CT, Voros, NG, Maroulis, ZE. "*Wind energy exploitation for reverse osmosis desalination plants*". *Desalination* (1997), 109 (2), 195–209.
- [KOR 06] L. Kortobi, "*Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essais Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques*". Thèse de Magister de l'école national polytechnique. 2006
- [LIN 03] Jenny Lindblom, "*Solar Thermal Technologies for Seawater Desalination: state of the art*" report of University of Technology Lulea, Sweden.
- [LOP 06] Migue Lopez, "Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée". *Thèse de Doctorat en physique de l'Université de Paris-Sud 11*. 2006
- [LOU 04] J.P Louis, "Modèles pour la commande des actionneurs électriques", *Edition Lavoisier* 2004.
- [MAN 94] Manwell, JF, McGowan, JG. "*Recent renewable energy driven desalination system research and development in North America*". *Desalination* (1994), 94 (3), 229-241.
- [MAT 06] Mathioulakis, E, Beliossotis, V, Delyanis, E. "Desalination by using alternative energy: Review and stat of the art"; *Desalination* 203(2007) 346-365
- [MUJ 03] Mujtabab I.M. et Villafafila, A ; "*Fresh Water by Reverse Osmosis Based Desalination: Simulation and Optimization*," *Desalination*, Vol. 155, 2003, pp. 1-13.
- [MUR 06] Murthy, Z.V.P., et Vengal, J.C., "*Optimization of a Reverse Osmosis System using Genetic Algorithm*," *Separation Science and Technology*, Vol. 41, No. 4, 2006, pp. 647-663.
- [NER 95] Neris, AS, Giannakopoulos, GB, Vovos, NA; "*Autonomous wind turbine supplying a reverse osmosis desalination unit*". *Wind Engineering* (1995), 19 (6), 325-346.
- [POI 03] Frédéric POITIERS "Etudes et commande de génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne." Thèse de Doctorat de l'université de Nantes, 2003.
- [SCH 01] G. Schock and A. Miquel, "Mass transfer and pressure loss in spiral wound modules", *Desalination*, 64 (1087) 339–352.

- [SEL 92] S.I. SELEME & C. CANUDAS DE WIT. "Minimum energy operation condition of induction motors under torque control". Workshop on Motion Control for Intelligent Automation 92, Perugia, Italy, Vol.1, pp. 127-133, 27-29 October 1992.
- [SIN 10] Mukhtiar SINGH, "*Adaptive Network-Based Fuzzy Inference Systems For Sensorless Control of PMSG Based Wind Turbine With Power Quality Improvement Features.*", thèse de Doctorat de l'école de technologie, université de Québec, 2010.
- [SMI 00] Smigiel, E. Sturtzer, G. " *Modélisation et Commande Des Moteurs Triphasés, Commande vectorielle des moteurs synchrones, commande numérique par contrôleurs DSP*". Edition Ellipses, 2000.
- [SOU 75] Sourirajan, S., "*Reverse Osmosis*". Academic Press, New York, 1975.
- [SPI 66] K.S. Spiegler and O. Kedem, "Thermodynamics of hyperfiltration (reverse osmosis): criteria for efficient membranes, *Desalination*, 1 (1966) 311–326.
- [TAN 00] Taniguchi, M., et Kimura, S., "*Estimation of Transport Parameters of RO Membranes for Seawater Desalination,*" American Institute of Chemical Engineers Journal, Vol. 46, 2000, pp. 1967-1973.
- [TAN 09] *Chatkaew TANSAKUL*, "*Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse*", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse. 2009
- [THO 03] Murray Thomson.A ;" *Reverse-Osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics Without Batteries*" These de Doctorat Loughborough University. 2003
- [TUR 09] Turki, M.; Ben Rhouma, A.; Belhadj, J.; "*Experimental characterization of a Reverse Osmosis desalination process fed by hybrid power source.*" 2009, 6<sup>th</sup> Multi-conference on systems, Signals and Devices ; IEEE.
- [TUR 08] Turki, M.; Ben Rhouma, A.; Belhadj, J.; "*Control strategy of an autonomous desalination unit fed by PV-Wind hybrid system.*" J. Electrical Systems 4-2(2008):1-12.
- [VAL 08] VALANCIAGA, F et Puleston P F, "*High-Order Sliding Control for a Wind Energy Conversion System Based on a Permanent Magnet Synchronous Generator*" IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 23, NO. 3, SEPTEMBER 2008.

- [VIN 08] François Vince, François Marechal, Emmanuelle Aoustin, Philippe Bréant;" *Multi-objective optimization of RO desalination plants*";Desalination 222 (2008) 96–118.
- [VIV 03] Viviane RENAUDIN , "*Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres*", rapport de l'Université Henri Poincaré.
- [WIJ 95] J.G. Wijmans, R.W. Baker ;"*The solution-diffusion model: a review*", *Journal of Membrane Science*" 107 (1995) 1-21
- [WEI 11] Wei Qi, Jinfeng Liu, and Panagiotis D. Christofides,"*Supervisory Predictive Control for Long-Term Scheduling of an Integrated Wind/Solar Energy Generation and Water Desalination System*", IEEE,10.1109/TCST.2011.2119318,
- [YIL 03] Murat Yıldızoğlu, Thomas Vallée. " *Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie*". Université de Nantes 2003.
- [ZID 06] Kamel ZIDI, "*Intéactif d'aide au déplacement multimodal*", Thèse de Doctorat de l'école centrale de Lille.2006

## **Publications**

Le travail présenté dans ce mémoire a donné lieu à une publication :

### **CONFERENCE INTERNATIONALE AVEC COMITE DE LECTURE :**

Omar CHARROUF et Achour BETKA, “Optimisation d’un système de dessalement à osmose inverse alimenté par un système de conversion d’énergie éolienne” in Proceedings of the ICRE2012 (2<sup>nd</sup> International Conference On Renewable Energy), Béjaia 15/16 avril 2012.

**ملخص-** في هذا المستند، نقدم نظاماً لتحلية المياه بواسطة الطاقات المتجددة. والذي يتكون من نظام التناضح العكسي لتحلية المياه مع نظام تحويل طاقة الرياح ويقترح استراتيجية تحسين نظام الطاقة. ويستند هذا الأسلوب على انزلاق الوضع العالي من أجل التحكم في مولد الرياح الذي يستخدم توربينة الرياح مرتبطة بمولد متزامن بمغناطيس دائم ويتم التحكم في المحرك اللامتزامن. بواسطة تدفق مغناطيسي متغير اعتماداً على الخوارزميات الجينية و تعرض نتائج المحاكات بأداة SIMULINK / MATLAB للتحقق من صحة متانة وفعالية هذه الاستراتيجية

**كلمات البحث:** التناضح العكسي، تحلية مياه البحر وطاقة الرياح، التحسين

**Résumé** - Dans ce document, un système de dessalement renouvelable est présenté. Il associe un procédé de dessalement à osmose inverse à un système de conversion d'énergie éolienne. Une stratégie de contrôle est envisagée pour une optimisation énergétique du système. Cette méthode est basée sur un mode glissant d'ordre supérieur pour commander le générateur éolien qui utilise une turbine éolienne reliée à une machine synchrone à aimants permanents et un fonctionnement à flux variable du moteur asynchrone basée sur une optimisation par algorithmes génétiques . Les résultats de simulation par l'outil MATLAB/SIMULINK sont présentés pour valider la robustesse et l'efficacité de cette stratégie de commande.

**Mots clés :** osmose inverse, dessalement, énergie éolienne , optimisation

**Abstract** - In this paper, a renewable desalination system is presented. It combines results from a reverse osmosis desalination system with a wind energy conversion. A control strategy is proposed for optimizing energy system. This method is based on a higher order sliding mode to control the wind generator that uses a wind turbine connected to a permanent magnet synchronous machine and operating with a variable flux of induction motor based on genetic algorithms. The results of simulation with MATLAB / SIMULINK tool are presented to validate the robustness and effectiveness of this control strategy.

**Keywords:** reverse osmosis, desalination, wind energy, optimization