

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Commande électrique**

## **THÈME**

**Modélisation et Commande d'un Système de  
Dessalement D'eau Pilotée par une Machine  
Asynchrone**

*Préparé par : BOUSEMAT SAADIA  
ZEBBAR BAKHTA*

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>Mme LARIBI Souad</b>	<b>MCB</b>	<b>Président</b>
<b>Mr AIT MIMOUNE.H</b>	<b>MAB</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr MESSLEM Youcef</b>	<b>Pr</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Mr GOUICHICHE Abdelmadjid</b>	<b>MCB</b>	<b>Invité</b>

**PROMOTION 2018 /2019**

## REMERCIEMENTS :

*Nous remercions avons tout Allah, le plus puissant, pour nous avoir donnée le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles qui sont hissés au travers de notre chemin, tout au long de ce travail*

*A notre connaissance et nos remerciements vont ensuite aux personnes ci-après :*

*-Nous aimerions adresser nos plus fervent remerciements à nos parent, car nul autre qui eux se sont plus sacrifiés pour notre bien et l'accomplissement de nos projets. Ils ont fait de nous ce que nous somme aujourd'hui.*

*-Nos promoteurs Pr MESSLEM Youcef et Mr Zebbar Mohamed pour nous avoir proposé ce sujet, leurs précieux conseils tout le long de notre travail, leurs aides et leurs confiances.*

*-Messieurs les membres du jury pour leur patience et compréhension.*

*-Tout le personnel (enseignant et étudiant) du département de génie électrique pour m'avoir insufflé les connaissances à ce jour acquises.*

Introduction Générale : .....	1
<b>CHAPITRE I : Généralités sur les techniques de dessalement d'eau.</b>	
I.1. Introduction : .....	3
I.2. Procédés de dessalement : .....	3
I.2.1. Procédé de distillation par vapeur : .....	5
I.2.1.1. Evaporation à Effet Simple (Single Effect Evaporation) : .....	5
a) Distillation à simple effet.....	5
b) Distillation par compression de vapeur (Vapor compression ou VC) : .....	6
c) Distillation à Multiples Effets : .....	7
d) Distillation à multiples effets à alimentation parallèle : .....	8
e) Distillation Multi-flash : .....	8
I.2.2. Procédés membranaires : .....	9
I.2.2.1. Distillation Membranaire par Contact Direct (DMCD) : .....	9
I.2.2.2. : L'Air Gap Membrane Distillation (AGMD).....	10
I.2.2.3. La Sweeping Gas Membrane Distillation : .....	10
I.2.2.4. La distillation membranaire sous-vide (VMD ou DMV en français) : .....	11
I.2.2.5. L'osmose inverse : .....	11
A. Historique : .....	11
B. Description du processus et principe de fonctionnement : .....	13
C. Éléments constitutants d'une unité d'osmose inverse : .....	14
I.3. Pompe centrifuge dans le système de dessalement (RO) : .....	16
I.3.1. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge : .....	16
I.4. Contribution et objectifs : .....	17
I.5. Conclusion : .....	18
<b>CHAPITRE II : Modélisation d'une chaîne de dessalement d'eau par osmose inverse.</b>	
II.1. Introduction : .....	19
II.2. Configuration de système : .....	19
II.2.1. Sous système pompe-moteur : .....	19
II.2.1.1. Modélisation de la pompe centrifuge : .....	20
II.2.1.2. Moteur à induction : .....	20
a) Hypothèses simplificatrices : .....	20
b) Equations électriques de la machine : .....	21
c) Modèle dynamique de la machine à induction : .....	21
d) Equation de la machine à induction en régime linéaire : .....	22
e) Équations de la machine dans le plan Park : .....	22

II.2.3.1. La modélisation de la membrane par osmose inverse(RO) : .....	24
II.3. Stratégie de contrôle : .....	26
II.4. Conclusion : .....	27
<b>CHAPITRE III : Commande d'une chaine de dessalement d'eau par osmose inverse.</b>	
III.1. Introduction : .....	28
III.2. Contrôle vectoriel de la machine asynchrone : .....	28
III.2.1. Les équations de la machine asynchrone : .....	28
III.2.2. Principe de la commande vectorielle des moteurs asynchrones : .....	28
III.2.3. Commande vectorielle directe d'une MAS alimentée en tension : .....	29
III.2.4. Calcul des régulateurs classiques : .....	30
III.2.4.1. Régulation des courants : .....	30
III.2.4.1.1. Réglage du courant $i_{sd}$ : .....	30
a) Réglage de courant $i_{sq}$ .....	32
b) Régulation de la vitesse : .....	33
III.2.4.3. Réglage du flux $\Phi_r$ : .....	33
III.3. Effet de la pompe centrifuge sur le moteur à induction (MI) : .....	33
III.4. L'objectif de contrôle : .....	34
III.5. Linéarisation du modèle de la membrane (RO) : .....	35
III.6. Commande par retour d'état : .....	36
III.7. Commande par retour d'état et action intégrale des résultats : .....	38
III.8. Résultats de simulation : .....	39
III.9. Interprétation des résultats.....	41
III.10. Commande basé sur une fonction de Lyapounuv : .....	42
III.11. Résultats de simulation et interprétations : .....	43
III.12. Conclusion : .....	48
<b>CHAPITRE IV : Commande par mode glissant du système de dessalement d'osmose inverse.</b>	
IV.1. Introduction : .....	50
IV.2. Commande par mode glissant : .....	50
IV.2.1. Synthèse de la loi de commande : .....	50
IV.2.2. : Choix de la surface de glissement « S » .....	50
IV.2.3. Condition d'existence du mode de glissement .....	50
IV.2.4. Calcul de la commande : .....	51

IV.3. Applications de la commande par mode glissant dans un système de dessalement par osmose inverse : .....	52
IV.4. Résultats de simulation interprétations.....	53
IV.5. Comparaison entre les quatre commandes : .....	60
IV.6. : Conclusion : .....	60
Conclusion générale et perspective : .....	61
<b>Annexe</b>	
Annexe A : .....	63
Annexe B : .....	64
Nomenclatures :.....	68
Bibliographie :.....	70

<b>Figure. I.1:</b> Une installation de dessalement.....	4
<b>Figure. I.2 :</b> Classification des procédés de dessalement les plus utilisés.....	4
<b>Figure. I.3 :</b> Distillation à simple effet.....	6
<b>Figure I.4 :</b> Distillation par compression de vapeur .....	7
<b>Figure. I.5 :</b> Distillation à Multiples Effets.....	8
<b>Figure. I.6 :</b> Distillation Multi-flash .....	9
<b>Figure. I.7 :</b> Schémas de principe de la DMCD.....	10
<b>Figure. I.8 :</b> Schémas de principe de l'AGMD.....	10
<b>Figure. I.9 :</b> Schémas de principe de la SGMD .....	11
<b>Figure. I.10 :</b> Schémas de principe de la DMV.. .....	11
<b>Figure. I.11 :</b> Schéma de principe de l'osmose inverse.....	14
<b>Figure. I.12 :</b> Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse. ....	14
<b>Figure. I.13 :</b> Membrane en spirale.....	15
<b>Figure. I.14 :</b> Pompe centrifuge .....	16
<b>Figure. I.15 :</b> Constitution d'une pompe centrifuge . ....	17
<b>Figure. II.1 :</b> Système de dessalement par osmose inverse proposé.....	19
<b>Figure. II.2 :</b> Représentation schématique d'un moteur à induction .....	21
<b>Figure.II.3:</b> Représentation schématique de la transformation des enroulements réels en enroulements équivalents (Transformation de Park). ....	22
<b>Figure. II.4 :</b> Schéma général du système d'osmose inverse .....	25
<b>Figure. III.1 :</b> Référentiel lié au flux rotorique.....	29
<b>Figure. III.2 :</b> Commande vectorielle directe avec contrôle des courants et découplage par compensation .....	30
<b>Figure. III.3 :</b> Schéma fonctionnel du contrôle du courant $i_{sd}$ .....	30
<b>Figure. III.4 :</b> Bloc de réglage de la vitesse de rotation. ....	32
<b>Figure. III.5 :</b> Schéma blocs de réglage de flux. ....	33
<b>Figure. III.6 :</b> Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de la vitesse.....	34
<b>Figure. III.7 :</b> Schéma de la commande par retour d'état.....	37
<b>Figure. III.8 :</b> Schéma de la commande par retour d'état avec une action intégrale.....	39
<b>Figure. III.9 :</b> (a)vitesse de flux d'eau d'alimentation( $v_f$ ) (b) vitesse de flux d'eau de dérivation( $v_b$ ) (c) vitesse de flux d'eau de rétentat ( $v_r$ ) (d) vitesse de flux d'eau de perméat ( $v_p$ ) (e) Pression du système ( $P_{sys}$ ).. .....	40
<b>Figure. III.10 :</b> :(a) vitesse du variateur de fréquence ( $S_{VFD}$ ) (b) Couple résistif ( $C_r$ )et réponses de couple électromagnétique( $C_{em}$ ) (c) courant direct ( $i_{sd}$ )(d)Réponse en flux du rotor ( $\phi_d$ ) et ( $\phi_q$ ). .....	43

**Figure. III.11** : (a) vitesse de flux d'eau d'alimentation( $v_f$ ) (b) vitesse de flux d'eau de dérivation( $v_b$ ) (c) vitesse de flux d'eau de rétentat ( $v_r$ ) (d) vitesse de flux d'eau de perméat ( $v_p$ ) (e) Pression du système ( $P_{sys}$ )..... 44

**Figure. III.12** : Résultats de la réponse du système de (RO) en cas de variation de la concentration d'alimentation ( $v_f$ )(b) vitesse de flux d'eau de dérivation( $v_b$ ) (c) vitesse de flux d'eau de rétentat ( $v_r$ ) (d) vitesse de flux d'eau de perméat ( $v_p$ )(e) Pression du système ( $P_{sys}$ ). ..... 46

**Figure. III.13** : Résultats de la réponse du système d'osmose inverse dans des conditions bruyantes. (a) bruit injecté. (b) vitesse du variateur de fréquence ( $S_{VFD}$ ) (c) vitesse de flux d'eau d'alimentation ( $v_f$ )(d) vitesse de flux d'eau de dérivation ( $v_b$ )(e) vitesse de flux d'eau de rétentat ( $v_r$ ) vitesse de flux d'eau de perméat ( $v_p$ ) (g)Pression du système ( $P_{sys}$ )..... . 47

**Figure. IV.1** : (a) vitesse du variateur de fréquence ( $S_{VFD}$ ).(b) Couple résistif et réponses de couple électromagnétique( $C_{em}$ ) (c) Réponse en courant continu( $i_{sd}$ ) (d) Réponse en flux du rotor. ( $\phi_d$ ) et ( $\phi_q$ ) ..... 54

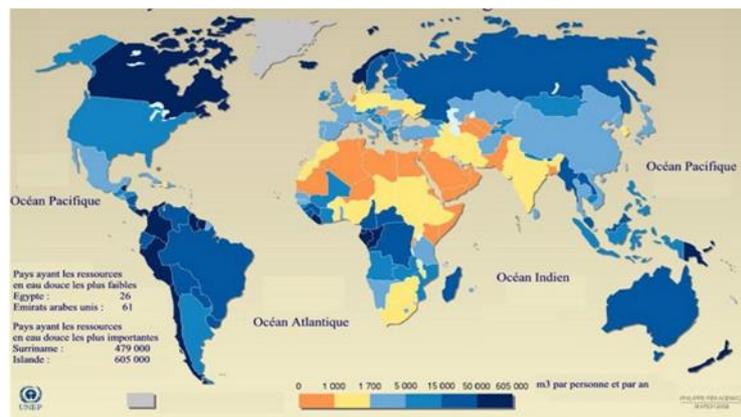
**Figure. IV.2** : (a)vitesse de flux d'eau d'alimentation( $v_f$ ) (b) vitesse de flux d'eau de dérivation( $v_b$ ) (c) vitesse de flux d'eau de rétentat( $v_r$ ) (d) vitesse de flux d'eau de perméat( $v_p$ ) (e) Pression du système ( $P_{sys}$ ).. ..... 55

**Figure. IV.3** :Résultats de la réponse du système de RO en cas de variation de la concentration en sel d'alimentation( $v_f$ )(b) vitesse de flux d'eau de dérivation( $v_b$ ) (c) vitesse de flux d'eau de rétentat( $v_r$ ) (d) vitesse de flux d'eau de perméat ( $v_p$ )(e) Pression du système ( $P_{sys}$ ).. ..... 56

**Figure. IV.4** :Résultats de la réponse du système d'osmose inverse dans des conditions bruyantes. (a) bruit injecté. (b) vitesse du variateur de fréquence ( $S_{VFD}$ ) (c) vitesse de flux d'eau d'alimentation( $v_f$ ) (d) vitesse de flux d'eau de dérivation( $v_b$ ) (e) vitesse de flux d'eau de rétentat ( $v_r$ )(f) vitesse de flux d'eau de perméat( $v_p$ ) (g)Pression du système ( $P_{sys}$ )..... 58

## Introduction Générale

L'eau est un élément vital et précieux pour la survie de toute être vivant. Le besoin de l'être humain en eaux potables ne cesse d'augmenter. Sa disponibilité est devenu un véritable défi que se fixent les autorités mondiales en générale et des organes gouvernementaux pour chaque pays. Les stratégies préconisent pour le futur s'il y a une guerre mondiale sa sera pour les besoins en eau. En effet, les besoins sont croissants en eau douce que ce soit pour la consommation quotidienne ou d'autres utilisations tel que l'agriculture. La répartition des ressources en eau est inégale comme on peut le constater sur la figure suivante :



Distribution de l'eau dans le monde.

Vue que la majorité de l'eau est salé, le dessalement d'eau de mer devient un domaine important en particulier dans les pays méditerranéens, dans le golfe persique et la péninsule arabique. Ainsi les recherches faites dans ce sens visent à approvisionner la population en eau avec un meilleur rapport qualité/prix.

Les techniques de dessalement conventionnel sont diverses, soit par distillation ou par contact membranaire. La technique de dessalement par osmose inverse représente le choix le plus raisonnable et le plus économique actuellement.

Un système de dessalement par osmose inverse ou la chaine de dessalement est constitué essentiellement d'un groupe moteur\_pompe, et d'une membrane osmose inverse. Un contrôle approprié est alors nécessaire pour la maintenir en état de fonctionnement. Chaque partie de cette architecture sera présentée avec sa propre commande.

Les différentes stratégies de commande du système seront traitées. On note que les entrées et les sorties de chaque partie de la chaine sont imbriqués, ceux qui compliquent le contrôle et peut entraîner un dysfonctionnement de la chaine.

En premier temps, on abordera la commande du moteur à induction. La commande vectorielle permet d'après les études de publier une bonne maîtrise du couple qui lui est imposé par la pompe et parier au couple transitoire qui peuvent surgir tous le long de fonctionnement.

En deuxième temps on s'intéressera à la commande de la membrane à osmose qui présente des difficultés de commande dus à son modèle non linéaire. L'application de plusieurs commandes telle que la commande par retour d'état sans et avec action intégrale, commande basée sur une fonction de Lyapunov et la commande par mode glissant nous permettra de faire le meilleur choix. On note que ce dernier a fait objet de publication internationale au niveau du laboratoire LGEP durant l'année 2019 et qui présente une originalité significative dans ce domaine.

Le travail présenté dans ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre, met l'accent sur l'intérêt du sujet par rapport au développement durable qui touche notre pays en particulier. Nous avons présenté le problème du manque d'eau douce et l'alternative de dessalement pourrait être la meilleure solution vu l'abondance et la quantité quasi infinie de l'eau de mer.

Dans cette optique-là, nous avons présenté deux grandes familles de techniques de dessalement d'eau, dessalement par distillation et par contact membranaire, on a explicité et détaillé le processus de l'osmose inverse qui est l'objet de notre étude.

De plus, en exposant d'une manière détaillée chaque partie du système de dessalement d'eau (RO).

Dans le deuxième chapitre, la configuration du système de dessalement d'eau est présentée ainsi que la modélisation de ses différentes parties.

Dans le troisième chapitre, on a mis en évidence l'importance de la régulation des grandeurs de l'unité de production d'eau douce pour un meilleur rendement et de meilleures performances.

Dans une première étape, nous abordons la commande vectorielle puis nous linéarisons le système de dessalement d'eau par osmose inverse. D'autre part nous appliquant la commande par retour d'état sans et avec l'action intégrale.

Dans une deuxième étape, la commande basée sur une fonction de Lyapunov est exprimée, les résultats de simulation obtenus à l'aide de logiciel de simulation MATLAB/Simulink sont présentés.

Enfin, le dernier chapitre illustre une nouvelle application originale de la commande par mode glissant pour le système de dessalement d'eau par osmose inverse (RO). De plus, le système (RO) est intégré dans une chaîne complète contenant une alimentation directe et un moteur induction associé avec une pompe centrifuge. Cette commande a été conçue pour obtenir de bonnes performances dynamiques et assurer la robustesse en présence de bruits et d'incertitudes paramétriques tel que la variation de la qualité d'eau d'alimentation ( $C_{feed}$ ).

# Chapitre I

---

Généralités sur les techniques de  
dessalement d'eau.

---

## I.1. Introduction

L'eau de mer est la source d'eau la plus abondante sur notre planète. L'institut d'études géologiques des États-Unis (U.S. Geological Survey) (Gleick, 1996) a constaté que 96,5 % de l'eau de la Terre se trouve dans les mers et les océans et que 1,7 % de l'eau de la Terre se trouve dans les calottes glaciaires. Environ 0,8 % est considéré comme de l'eau douce [1]. Le pourcentage restant est constitué d'eau saumâtre, d'eau légèrement salée que l'on trouve comme eau de surface dans les estuaires et comme eau souterraine dans les aquifères salés. Les pénuries d'eau ont touché de nombreuses communautés, et les humains cherchent depuis longtemps une solution aux maigres réserves d'eau douce sur Terre. Les besoins de l'humanité en eau augmentent de façons exponentielles. La solution envisageable est le dessalement de l'eau de mer qui est abondante. Ce concept n'est pas nouveau ; l'idée de transformer l'eau salée en eau douce a été développée et utilisée depuis des siècles. Le dessalement est un procédé qui permet de produire de l'eau potable, en éliminant la majeure partie du sel dans l'eau (marin ou saumâtre). En outre, il peut traiter des eaux d'origines différentes : l'eau de mer (dont la concentration varie entre 35 et 49 g/l), les eaux saumâtres et les eaux souterraines (où la concentration en sel varie de 1 à 10 g/l) [2]. Les techniques les plus courantes de dessalement sont la distillation thermique et la technologie de membranes telles que l'électrodialyse inverse et l'osmose inverse. La technique de dessalement par osmose inverse représente le choix le plus raisonnable et le plus économique. Le coût de l'osmose inverse est devenu inférieur à celui de la distillation, avec l'apparition d'une nouvelle génération de membranes. Cette dernière produit plus de 40% de la production mondiale en matière de dessalement.

Dans ce chapitre nous allons décrire les différents procédés de dessalement employés actuellement dans l'industrie en général, où nous préciserons les différentes caractéristiques et le principe de fonctionnement de chaque procédé d'une manière explicite. Une attention particulière est donnée au procédé d'osmose inverse. En plus, nous allons présenter la pompe centrifuge avec son principe de fonctionnement, qui est une partie essentielle de la configuration globale du système de dessalement d'eau.

## I.2. Procédés de dessalement

Il existe plusieurs technologies de dessalement et plusieurs façons de les classer. Certains sont plus adaptés à un environnement donné que d'autres. Parmi ces technologies, il y a celles qui ont été implémentées à l'échelle industrielle avec des grandes capacités de production et ont connu des développements considérables afin de les rendre plus compétitifs et certains sont en cours de développement et ne peuvent être adaptés que pour des installations de faible capacité

La figure I.1 montre une installation de dessalement. On peut constater la partie commande représenté par l'armoire électrique, partie moteur-pompe et la partie hydraulique.

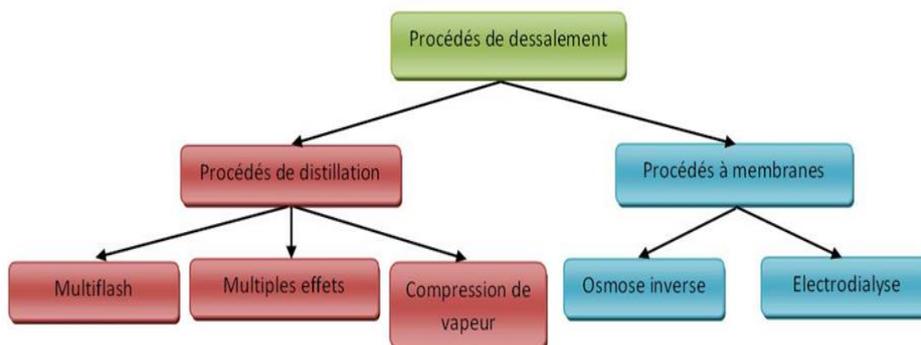


FigI.1 : Une installation de dessalement

Actuellement, cinq procédés de dessalement sont utilisés, regroupées en deux grandes familles [3]:

- ✓ Procédé de distillation par vapeur : avec changement de phase (distillation, congélation, extraction par formation d'hydrates solides...).
- ✓ Procédé à membrane : avec utilisation de membranes (électrodialyse, osmose inverse, procédé osmo-ionique...).

Le schéma de la figure I.2 présente les procédés de dessalement les plus utilisés :



FigI.2 : Classification des procédés de dessalement les plus utilisés

Il existe donc des procédés conventionnels (distillation thermique, osmose inverse, électrodialyse...) et d'autres procédés qui sont non conventionnels (distillation solaire, congélation, marais salants, cristallisation...).

Dans notre travail, un vocabulaire spécialisé est utilisé dont nous devons fournir la définition qui est donnée dans :

- ✓ Adsorption : est un phénomène de surface par lequel des atomes, des ions ou des molécules (adsorbats) se fixent sur une surface solide (adsorbant) depuis une phase gazeuse, liquide ou une solution solide.
- ✓ La perméabilité : la perméabilité d'un milieu poreux mesure son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression ou d'un champ de gravité.
- ✓ Perméat : Phase traversant la membrane lors de la filtration, appelé aussi filtrat.
- ✓ Retentât : Phase retenue par la membrane lors de la filtration.
- ✓ La diffusion : désigne la tendance naturelle d'un système à rendre uniforme le potentiel chimique de chacune des espèces chimiques qu'il comporte. La diffusion chimique est un phénomène de transport irréversible qui tend à homogénéiser la composition du milieu.
- ✓ La convection : désigne l'ensemble des mouvements internes (verticaux ou horizontaux) qui animent un fluide et qui impliquent alors le transport des propriétés des parcelles de ce fluide au cours de son déplacement. Ce transfert implique l'échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact, ou le déplacement de chaleur au sein d'un fluide par le mouvement d'ensemble de ses molécules d'un point à un autre.
- ✓ Module : Ensemble élémentaire d'une installation de séparation par membranes comprenant un ou plusieurs éléments filtrants (membranes) et les éléments nécessaires à leur insertion dans un procédé (carter, cadre, tuyauterie...). Il existe plusieurs types de modules (plan, tubulaire, fibre, creuse, spirale), qui correspondent aux différentes géométries de membranes (planes, tubulaires, fibres creuses).
- ✓ La sélectivité d'une réaction chimique spécifie la quantité de produit désiré formé par rapport au nombre de moles consommées du réactif limitant. Elle indique si plusieurs réactions se produisent en parallèle, conduisant à des sous-produits non désirés, ou si la réaction menée est la seule à consommer du réactif.

### **I.2.1. Procédés de distillation par vapeur**

#### **I .2.1.1. Evaporation à Effet Simple (Single Effect Evaporation)**

##### **a) Distillation à simple effet**

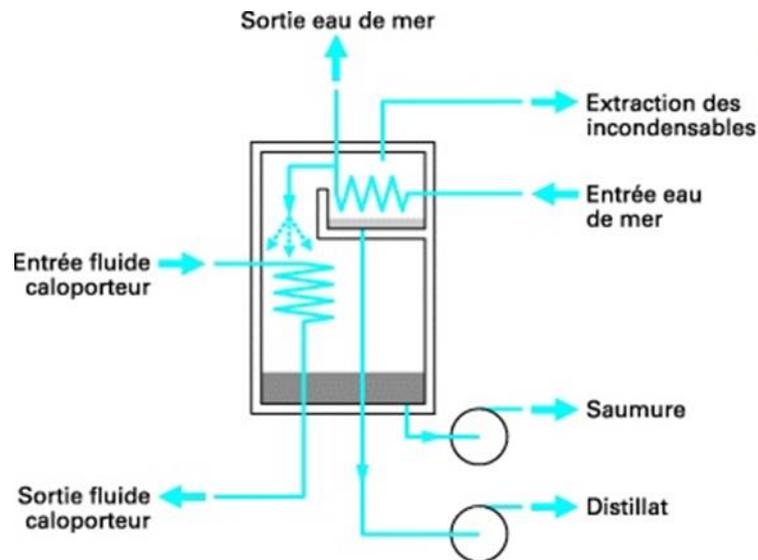
On chauffe l'eau et on condense la vapeur obtenue qui se trouve ainsi débarrassée du sel. En effet, les sels dissous dans l'eau n'étant pas vaporisables dans les mêmes conditions que l'eau, la vapeur obtenue par chauffage d'eau salée est constituée d'eau pure.

Le changement de phase de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur, appelé vaporisation, s'effectue à une température bien déterminée dépendant de la pression à laquelle on opère, la température d'ébullition étant d'autant plus élevée que la pression est forte.

Pour que le changement de phase puisse s'opérer, nous devons fournir à chaque unité de masse de l'eau à vaporiser une quantité de chaleur appelée chaleur latente de vaporisation. Ainsi, pour transformer  $1\text{kg}$  d'eau en  $1\text{kg}$  de vapeur à  $100^\circ\text{C}$  [4], il faut fournir environ  $2250\text{ KJ}$ . Lors de la transition inverse (liquéfaction) s'opérant lors de la condensation, la chaleur latente est récupérée (chaleur de condensation, toujours nettement plus faible que la chaleur latente de vaporisation).

Malheureusement, la chaleur latente de vaporisation de l'eau est assez élevée et le rendement énergétique de la distillation est très mauvais ( $625\text{ kWh/m}^3$  produit), ce qui la rend économiquement non viable, sauf si l'on dispose d'un fluide de chauffage en abondance comme sur les navires avec l'eau de refroidissement des groupes diesel ou avec les gaz d'échappement comme le cas des usines à bord de la mer de liquéfaction de gaz (Arzew et Skikda en Algérie).

Dans ce cas, dans une enceinte fermée, un serpentín de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer (voir figure I.3). La vapeur produite se condense au contact d'un second serpentín alimenté par de l'eau de mer froide. L'eau pure condensée est recueillie dans un réceptacle situé sous le serpentín d'eau froide d'où un groupe électropompe nécessaire pour la soutirer. Une pompe évacue les gaz incondensables et une autre pompe évacue à la mer l'eau de mer concentrée ou saumure.



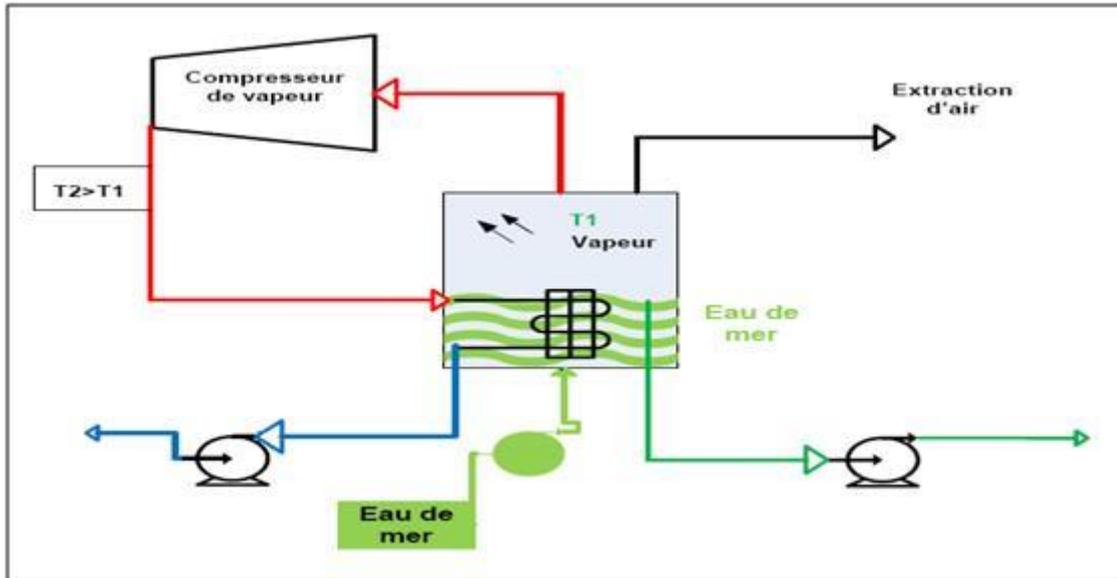
FigI.3 : Distillation à simple effet.

### b) Distillation par compression de vapeur (Vapor compression ou VC)

Ce procédé a pour principe de récupérer la chaleur de condensation avec un apport d'énergie sous forme mécanique, figure I.4 .On peut l'utiliser dans un évaporateur simple ou à multiples effets.

Un compresseur aspire la vapeur produite dans le dernier effet ou dans l'effet unique s'il s'agit d'une petite installation. Après la compression, cette vapeur haute pression à une température plus élevée que celle régnant dans l'évaporateur qui peut donc servir de condenseur pour cette vapeur qui le traverse dans un réseau de tuyaux, réchauffant l'eau à dessaler en lui cédant la chaleur de

condensation et commencer de la sorte un nouveau cycle, avant d'être évacuée sous forme d'eau distillée.



FigI.4 : Distillation par compression de vapeur.

Ce système, qui produit de l'eau pure, a un coût énergétique moyen de 7 à 14 kWh/m<sup>3</sup> selon qu'il s'agit d'un ou de deux effets [5]. Il ne fonctionne qu'à l'énergie électrique. Cependant, on peut associer au compresseur un échangeur thermique pour réchauffer l'eau salée en récupérant la chaleur perdue par les gaz d'échappement ou les vapeurs de combustion.

### c) Distillation à Multiples Effets

Le système d'évaporation à effet multiple est formé par un ordre des vaporisateurs à effet simple, figure I.5, où la vapeur formée dans un effet est employée dans le prochain effet. La réutilisation de la vapeur dans le système d'effet multiple permet la réduction de la saumure et la température aux valeurs basses et empêche le rejet d'une large quantité d'énergie à l'entourage [6]. Le processus d'évaporation à effet multiple peut être configuré en alimentation avant, arrière, ou parallèle. Cependant la plus utilisée reste celle en parallèle.

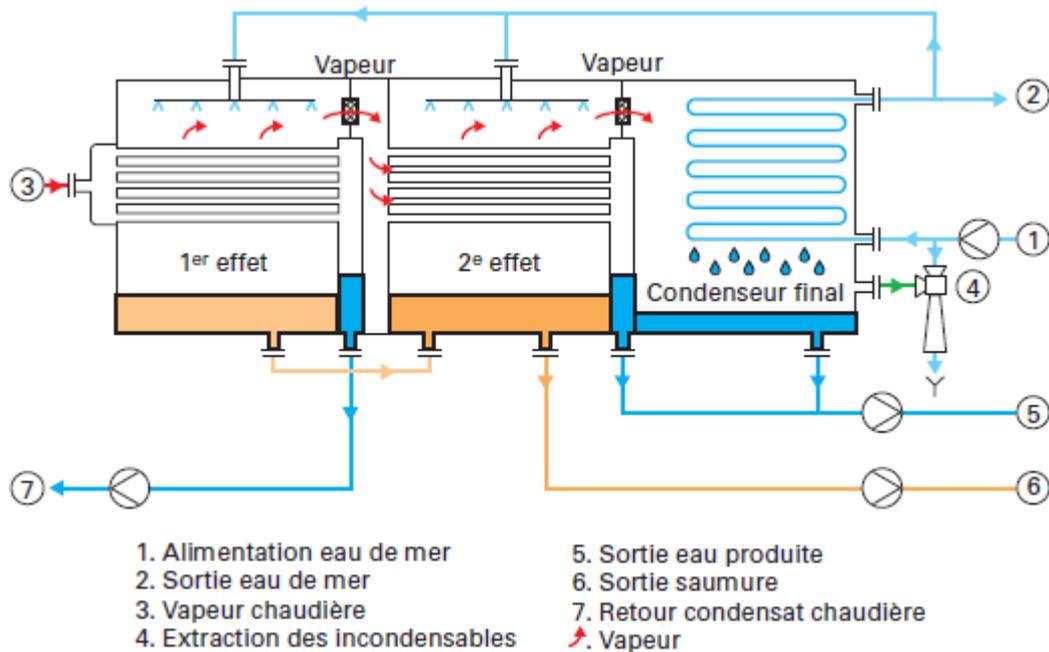


Fig I.5 : Distillation à Multiples Effets.

#### d) Distillation à multiples effets à alimentation parallèle

Le processus de distillation à multiples effets à alimentation parallèle est constitué autour de plusieurs cellules (effets) simples consécutives dans lesquelles on diminue la pression (et la température) du premier (chaud) au dernier (froid). L'eau de mer est introduite dans le condenseur bas, où elle absorbe la chaleur latente de la vapeur de condensation à partir du dernier effet. En conséquence, la température d'eau de mer prise grimpe jusqu'à la température d'alimentation. Une partie de cette eau est rejetée à la mer ; elle est dite eau de refroidissement. Et l'autre partie est utilisée pour arroser le faisceau de tubes que contient chaque cellule. L'eau de mer coule alors autour de ces tubes par gravité. Dans le premier effet le chauffage de l'eau de mer est assuré par la présence d'une vapeur dans les tubes, cette vapeur est introduite à partir d'une chaudière externe, et le condensat de qualité, du premier effet, est retourné de nouveau à la chaudière. La vapeur créée par l'évaporation de l'eau de mer est utilisée comme moyen de chauffage pour l'effet suivant où le processus se répète. Dans la dernière cellule, la vapeur produite se condense dans un échangeur thermique. Cet échangeur, est rafraîchi par l'eau de mer. La saumure et le distillat sont collectés dans chaque cellule d'où ils sont extraits par des pompes centrifuges.

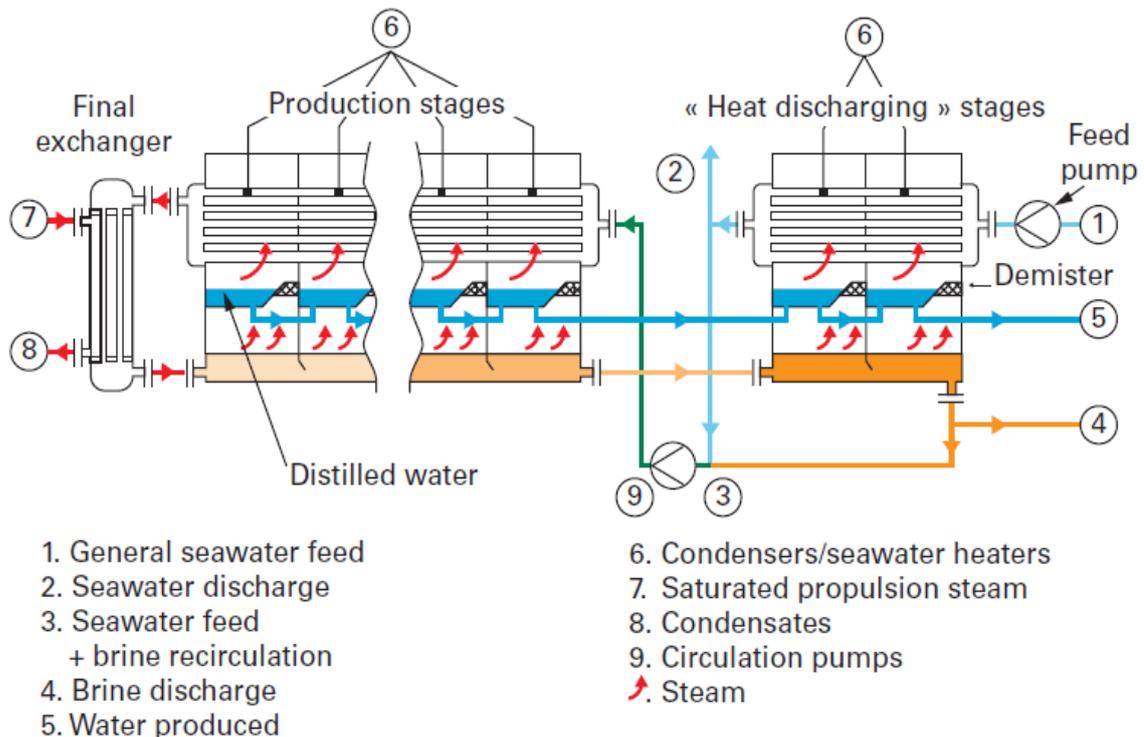
#### e) Distillation Multi-flash

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  $120^{\circ}\text{C}$ , [7][8] elle est introduite dans une enceinte où règne une pression réduite, figure I.6. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore 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. 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. Le coût énergétique de la distillation multi-flash est  $15 \text{ kWh/m}^3$ .

Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à  $120^\circ\text{C}$ , l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à  $120^\circ\text{C}$  grâce à de la vapeur à une température supérieure à  $120^\circ\text{C}$  produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité.

On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un dévésiculateur constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte.



FigI.6 : Distillation Multi-flash

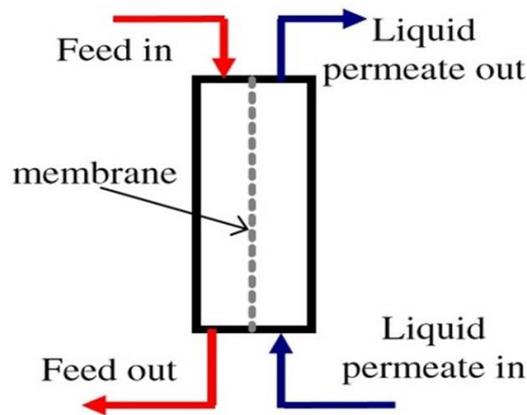
Le choix entre ces différentes technologies reste le coût, la durée de vie, l'entretien et la disponibilité de source énergétique.

## I.2.2. Procédés membranaires

### I.2.2.1. Distillation Membranaire par Contact Direct (DMCD)

Une solution aqueuse plus froide que la solution d'alimentation est maintenue en contact direct avec la membrane côté perméat, figure I.7. Dans ce cas, la différence de température transmembranaire induit une différence de pression de vapeur. Par conséquent, les molécules volatiles s'évaporent à

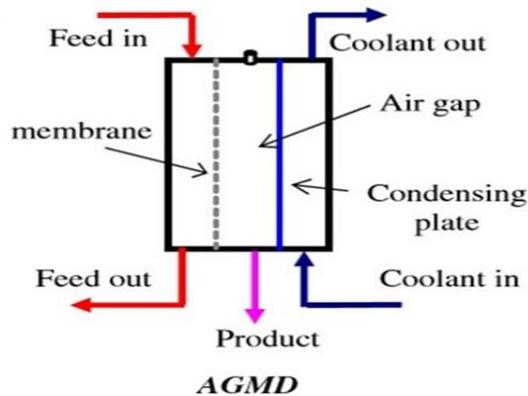
l'interface liquide/vapeur de l'alimentation et se re-condensent à l'interface liquide/vapeur du perméat plus froid [9].



FigI.7 : Schémas de principe de la DMCD

### I.2.2.2. L'Air Gap Membrane Distillation (AGMD)

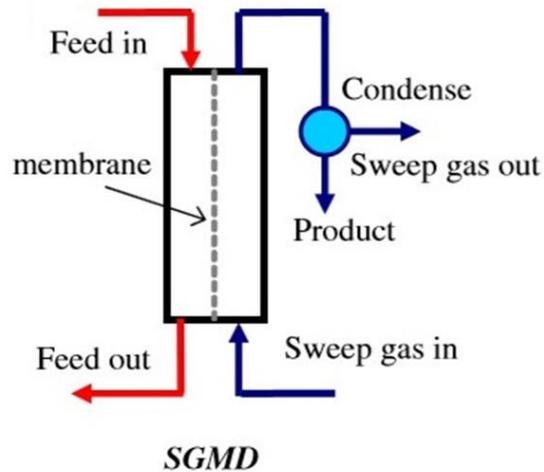
Une lame d'air est interposée entre la membrane et la surface de condensation. De ce fait, les molécules volatiles évaporées vont traverser les pores de la membrane et la lame d'air pour finalement se condenser sur une surface plus froide à l'intérieur du module membranaire, figure I.8.



FigI.8 : Schémas de principe de l'AGMD.

### I.2.2.3. La Sweeping Gas Membrane Distillation

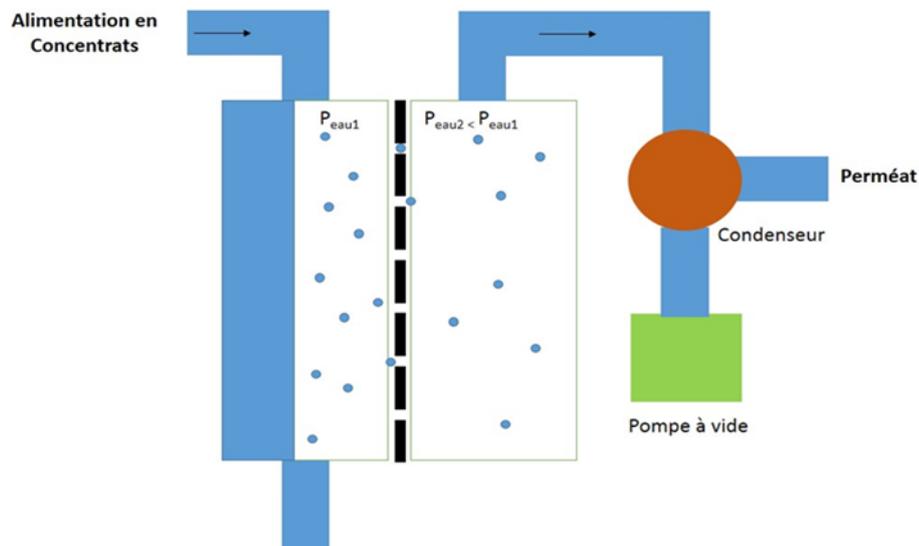
Un gaz froid inerte balaie la membrane du côté du perméat emportant avec lui les molécules vaporisées. La condensation a ensuite lieu à l'extérieur du module membranaire, figure I.9.



FigI.9 : Schémas de principe de la SGMD.

#### I.2.2.4. La distillation membranaire sous-vide (VMD ou DMV en français)

Un vide est appliqué côté perméat à l'aide d'une pompe à vide, figure I.10. La pression de vide appliquée est inférieure à la pression de vapeur saturante des molécules volatiles à séparer. La *VMD* permet d'obtenir un flux de perméat plus grand que les autres configurations ainsi qu'un phénomène de polarisation en température réduit. Dans ce cas, la condensation des molécules a lieu à l'extérieur du module membranaire malgré que le risque de mouillage est plus élevé dans cette configuration,



FigI.10 : Schémas de principe de la DMV.

#### I.2.2.5. L'osmose inverse (RO)

Cette technique sera retenue pour notre étude par rapport à ses qualités et aux inconvénients réduits.

##### a) Historique

Les procédés membranaires ont toujours existé et sont issue de phénomènes biologiques. On citera :

- ✓ La peau de tous les mammifères est considérée comme une membrane très efficace et très sélective qui permet de contrôler la température du corps (libération de sueur pour se rafraîchir sous forme de gouttelettes en temps chaud). La peau est sélective. Cela apparaît, si on regarde sous la peau on trouve du sang qui circule dans les veines et si on fait une incision, elle dégage du sang. Une peau saine et intacte ne fait pas sortir du sang lorsque on sue.
- ✓ Les poumons peuvent aussi être cités comme un exemple de membrane efficace, où des cellules fines dans le poumon permettent le passage de l'oxygène en inspirant l'air et relâche du dioxyde de carbone dans un même air. Les poumons comme membranes empêchent le passage de l'azote lors de l'inspiration et cela sans tenir compte de sa présence en grande quantité.
- ✓ Les membranes du rein régulent l'eau, les sels ions, les protéines et d'autres nutriments dans le corps. Les reins sont efficaces.
- ✓ Sur une échelle encore plus petite, le mur d'une petite cellule d'un mammifère, bactérie et d'autres micro-organismes maintiennent le contenu de la cellule intacte et régulent les taux entrées/sorties de nutriments ou de produit.

L'homme a essayé de copier le fonctionnement de ces membranes, et ainsi fabriqua des membranes artificielles pour différentes fonctions, qui elles aussi se basent sur la séparation de particules de différentes tailles. Parmi les principales études faites à ce propos on citera :

- ✓ En 1823, [9] Dutrochet donne une explication correcte de l'osmose (passage de solvant à travers une membrane d'une petite concentration vers une plus grande concentration) et de la dialyse (passage de soluté à travers une membrane d'une grande vers une plus petite concentration).
- ✓ En 1867, Traube et Pfeffer ont réalisé une des premières études quantitatives sur les performances d'une membrane artificielle.
- ✓ En 1867, Moritz prépara la première membrane synthétique.
- ✓ A la fin des années 1800, Graham a découvert que mettre une membrane entre un réservoir d'air sous pression et un autre réservoir avec de l'air qui n'est pas sous pression pourrait produire de l'air enrichi d'oxygène.
- ✓ Les premières utilisations des membranes étaient pour la récupération du  $NaOH$  par dialyse de l'eau perdue qui contient de l'hémicellulose de l'industrie viscoso-rayon.
- ✓ Aussi les isotopes de l'uranium ( $^{235}$  et  $^{238}$ ) sont séparés dans la phase vapeur à travers des membranes poreuses.

Et pour les membranes de l'osmose inverse, leur histoire a commencé avec les deux études suivantes :

- ✓ En 1959, Reid et Breton de l'université de Floride ont développé des membranes d'osmose inverse de cellulose acétate.
- ✓ En 1963, Loeb et Sourirajan de l'université de Californie à Los Angeles ont développé la première membrane asymétrique de cellulose acétate avec très grand taux de rejection et de flux d'eau.

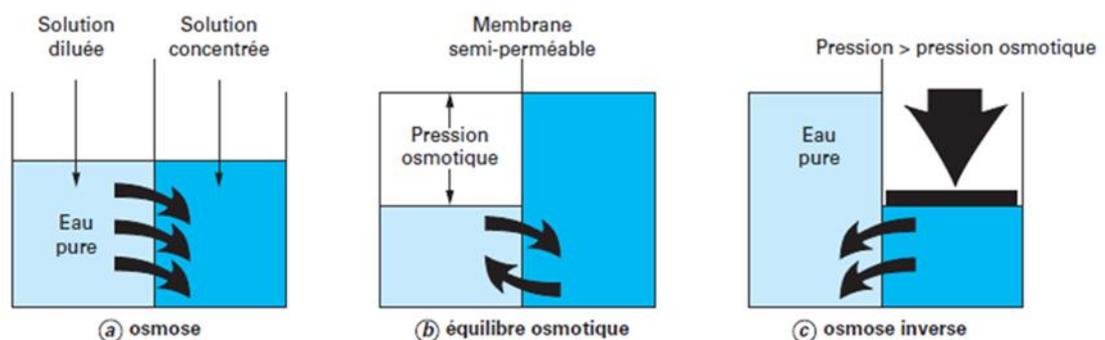
Par conséquent, un grand nombre de recherches et d'études ont été faites en se concentrant sur le développement de nouveaux matériaux et l'évaluation des performances de ces membranes. Et pour la commercialisation des membranes RO on va la résumer dans les points suivant :

- ✓ A la fin des années 1960, le Gulf General Atomics et Aerojet General ont utilisé les membranes de cellulose acétate de Loeb et Sourirajan pour construire des modules spiral wound.
- ✓ En 1971, Dupont a introduit le permeateur Permasep B-9 le dessalement d'eau saumâtre. Le permeateur contient des millions de fibres fines creuses de polyamides aromatiques asymétriques (aramid).
- ✓ A la fin des années 1973, Dupont a introduit le permeateur Permasep B-10, en utilisant aussi des fibres asymétriques aramid capables de produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer avec un seul passage.
- ✓ Dans le milieu des années 1970, des permeateurs de fibres creuses de cellulose tri acétate ont été introduit par Dow Chemical Company, suivie de Toyobo du Japon.
- ✓ Durant la même période, FluidSystems et Film Tec ont introduit les membranes composées par des couches fines polyamides à fibres creuses.
- ✓ Pendant les années 1980, des améliorations ont été fait à ces membranes pour accroitre le flux de l'eau et la rejection de sel de l'eau saumâtre et de l'eau de mer.
- ✓ Les matériaux prédominants des membranes aujourd'hui restent toujours les configurations d'aramides, polyamides et la cellulose acétate et le tri acétate en spiral wound et les fibres creuses.
- ✓ Les applications des membranes (RO) incluent la production d'eau potable, récupération des pertes, applications alimentaires, dialyse du rein, de l'eau hautement pure pour l'alimentation des chaudières et de l'eau ultra-pure pour des applications électroniques.
- ✓ En l'an 2000, la technologie (RO) a été utilisée pour traiter plus de deux milliard de gallons d'eau par jour, et ce marché est attendu à ce qu'il continue de grandir durant le demi-siècle qui suivra.

#### **b) Description du processus et principe de fonctionnement**

L'osmose inverse est un procédé de séparation membranaire à l'échelle moléculaire en phase liquide. La séparation s'opère par perméation à travers une membrane perméable sous l'action d'un gradient de pression. Elle se fait donc sur des critères physiques ; il y a absence de produit chimique. Le procédé s'opère habituellement à température ambiante et est facilement automatisable et modulable : la surface de la membrane est adaptable.

L'osmose est un processus naturel : les espèces se déplacent du milieu dilué au milieu concentré (Figure I.11(a)). Si une pression est appliquée au niveau du compartiment de la solution concentrée, le transfert entre les deux compartiments va diminuer jusqu'à s'annuler. Quand le flux s'annule, la pression appliquée est appelée pression osmotique (Figure I.11(b)). Si la pression appliquée à l'aide d'une pompe qui augmente la pression du fluide devient supérieure à la pression osmotique, le flux s'inverse : les espèces se déplacent du milieu le plus concentré au milieu le moins concentré → c'est le phénomène d'osmose inverse (Figure I.11(c)).



FigI.11 : Schéma de principe de l'osmose et de l'osmose inverse

### c) Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse

Les éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse sont schématisés sur la figure I.12 :

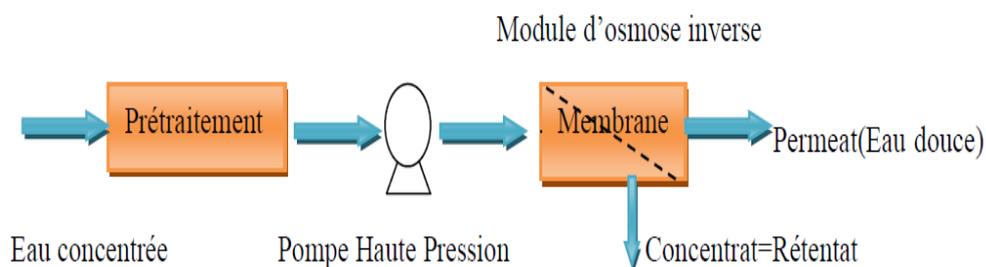


Fig1.12 : Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.

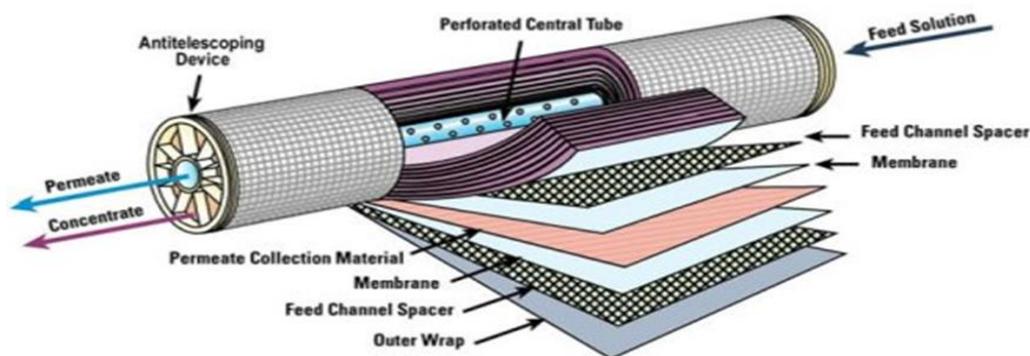
Le dessalement par osmose inverse nécessite d'abord :

#### ➤ Le prétraitement :

1. Chloration : Bloque la prolifération des organismes vivants[10]. Evite l'obstruction des conduites.

2. Filtration : Protège les pompes et assure le bon fonctionnement des pulvérisateurs.
  3. Antitartre : La distillation favorise précipitation du carbonate de calcium qui se dépose sur la paroi des échangeurs et réduit le transfert de chaleur.
- **Le post-traitement** : permet de potabiliser l'eau en 2 étapes [12] (en sortie de l'unité de dessalement, l'eau n'est pas potable car elle est déminéralisée).
1. Correction de la corrosivité : le traitement consiste à ajouter du  $Ca(OH)_2$  ou du  $CaCO_3$ .
  2. Désinfection finale : bien que certains procédés (osmose inverse) retiennent tous les microorganismes, il est nécessaire d'assurer une désinfection à la sortie de l'usine.
- **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 et retenue dans notre étude en raison de leur utilisation généralisée, de faible coût et de disponibilité facile à partir d'un certain nombre de fabricants [11]. 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 I.13). 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.



FigI.13 : Membrane en spirale.

La pompe haute pression permet ensuite d'injecter l'eau de mer dans le module d'osmose inverse

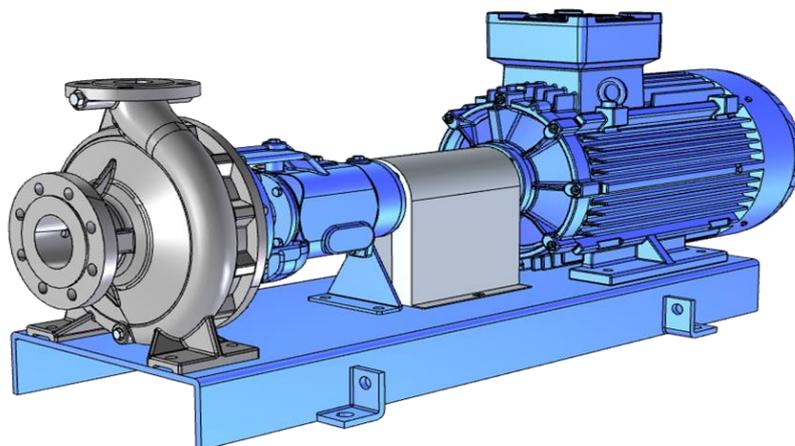
- **La pompe**

On appelle pompe tout appareil qui aspire un fluide d'une région à basse pression pour le refouler vers une région à plus grande pression. Ainsi, d'après cette définition on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide. L'augmentation de la pression du liquide véhiculé par la pompe a eu lieu suite à la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe. Pour les systèmes de pompage, les pompes centrifuges et volumétriques sont les plus répandues. Il existe d'autres types de pompes fonctionnant selon d'autres principes qui ne sont pas recommandés à cause de leur faible rendement. Selon l'application et le type de la source d'eau (eau de surface, de puits, de fleuve, ...) [13].

Les pompes centrifuges sont conçues pour une profondeur constante et leur débit augmente avec la vitesse de rotation. En contrepartie, les pompes volumétriques ont un débit de refoulement presque indépendant de la profondeur mais directement proportionnel à la vitesse de rotation. Pour notre application nous optons a priori au choix d'une pompe centrifuge qui est généralement la plus utilisée en pratique et plus particulièrement dans les systèmes de dessalement d'eau par osmose inverse (RO).

### **I.3. Pompe centrifuge dans le système de dessalement (RO)**

La pompe centrifuge représente le type de pompe le plus couramment utilisé dans diverses applications industrielles, parmi lesquelles le traitement de l'eau et les solutions aqueuses, figure I.14 Dans le système de dessalement par osmose inverse (RO), les pompes centrifuges conçues pour le fonctionnement à vitesse variable sont la technologie largement utilisée. Ils peuvent être utilisés pour transformer la vitesse de rotation du moteur à induction en un débit d'eau à haute pression. Ceci est dû à sa construction simple avec peu de pièces mobiles, ce qui le rend très fiable et robuste.



FigI.14 : Pompe centrifuge.

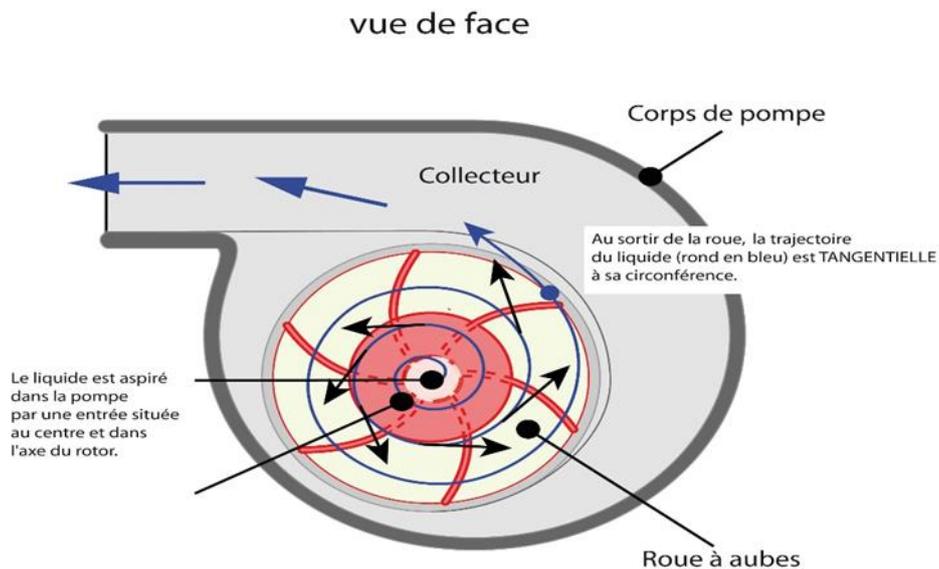
#### **I.3.1. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge**

Le principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge consiste au déplacement du liquide de l'aspiration vers le refoulement au moyen de l'élément actif de la pompe qu'on appelle roue à aubes

ou rotor. Ainsi, au contact du liquide avec les aubes la transformation de l'énergie mécanique en une énergie hydraulique aura lieu et elle consiste essentiellement en une augmentation du moment cinétique. [12] Notons qu'une pompe centrifuge se compose essentiellement (figure I.15)

- D'un organe mobile appelé roue, impulseur, turbine ou rotor,
- Et des organes fixes : diffuseur, canaux de retour.

On peut résumer le principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge comme suit : la roue étant noyée par le liquide et tournant à très grande vitesse rejette le liquide vers le diffuseur par la force centrifuge, le liquide compris entre les aubes étant rejeté tout en aspirant automatiquement les particules fluides qui s'y trouvent à l'aspiration et ainsi de suite.



FigI.15 : constitution d'une pompe centrifuge.

Le modèle mathématique de la pompe centrifuge développé pour décrire son comportement sera présenté dans le chapitre II. Cela comprend le modèle de la machine à induction qui entraîne la pompe.

#### I.4.Contribution et objectifs

Ce travail propose des nouvelles applications des stratégies de commande pour contrôler le système de dessalement d'eau par osmose inverse (RO). De plus, le système (RO) est intégré dans une chaîne complète contenant une alimentation directe et un moteur à induction associé à une pompe centrifuge. Chaque partie de cette architecture a été présentée avec son propre contrôleur. La contribution principale de ce mémoire consiste à utiliser des commandes robustes pour le contrôle de la membrane (RO).

Ce dispositif de commande a été conçu pour obtenir des bonnes performances dynamiques et assurer la robustesse en présence de bruits de mesure et d'incertitudes paramétriques.

## **I.5.Conclusion**

Afin de mettre en exergue l'intérêt de nos travaux. Nous avons exposé un état de l'art des procédés de dessalement d'eau et nous avons présenté une description des déferlants procédés de dessalement les plus connus et les plus importants. Où on a explicité et détaillé un peu plus le processus de l'osmose inverse qui fait l'objet de notre étude et nous avons donné une description précise des différents sections d'une installation de dessalement par (RO). Enfin, nous avons démontré les objectifs de ce mémoire et ses principales contributions.

# Chapitre II

---

Modélisation d'une chaîne de  
dessalement d'eau par osmose inverse

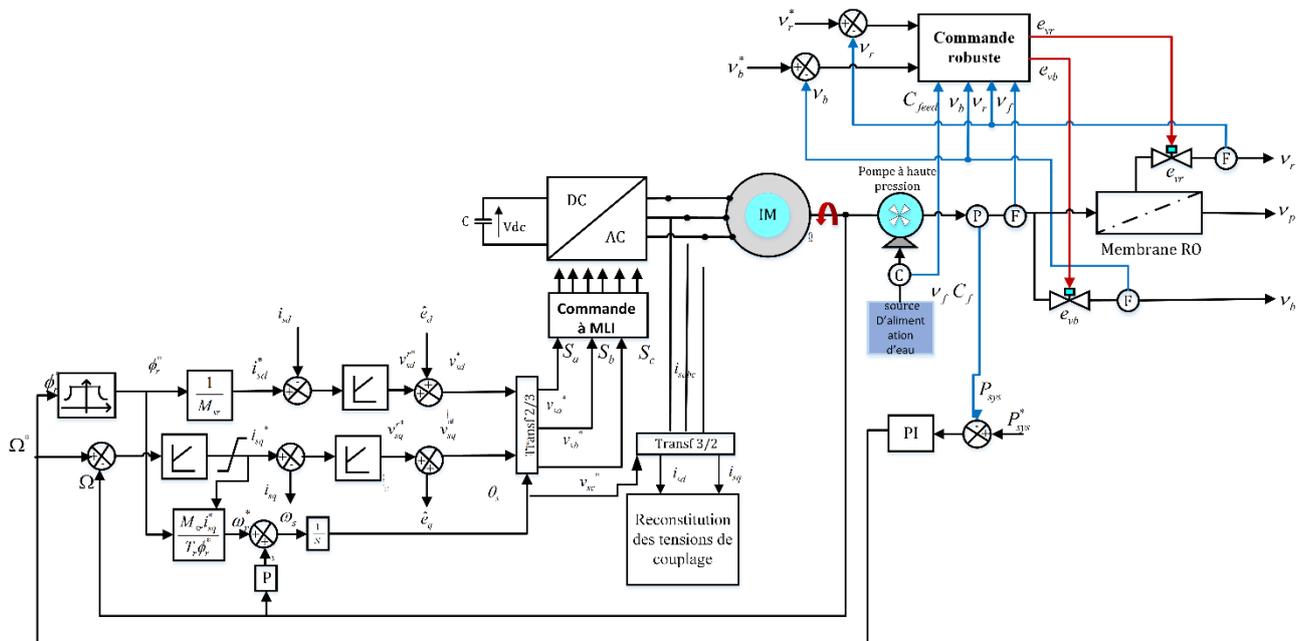
---

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la modélisation des différentes parties d'une chaîne de dessalement par osmose inverse (RO) qui comprend une pompe à haute pression, deux électrovannes, une membrane (RO) enroulée en spirale sans unité de prétraitement ou post-traitement. L'eau de mer rentre dans le système à travers la pompe haute pression qui la fait passer par la membrane (RO) où l'eau douce est récupérée à sa sortie ( $v_p$ ). L'eau de mer et l'eau à haute salinité (rétenant) sont dégagées via les deux électrovannes  $e_{vb}$  et  $e_{vr}$  respectivement.

## II.2. Configuration de système

L'idée principale derrière cette configuration est de concevoir et construire un système de dessalement d'eau par osmose inverse (RO) qui sera utilisé pour presque tous les types de source d'eau et pourrait être réalisable techniquement et économiquement. Pour atteindre cet objectif, nous proposons la configuration montrée en *Figure. II.1*.



FigII.1 : Le système de dessalement par osmose inverse proposé.

Cette architecture peut être décomposée suivant les blocs prédéfinis :

- Sous système moteur à induction (MI) couplé à la pompe centrifuge.
- Modules de la membrane (RO).

### II.2.1. Sous système moteur-pompe

La pompe centrifuge à vitesse variable est le type de pompe le plus utilisé dans les diverses applications industrielles [14], dont le traitement de l'eau et les solutions aqueuses.

Elles sont utilisées pour transformer la vitesse de rotation du moteur à induction en un débit d'eau à haute pression. Elle a une construction simple avec peu de pièces mobiles, ce qui la rend très fiable et robuste.

Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons le modèle mathématique de la pompe centrifuge, y compris le modèle du moteur à induction qui entraîne la pompe.

### II.2.1.1. Modélisation de la pompe centrifuge :

Le couple de charge hydrodynamique de la pompe centrifuge est proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur à induction donné par [15] :

$$T_r = A_p \Omega_r^2 \quad (II.1)$$

Avec :

$$A_p = \frac{P_n}{\Omega_{rn}^3} \quad (II.2)$$

Où  $A_p$  est la constante de couple,  $P_n$  est la puissance nominale du moteur à induction et  $\Omega_{rn}$  est la vitesse nominale du rotor.

La pompe centrifuge est décrite par les lois de similitude, qui sont donnés par [16,17]

$$Q' = \left( \frac{N'}{N} \right) Q \quad (II.3)$$

$$H' = \left( \frac{N'}{N} \right)^2 H \quad (II.4)$$

Où  $Q'$  et  $Q$  sont respectivement le débit et le débit nominal,  $H'$  et  $H$  sont respectivement sa hauteur et sa hauteur totale ;  $N'$  et  $N$  sont respectivement sa vitesse et sa vitesse nominale

### II.2.1.2. Moteur à induction :

Le moteur à induction est utilisé [18], du fait de son faible coût, de son faible encombrement, de son bon rendement et de sa fiabilité.

Son seul inconvénient est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer. Les machines triphasées, alimentées directement sur le réseau, représentent la majorité des applications ; supplantant les machines monophasées aux performances bien moindres et au couple de démarrage faible.

Sa mise en œuvre (démarrage et variation de vitesse) se révélait compliqué mais cela s'est résolu grâce aux progrès de l'électronique de puissance. La conséquence de ce développement de l'électronique de commande fait que le moteur à induction est aujourd'hui utilisé dans des domaines très variés :

- Transport (TGV est, tramways)
- Industrie
- Production d'énergie (éolienne)

#### a) Hypothèses simplificatrices

La machine électrique est prodigieusement complexe. Pour sa modélisation, nous sommes obligés d'introduire un certain nombre d'hypothèses simplificatrices [18] :

- Entrefer constant,
- Effet d'encoche et pertes ferromagnétiques négligeables,
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement négligeable,
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices dans l'entrefer,
- Circuit magnétique parfaitement feuilleté et non saturé (perméabilité magnétique constante).

Ceci entraîne :

- Un champ magnétique sinusoïdal,
- L'additivité vectorielle des flux,
- Des inductances propres constantes.

### b) Equations électriques de la machine à induction

En tenant compte de ces hypothèses, la mise en équations de la machine asynchrone aboutit à un système de six équations différentielles à coefficients variables, la résolution de ce système est très difficile, d'où la nécessité de faire une transformation du système triphasé vers un système biphasé équivalent. Cette transformation doit conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles, ceci permet d'établir une expression du couple électromagnétique valable pour la machine réelle. Cette transformation est connue par la transformation de PARK.

### c) Modèle dynamique de la machine à induction

La figure (II.2) décrit les trois enroulements statoriques sur les axes statoriques ( $A, B, C$ ), et les enroulements rotoriques qui représentent la cage sur les axes rotoriques ( $a, b, c$ ).

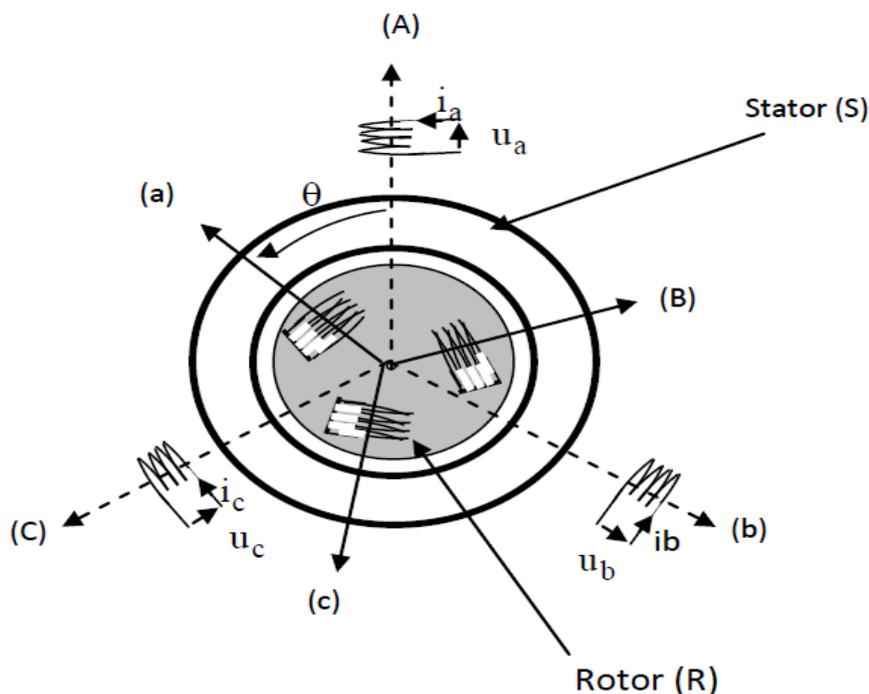


Fig II.2 : Représentation schématique d'un moteur asynchrone triphasé.

#### d) 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 (II.3). Les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles-mêmes est l'angle électrique entre l'axe de la phase statorique  $a$  et la phase rotorique  $a$ .

La loi de Faraday permet d'écrire [18] :

$$V = Ri + \frac{d\varphi}{dt} \quad (II.5)$$

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

$$[V_{ABCS}] = R_s [i_{ABCS}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{ABCS}] \quad (II.6)$$

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

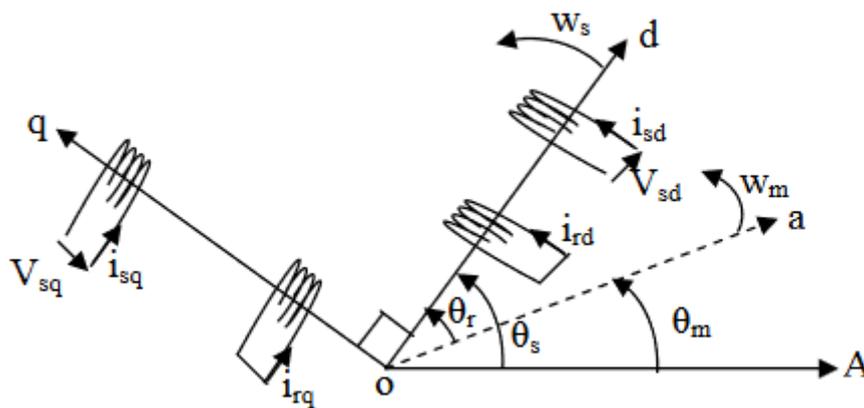
De même pour le rotor :

$$[V_{abcr}] = R_r [i_{abcr}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abcr}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

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

#### e) Équations de la machine dans le plan Park :

En appliquant la transformation de Park (équation II.7), nous pouvons passer du système triphasé ( $abc$ ) à un système diphasé ( $dq$ ) en considérant la figure II.3 :



FigII.3 : 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 [19] :

$$[X_{dgo}] = [T][X_{abc}] \quad (II.8)$$

Le passage inverse s'effectue ainsi :

$$[X_{dgo}] = [T]^{-1} [X_{abc}] \quad (II.9)$$

Tels que :

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

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

$[T]^{-1}$  : est la matrice de transformation inverse de Park.

Les équations des tensions deviennent :

$$\begin{aligned} [v_{dqs}] &= [T][v_{ABC}] \\ [v_{dqr}] &= [T][v_{ABC}] \end{aligned} \quad (II.10)$$

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

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

(II.11)

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 :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = M i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \varphi_{qr} = M i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (II.12)$$

Et les tensions :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{ds} - \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (II.13)$$

A son tour le couple électromagnétique s'exprime par :

$$C_e = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \quad (II.14)$$

L'équation mécanique s'écrit :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - C_f \quad (II.15)$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie

$C_r$  : Couple résistant

$C_f$  : Couple de frottement

Avec

$$C_f = f \Omega_r$$

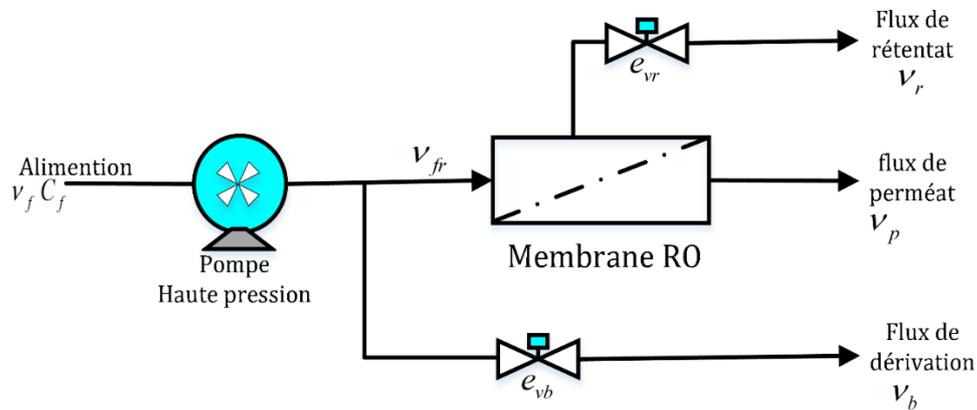
### II.3. Modélisation de la membrane par osmose inverse(RO) :

L'installation RO se compose d'une pompe haute pression, deux électrovannes, unité de membrane enroulée en spirale, sans unité de prétraitement ou post-traitement comme le montre la figure II.4, l'eau d'alimentation est sous pression et envoyée vers le module de membrane à travers une pompe à haute pression [34,35]. Le flux d'eau sous pression est divisé en deux : un flux d'eau de dérivation avec une vitesse ( $v_b$ ) et le flux d'eau qui pénètre dans l'unité de membrane enroulée en

spirale ( $v_{fr}$ ), où il est séparé en un flux de produit de faible salinité (perméat) ( $v_p$ ) et un flux d'eau de concentration avec une vitesse ( $v_r$ ). Tous les flux de sortie rejetés à pression atmosphérique [20,21]. La dynamique du système (RO) est modélisée en utilisant la masse et le bilan énergétique. Afin de simplifier le problème, plusieurs hypothèses peut être invoqué :

- Le modèle est basé sur un bilan massique pris sur l'ensemble de l'échantillon. et un bilan énergétique autour du rétentat actionné. Dans la dérivation du modèle, on suppose que
- l'eau est un fluide incompressible, tous les composants sont utilisés sur le même plan (de sorte que les termes d'énergie potentielle due à la gravité peuvent être négligés),
- la densité de l'eau est constante.
- Il est également supposé que la concentration effective dans le module à membrane est de moyenne pondérée de la concentration de l'aliment et du flux de saumure (voir l'équation II.16 ci-dessous).

La dérivation du modèle donne deux équations différentielles ordinaires non linéaires (ODE) qui peuvent décrire le processus représenté à la figure II.4, prendre la forme suivante :



FigII.4 : Schéma général du système d'osmose inverse

$$\begin{cases} \frac{dv_b}{dt} = \frac{A_p^2}{A_m K_m V} (v_f - v_b - v_r) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta\pi - \frac{1}{2} \frac{A_p e_{vb} v_b^2}{V} \\ \frac{dv_r}{dt} = \frac{A_p^2}{A_m K_m V} (v_f - v_b - v_r) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta\pi - \frac{1}{2} \frac{A_p e_{vr} v_r^2}{V} \end{cases} \quad (II.16)$$

La vitesse du flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) et la vitesse du flux d'eau de rétentat ( $v_r$ ) sont les états.  $V$  est le volume intérieur total,  $A_p$  est la section transversale du tuyau,  $A_m$  est la surface de la membrane,  $K_m$  est le coefficient de transfert de masse global de la membrane,  $\rho$  est la densité du fluide,  $e_{vr}$  est la résistance de l'électrovanne de rétentat,  $e_{vb}$  est la résistance de l'électrovanne de dérivation,  $v_f$  est la vitesse du flux d'eau d'alimentation,  $\Delta\pi$  est la pression osmotique. La vitesse du flux d'eau de perméat ( $v_p$ ) et la pression du système ( $P_{sys}$ ) sont respectivement défini comme [2] :

$$v_p = \frac{A_m K_m}{\rho A_p} (p_{sys} - \Delta\pi) \quad (II.17)$$

$$p_{sys} = \frac{\rho A_p}{A_m K_m} (v_f - v_b - v_r) + \Delta\pi \quad (II.18)$$

La pression osmotique est ensuite calculée comme suit :

$$\Delta\pi = \delta C_{eff} (T + 273) \quad (II.19)$$

Avec :

$$C_{eff} = C_{feed} \left( \left( \alpha + (1 - \alpha) \left( \frac{(1 - R) + R(v_f - v_b)}{v_r} \right) \right) \right) \quad (II.20)$$

Où  $C_{feed}$  est la quantité totale de solides dissous ( $TDS$ ) dans l'aliment,  $\delta$  est une constante reliant la concentration effective et la pression osmotique,  $\alpha$  est un coefficient de pondération de la concentration efficace,  $R$  le rejet de sel fractionné de la membrane et  $T$  la température du processus.

## II.4. Stratégie de contrôle

Le fonctionnement efficace du système de dessalement (RO) nécessite une stratégie de contrôle de processus robuste et une optimisation énergétique avec la surveillance de la membrane qui est cruciale, pour le dessalement d'eau de mer ou des eaux saumâtres, pour surveiller l'état des membranes d'osmose inverse (RO) par rapport à l'encrassement et l'entartrage de sels minéraux. De cette façon, la stratégie de contrôle est conçue pour améliorer le fonctionnement du système par

rapport au changement des points de référence en tenant compte les changements de la qualité de l'eau d'alimentation afin de permettre un fonctionnement sûr et fiable du système (RO).

En utilisant les équations dynamiques mentionnées ci-dessus, diverses techniques de commande peuvent être appliquées en utilisant les valeurs de résistance de la vanne comme entrées ( $e_{vb}$ ,  $e_{vr}$ ) ; les sorties mesurées sont les vitesses du fluide dans les lignes de dérivation ( $v_b$ ), la vitesse de rétentat ( $v_r$ ) et la pression du système ( $P_{sys}$ ).

## II.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une modélisation mathématique des différents constituants du système de dessalement d'eau (pompe centrifuge, moteur à induction et la membrane RO).

Les modèles obtenus permettent de voir la non linéarité entre les entrées et les sorties du système. Les sorties qui nous intéressent dans notre travail, est la pression du système, la vitesse du flux d'eau de dérivation et de rétentat. Ces valeurs sont liées aux paramètres de la pompe qui est lié de facto au paramètre du moteur à induction qui sera contrôlé par la commande vectorielle.

Dans la suite nous allons appliquer les solutions des commandes non linéaires pour le système de dessalement par osmose inverse choisie pour notre étude.

## Chapitre III

---

Commande d'une chaine de  
dessalement d'eau par osmose inverse.

---

### III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude et le développement des différentes stratégies de commandes pour chaque partie de la chaîne globale de dessalement par osmose inverse (RO) pour un fonctionnement efficace. Nous passons par l'implantation de la commande vectorielle de la machine à induction. Ensuite nous traitons la commande linéaire du système (RO) qui passe obligatoirement par une linéarisation autour d'un point de fonctionnement. Pour la première étape nous introduisons la commande par retour d'état sans et avec action intégrale. Ensuite nous proposons une commande non linéaire basée sur une fonction de Lyapunov pour la membrane (RO).

### III.2. Commande vectorielle de la machine à induction (MI)

#### III.2.1. Les équations de la machine à induction

La commande vectorielle utilisée nécessite une modélisation des équations du moteur dans le repère lié au champ tournant [22]. Ses équations sont exprimées comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left( - \left( R_s + \left( \frac{M_{sr}}{L_r} \right)^2 R_r \right) i_{sd} + \sigma L_s \omega_s i_{qs} + \frac{M_{sr} R_r}{L_r^2} \Phi_{rd} + \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_{rq} \omega_r + V_{sd} \right) \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left( - \sigma L_s \omega_s i_{sd} - \left( R_s + \left( \frac{M_{sr}}{L_r} \right)^2 R_r \right) i_{sq} - \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_{rd} \omega_r + \frac{M_{sr} R_r}{L_r^2} \Phi_{rq} + V_{sq} \right) \\ \frac{d\Phi_{rd}}{dt} = \frac{M_{sr} R_r}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \Phi_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rq} \\ \frac{d\Phi_{rq}}{dt} = \frac{M_{sr} R_r}{L_r} i_{sq} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} - \frac{R_r}{L_r} \Phi_{rq} \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p M_{sr}}{L_r J} (i_{sq} \Phi_{rd} - i_{sd} \Phi_{rq}) - \frac{F}{J} \omega_r - \frac{1}{J} C_r \\ Cem = \frac{p M_{sr}}{L_r} (i_{sq} \Phi_{rd} - i_{sd} \Phi_{rq}) \end{array} \right. \quad (III.1)$$

$$\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r}$$

$C_r$  : Le couple résistant.

#### III.2.2. Principe de la commande vectorielle des moteurs à induction

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine à induction comme une machine à courant continu à excitation séparée 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 satisfaisante.

Pour réaliser ce découplage, on oriente le système axes  $d-q$  de manière à ce que l'axe  $d$  soit en phase avec le flux [23], c'est-à-dire :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \phi_r \\ \phi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (III.2)$$

D'où l'appellation commande à orientation de flux rotorique figure (III.1)

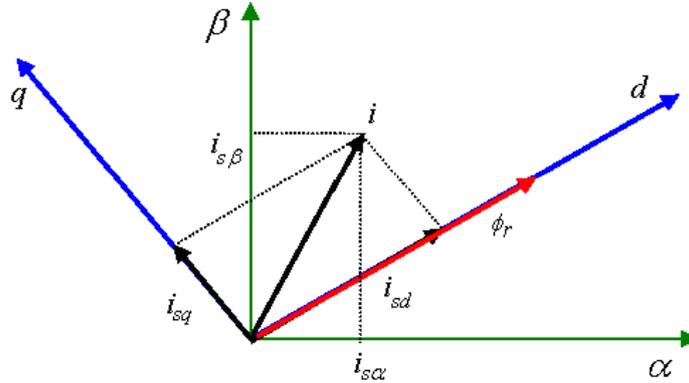


Fig. III.1 : Référentiel lié au flux rotorique.

En imposant,  $\phi_{rq} = 0$  le système d'équation III.1 devient :

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left( - \left( R_s + \left( \frac{M_{sr}}{L_r} \right)^2 R_r \right) i_{sd} + \sigma L_s \omega_s i_{qs} + \frac{M_{sr} R_r}{L_r^2} \Phi_r + V_{sd} \right) \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left( - \sigma L_s \omega_s i_{sd} - \left( R_s + \left( \frac{M_{sr}}{L_r} \right)^2 R_r \right) i_{sq} - \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_r \omega_r + V_{sq} \right) \\ \frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{M_{sr} R_r}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \Phi_r \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = Cem - F \omega_r - C_r \\ Cem = \frac{pM_{sr}}{Lr} i_{sq} \Phi_r \end{cases} \quad (III.3)$$

Il existe deux méthodes de commande vectorielle : directe et indirecte [24]. Vue la disponibilité de la grandeur du flux notre choix est orienté vers la commande direct.

En ce qui concerne la commande directe, l'angle de Park est calculé directement à l'aide des grandeurs mesurées ou estimées.

### III.2.3. Commande vectorielle directe d'une machine à induction (MI) alimentée en tension

Dans cette commande, le flux est asservi à une référence. Le module et la position du flux sont généralement estimés en utilisant le modèle de la machine à induction (MI) et des grandeurs facilement mesurables comme les courants et les tensions ou la vitesse de rotation utilisée pour le réglage.

Plusieurs solutions existent pour réaliser cette commande. La figure (III.2) présente le réglage de vitesse avec la commande directe et contrôle du couple associé au découplage par compensation avec contrôle des courants.

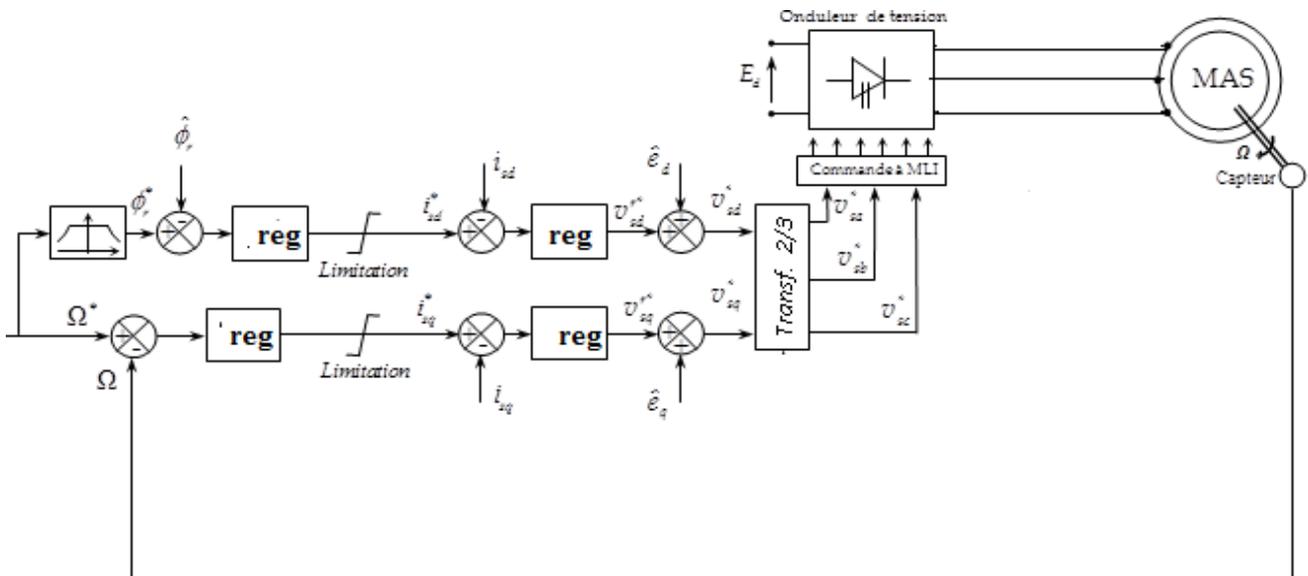


Fig. III.2 : Commande vectorielle directe avec contrôle des courants  $i_{sdq}$  et découplage par compensation.

Les principaux constituants dans ce type de commande sont les boucles de régulation de vitesse et de flux, Les boucles des courants jouent un rôle primordial puisque, tout en assurant le contrôle vectoriel, elles garantissent les protections nécessaires à l'ensemble convertisseur/machine. Ainsi, l'introduction de limitations sur les références des courants assure la maîtrise des courants lorsqu'un problème survienne sur les boucles externes.

Le moteur est alimenté à travers un onduleur triphasé commandé par une stratégie MLI qui sera détaillé en annexe (annexe B).

### III.2.4. Calcul des régulateurs classiques

#### III.2.4.1. Régulation des courants

##### a) Réglage du courant $i_{sd}$

Le schéma fonctionnel du contrôle du courant  $i_{sd}$  est représenté par la figure(III.3)

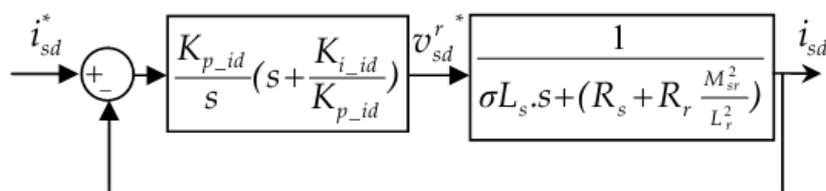


Fig. III.3 : le schéma fonctionnel du contrôle du courant  $i_{sd}$

On utilise un régulateur PI dimensionné par compensation :

$$\frac{K_{i-id}}{K_{p-id}} = a \quad (III.4)$$

La fonction de transfert en boucle fermée devient :

$$\frac{i_{sd}}{i_{sd}^*} = \frac{K_{p-id} \cdot b}{s + K_{p-id} \cdot b} \quad (III.5)$$

C'est une fonction de transfert du 1<sup>er</sup> ordre de constante de temps :

$$\tau_{id\_BF} = \frac{1}{K_{p-id} \cdot b} \quad (III.6)$$

Et de temps de réponse :

$$t_{rid\_BF} \approx 3\tau_{id\_BF} = \frac{3}{K_{p-id} \cdot b} \quad (III.7)$$

On l'impose généralement par rapport à celui en boucle ouverte [25] ( $t_{rid\_BO} = 3\tau_{id\_BO} = \frac{3}{a}$ ) :

$$t_{rid\_BF} = t_{rid\_BO} / h \quad (III.8)$$

Avec «*h*» coefficient supérieur à 1.

Donc, on détermine :

$$K_{p-id} = \frac{3}{t_{rid\_BF} \cdot b} \quad (III.9)$$

Le coefficient du régulateur intégrateur se détermine par :

$$K_{i-id} = a \cdot K_{p-id} \quad (III.10)$$

Avec :

$$a = \frac{(R_s + R_r \frac{M_{sr}^2}{L_r^2})}{\sigma L_s}$$

Et :

$$b = \frac{1}{\sigma L_s}$$

### b) Réglage de courant $i_{sq}$

Le régulateur du courant  $i_{sq}$  est dimensionné de la même manière que le réglage du courant  $i_{sd}$

$$t_{riq\_BF} = t_{riq\_BO} / h \quad (III.11)$$

$$K_{p-iq} = \frac{3}{t_{riq\_BF} \cdot b} \quad (III.12)$$

$$K_{i-iq} = a \cdot K_{p-iq} \quad (III.13)$$

### III.2.4.2. Régulation de la vitesse

Pour la régulation de la boucle de vitesse on a choisi d'adopter un correcteur de type intégrateur proportionnel (IP). La figure (III.4) montre la structure de la boucle externe en utilisant ce régulateur.

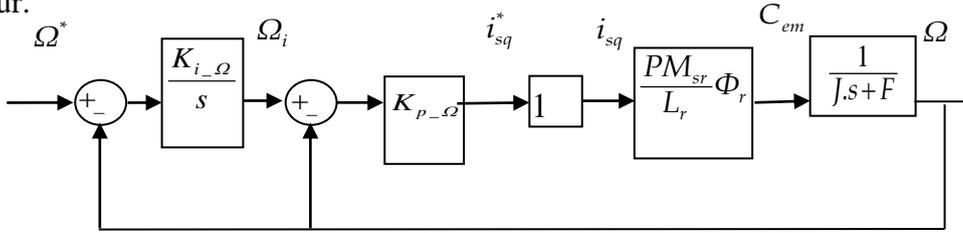


Fig. III.4 : Bloc de réglage de la vitesse de rotation.

La fonction de transfert en boucle fermée est équivalente à un système 2<sup>ème</sup> ordre, et elle est égale à :

$$\frac{\Omega_{ref}}{\Omega} = \frac{K_i K_p K_{cem}}{S^2 + (K_p K_{cem} + \frac{f}{J})S + K_i K_p K_{cem}} = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (III.14)$$

Où

$$K_{cem} = pM_{sr}^2 I_{sd}^* / L_r$$

Par équivalence on obtient :

$$\begin{cases} 2\xi\omega_n = K_p K_{cem} + \frac{f}{J} \\ \omega_n^2 = K_p K_i K_{cem} \end{cases} \quad (III.15)$$

Imposant  $\xi$  et  $\omega_n$  on peut aisément déterminer les paramètres  $K_p$  et  $K_i$  qui sont de la forme suivante :

$$\begin{cases} K_p = (2\xi\omega_n - \frac{f}{J}) / K_{cem} \\ K_i = \omega_n^2 / (K_p K_{cem}) \end{cases} \quad (III.16)$$

### III.2.4.3. Réglage du flux $\Phi_r$

La fonction de transfert en boucle fermée devient :

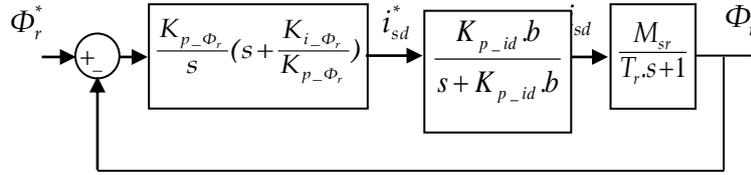


Fig.III.5 : Schéma blocs de réglage de flux.

$$\frac{\Phi_r}{\Phi_r^*} = \frac{K_{p-\Phi_r} \cdot K_{p-id} \cdot b \cdot M_{sr} / T_r}{s^2 + K_{p-id} \cdot b \cdot s + (K_{p-\Phi_r} \cdot K_{p-id} \cdot b \cdot M_{sr} / T_r)} \quad (III.17)$$

Par identification avec une équation du 2<sup>ème</sup> ordre :

$$2\xi\omega_n = K_{p-id} \cdot b \text{ et } \omega_n^2 = K_{p-\Phi_r} \cdot K_{p-id} \cdot b \cdot M_{sr} / T_r$$

Imposant :

$$\xi = ?$$

Et on calcule

$$\omega_n = \frac{K_{p-id} \cdot b}{2\xi}$$

Puis :

$$K_{p-\Phi_r} = \frac{T_r \cdot \omega_n^2}{K_{p-id} \cdot b \cdot M_{sr}} \quad (III.18)$$

Et le coefficient du régulateur intégrateur :

$$K_{i-\Phi_r} = \frac{K_{p-\Phi_r}}{T_r} \quad (III.19)$$

La commande vectorielle du moteur à induction permet de réguler séparément le flux et le couple en contrôlant les courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  correspondants. Les courants souhaités sont déterminés à partir des régulateurs de flux et de vitesse PI comme indiqué sur la figure II.1.

### III.3. Effet de la pompe centrifuge sur le moteur à induction (MI)

L'équation du moteur à induction mécanique est présentée par [26] :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = T_{em} - f\Omega_r - T_r \quad (III.20)$$

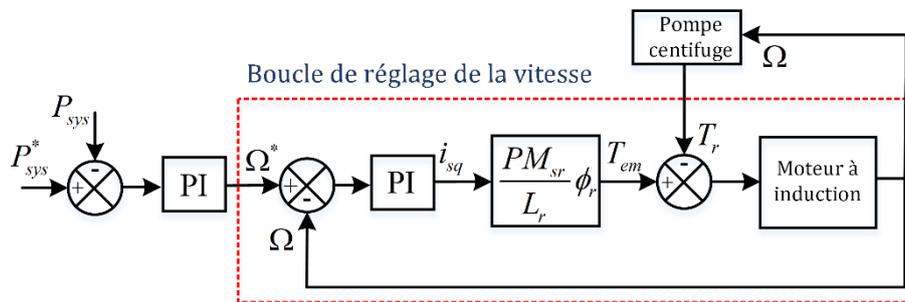
$T_r$  est le couple de charge inconnu généré par la pompe centrifuge. Pour piloter la vitesse  $\Omega_r$ , nous avons besoin de concevoir un contrôleur robuste qui maintiennent l'erreur de suivi ( $\Omega_r^* - \Omega_r$ ) asymptotiquement stable en présence d'un couple de charge inconnu dû à la pompe centrifuge.

### III.4. L'objectif de contrôle

- **Boucle de régulation de la vitesse d'un moteur à induction**

Pour le moteur à induction, le couple de charge généré par la pompe centrifuge ( $T_r$ ) n'est pas connu, c'est pourquoi nous allons concevoir un contrôleur PI robuste basé sur la mise en forme de la boucle qui sera traité par la suite.

Le schéma fonctionnel présenté à la Figure III.6 montre l'accouplement entre le moteur à induction et la pompe centrifuge. En outre, la relation directe entre les deux boucles. Boucle de régulation de vitesse et boucle de régulation de pression du système.



FigIII.6 : Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de vitesse.

Pour le système (RO), nous nous concentrerons sur le contrôle de deux boucles séparées. La première boucle régule la pression du système en ajustant vitesse d'entraînement à fréquence variable ( $S_{VFD}$ ) à l'aide d'un contrôleur proportionnel-intégral (PI) robuste.

$$S_{VFD} = K_p (P_{sys}^{sp} - P_{sys}) + K_I \int_0^{tc} (P_{sys}^{sp} - P_{sys}) dt \quad (III.21)$$

Où  $S_{VFD}$  est l'action de commande appliquée aux vitesses du variateur de fréquence (VFD) [27] [2],  $K_p$  le gain proportionnel et  $K_I$  le gain intégral.

En fait, le contrôle de la pression du système est la clé de la performance du dessalement par RO. Le système présenté dans ce travail utilisait un débit d'alimentation constant mais utilisait un flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) séparé avec une électrovanne pour contrôler la vitesse de flux de l'eau alimentant l'unité à membrane.

La deuxième boucle utilise une commande robuste pour réguler la vitesse de flux d'eau de dérivation et du rétentat ( $v_r$ ) (débit). Où l'objectif est de stabiliser le procédé à l'état d'équilibre désiré en utilisant respectivement l'électrovanne de dérivation et l'électrovanne de rétentat ( $e_{vb}$ ,  $e_{vr}$ ) comme entrées manipulées. En outre, pour pouvoir agir sur le débit à la sortie de la membrane représentée par la vitesse ( $v_p$ ). On peut déjà constater la complexité du contrôle.

De plus, le contrôleur robuste est synthétisé, ce qui lui permet d'obtenir des bonnes performances en présence d'incertitudes sur les paramètres du système telles que la variation de la qualité d'eau d'alimentation et les perturbations causées par les bruits mesures.

### III.5. Linéarisation du modèle de la membrane (RO)

L'analyse non linéaire montre que le comportement dynamique du système autour de son point d'équilibre est un nœud stable. Au lieu de contrôler directement un système non linéaire, le système RO peut être linéarisé dans le proximité de son point équilibre pour utiliser une grande quantité de théorie de contrôle concernant un système linéaire.

La vitesse du flux d'eau de dérivation et de rétentat et la pression du système, sont les sorties du système. Ce sont les variables les plus courantes contrôlées dans les processus de dessalement.

Considérons les équations différentielles non linéaires données comme suit [1] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = g(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (III.22)$$

Où :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{v}_r \\ \dot{v}_b \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} e_{vr} \\ e_{vb} \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} v_r \\ v_b \\ P_{sys} \end{bmatrix} \quad (III.23)$$

Et

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_{sys} A_p}{\rho V} \\ \frac{P_{sys} A_p}{\rho V} \end{bmatrix} \quad (III.24)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_1(x) \\ g_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \left( \frac{A_p v_r^2}{V} \right) \\ -\frac{1}{2} \left( \frac{A_p v_b^2}{V} \right) \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

Avec :

$$V_p = \frac{AmKm}{\rho A_p} (P_{sys} - \Delta\pi) \quad (III.26)$$

$f(x,u)$  et  $g(x,u)$  sont donnés en équations. (II.16), (II.17), (II.18), (II.19) et (III.26)

Notez que l'équilibre du système traité est identique à celui de la littérature qui définit le point d'équilibre [1] :

L'entrée  $u$  : ( $e_{vb}=5000$ ,  $e_{vr}=310$ ),

Le point d'équilibre  $x^*$  ( $v_r=4.511$ ,  $v_b=1.123$ )

Et la constante sortie  $y^*$  ( $2,369 \times 4.511 \times 1.123$ ).

En appliquant la linéarisation jacobienne proche de la famille d'équilibre pour le système non linéaire dans Eq (II.16), les matrices du système d'états sont calculées comme suit :

$$\begin{aligned} A &= \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x^*, u=u^*} \\ B &= \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x=x^*, u=u^*} \\ C &= \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{x=x^*, u=u^*} \\ D &= \left. \frac{\partial g}{\partial u} \right|_{x=x^*, u=u^*} \end{aligned} \quad (III.27)$$

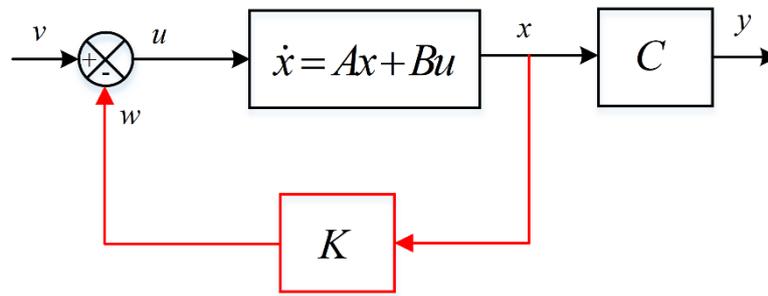
### III.6. Commande par retour d'état

Soit le système décrit par l'équation d'état [28] :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (III.28)$$

Le retour d'état introduit une modification sur l'entrée du système :

$$u(t) = v(t) - w(t) = v(t) - kx(t) \quad (III.29)$$



FigIII.7 : Schéma de la commande par retour d'état.

Les équations du système en boucle fermé sont :

$$\dot{x} = Ax(t) + B[v(t) - Kx(t)] = [A - BK]x(t) + Bv(t) \quad (III.30)$$

Par conséquent, la matrice d'état du système en boucle fermé vaut :

$$A_{BF} = A - BK \quad (III.31)$$

La dynamique du système bouclé est donc fixée par les valeurs propres de la matrice ( $A_{BF}$ )

Ces valeurs propres sont les racines de l'équation caractéristique  $\lambda_{A-BK}(s)$  obtenues avec :

$$|\lambda I - A_{BF}| = 0$$

- Placement de Pôles

Appelé aussi commande par Placement de Pôles. Elle est réalisable soit dans l'espace d'état, soit sous forme algébrique à partir des fonctions de transfert.

On définit la commande modale qui consiste à déterminer une matrice de retour d'état  $K$  telle que les valeurs propres de la matrice ( $A_{BF}$ ) soient placées en des positions préfixées ( $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1}$ ) (valeurs complexes). L'existence d'une solution dépend de la commandabilité du système et de l'accessibilité aux états du système.

Soit un système en boucle fermé décrit par l'équation d'état :

$$\begin{cases} \dot{x} = [A - BK]x(t) + Bv(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (III.32)$$

Les équations d'état et de sortie en régime statique s'écrivent :

$$\begin{cases} 0 = [A - BK]x + Bv \\ y = y_c = Cx \end{cases} \quad (III.32)$$

De la première équation on obtient une relation pour  $x$  :

$$x = -[A - BK]^{-1} Bv \quad (III.33)$$

On substitue sa valeur dans la deuxième équation et on obtient :

$$y_c = C(-[A - BK]^{-1} B)v \quad (III.34)$$

L'entrée à appliquer au système est donc :

$$v(t) = \left[ C(-[A - BK]^{-1} B) \right]^{-1} y_c \quad (III.35)$$

### III.7. Commande par retour d'état et action intégrale

Le régulateur à retour d'état classique est construit sur la base de l'état  $x(t)$  du système, la représentation d'état d'un système linéaire et l'expression générale dans ce cas de la commande est donnée dans les équations (III.36) et (III.37) respectivement.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (III.36)$$

$$u(t) = -kx(t) + v(t) \quad (III.37)$$

Cependant ce type de commande, en présence des perturbations constantes, ne peut pas assurer le rejet de perturbations et le suivi de la consigne à la fois. Et puisque notre système exige qu'on calcul une commande valable quel que soit la perturbation, cet objectif est réalisé dans le cadre du régulateur à retour d'état par l'ajout d'un terme intégral d'où l'utilisation de la commande par retour d'état avec action intégrale [29].

Le calcul d'une commande par retour d'état avec une action intégrale est donné comme suivant :

$$u = -kx - k_i \int_0^t e(\alpha) d\alpha \quad (III.38)$$

Posant

$$Z = \int_0^t e(\alpha) d\alpha \text{ ce qui fait que } \dot{Z} = e(\alpha) = v - Cx$$

avec  $v$  la référence .La commande devient alors

$$u = -kx - k_i Z = -\begin{bmatrix} K & K_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ Z \end{bmatrix} = -Kx \quad (III.39)$$

Tel que  $\bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ Z \end{bmatrix}$  est l'état augmenté  $Z$  par rapport à  $x$

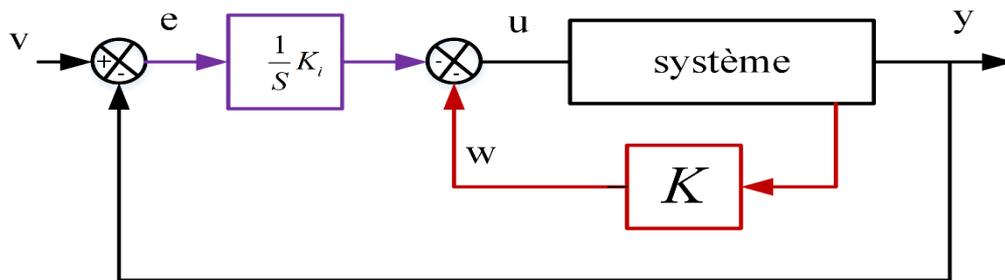
Le système augmenté, associé à ses nouvelles variables, admet la représentation d'état III.38, et la commande prend alors la forme de III.39.

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u \\ y = \bar{C}\bar{x} \end{cases} \quad (III.40)$$

$$u = -\bar{K}\bar{x} \quad (III.41)$$

Tel que :

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0_{n \times p} \\ -C & 0_{n \times p} \end{bmatrix}, \bar{C} = [C \ 0], \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0_{p \times m} \end{bmatrix} \quad (III.42)$$



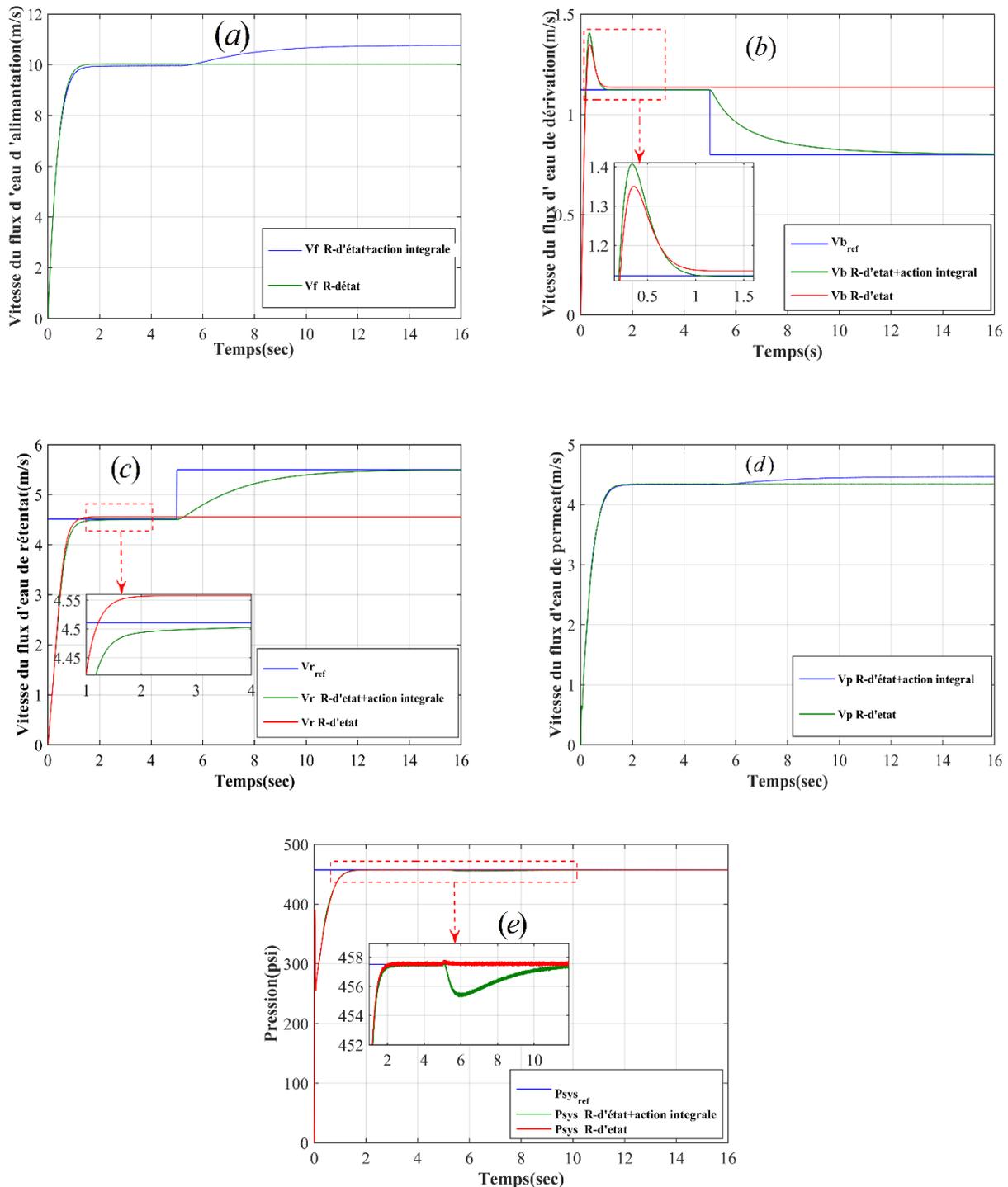
FigIII.8 : Schéma de la commande par retour d'état avec une action intégrale.

#### IV.8. Résultats de simulations

Dans un premier temps, nous avons commencé par la simulation du schéma global qui est décrit par la *Figure II.1* afin d'étudier le comportement du processus (RO) lors de l'application de la commande par retour d'état sans et avec action intégrale avec un changement de référence.

Les tests de simulations sont effectuées sous l'environnement Matlab/Simulink. Les paramètres du groupe moteur-pompe et la membrane (RO) utilisés dans la simulation sont présentés dans l'annexe.

Nous avons effectué un test de simulation. Nous imposons une vitesse de référence du flux d'eau de dérivation et du flux d'eau de retentat égale à  $1.123 \text{ m/s}$  et  $4.511 \text{ m/s}$  respectivement à l'instant  $t=0\text{s}$  puis elles changent à  $0.8 \text{ m/s}$  à et  $5.51 \text{ m/s}$  respectivement à  $t=5\text{s}$ ,



FigIII.9 : (a)vitesse de flux d'eau d'alimentation( $v_f$ ) (b) vitesse de flux d'eau de dérivation( $v_b$ ) (c) vitesse de flux d'eau de rétentat ( $v_r$ ) (d) vitesse de flux d'eau de perméat ( $v_p$ ) (e) Pression du système ( $P_{sys}$ ).

## IV.9. Interprétation des résultats

Dans la figure (a) on remarque que la vitesse du flux d'eau d'alimentation ( $v_f$ ) atteindra rapidement sa valeur souhaitée  $10 \text{ m/s}$  et restera constante sur toute la plage du temps pour la commande par retour d'état malgré le changement des valeurs de références du flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) et de retentât ( $v_r$ ) par contre on note une augmentation du flux d'alimentation ( $v_f$ ) pour la commande par retour d'état avec action intégrale en raison du changement des références.

Les figures (b) et (c) montrant l'évolution des deux grandeurs mesurées  $v_b$  et  $v_r$  pendant l'application des commandes ; retour d'état et retour d'état avec action intégrale. On remarque que la vitesse du flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) et de retentât ( $v_r$ ) suivent ses références avec un temps de réponse rapide pour les deux commandes mais avec une erreur statique pour la commande par retour d'état. La préférence de la commande par retour d'état avec action intégrale s'apparaît lorsqu'un changement des valeurs de consigne se produit où on note que les grandeurs mesurées  $v_b$ ,  $v_r$  suivent ses références avec une dynamique lente contrairement à la commande par retour d'état sans action intégrale qui ne montre aucune réponse à ce changement.

FigIII.8(d) montre le comportement de la vitesse du flux de perméat ( $v_p$ ) à la sortie de la membrane. Le contrôle de la vitesse du flux de perméat dépend du contrôle de la vitesse du flux de dérivation ( $v_b$ ), de la vitesse du flux d'eau de retentât ( $v_r$ ) et de la pression du système ( $p_{sys}$ ).

FigIII.8(e) montre que la pression du système s'écarte d'abord légèrement de la valeur souhaitée, à l'instant  $t = 5s$  lorsqu'un changement se produit dans les valeurs de référence de  $v_b$  et  $v_r$  puis atteint sa référence avec une bonne dynamique, ce qui montre l'efficacité du régulateur PI. La pression du système ( $P_{sys}$ ) est la variable directe ayant un effet sur les autres variables ( $v_b$ ,  $v_r$ ,  $v_p$ ).

Ces résultats montrent la supériorité de la commande par retour d'état sur la commande par retour d'état sans action intégrale. Mais pour appliquer ces deux commandes linéaires il faut tout d'abord linéariser le modèle non linéaire de la membrane (RO).

D'après les résultats obtenus on remarque que le système est en déséquilibre lorsqu'il s'éloigne des points d'équilibre. Donc pour améliorer les performances du système de dessalement d'eau par osmose inverse on applique une commande non linéaire basée sur une fonction de Lyapunov, ce qu'on va présenter dans la section suivante.

#### IV.10. Commande non linéaire basée sur une fonction de Lyapunov

Nous définissons deux erreurs  $e_1$  et  $e_2$  qui représentent les erreurs sur les composantes de vitesse du flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) et de rétentat ( $v_r$ ), puis nous calculons la loi de commande pour assurer la convergence asymptotique vers les deux références.

$$\begin{cases} e_1 = v_b^* - v_b \\ e_2 = v_r^* - v_r \end{cases} \quad (III.43)$$

La dérivée des deux erreurs est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{v}_b^* - \dot{v}_b \\ \dot{e}_2 = \dot{v}_r^* - \dot{v}_r \end{cases} \quad (III.44)$$

De même on a la fonction de Lyapunov est donnée par :

$$V = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2) \quad (III.45)$$

Avec :

$$V > 0$$

La dérivée de cette fonction est donnée par :

$$\dot{V} = e_1 \cdot \dot{e}_1 + e_2 \cdot \dot{e}_2 \quad (III.46)$$

$$\dot{V} = e_1 \times \left( \dot{v}_b^* - \left[ \frac{A_p^2}{A_m K_m V} (v_f - v_b - v_r) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta \pi - \frac{1}{2} \frac{A_p e_{vb} v_b^2}{V} \right] \right) + e_2 \times \left( \dot{v}_r^* - \left[ \frac{A_p^2}{A_m K_m V} (v_f - v_b - v_r) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta \pi - \frac{1}{2} \frac{A_p e_{vr} v_r^2}{V} \right] \right) \quad (III.47)$$

Notons :

$$\begin{aligned} f(e_{vb}) &= \left( \dot{v}_b^* - \left[ \frac{A_p^2}{A_m K_m V} (v_f - v_b - v_r) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta \pi - \frac{1}{2} \frac{A_p e_{vb} v_b^2}{V} \right] \right) \\ f(e_{vr}) &= \left( \dot{v}_r^* - \left[ \frac{A_p^2}{A_m K_m V} (v_f - v_b - v_r) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta \pi - \frac{1}{2} \frac{A_p e_{vr} v_r^2}{V} \right] \right) \end{aligned} \quad (III.48)$$

En remplaçant l'équation (III.48) dans (III.47) :

$$\dot{V} = e_1 \cdot f(e_{vb}) + e_2 \cdot f(e_{vr}) \quad (III.49)$$

On trouve :

$$\begin{aligned} e_1 \cdot f(e_{vb}) &= -k_1 e_1^2 \\ e_2 \cdot f(e_{vr}) &= -k_2 e_2^2 \end{aligned} \quad (III.50)$$

Avec  $k_1$  et  $k_2$  sont des constantes positives.

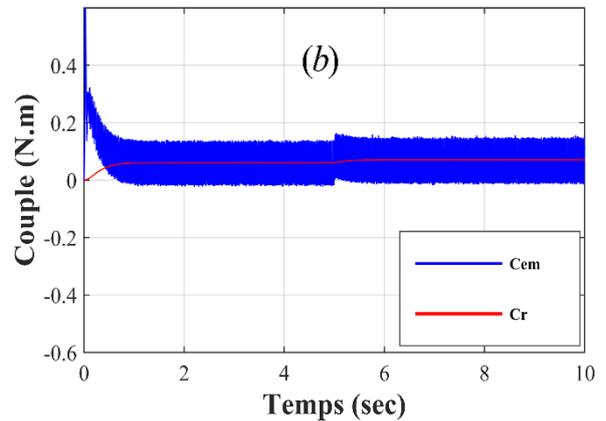
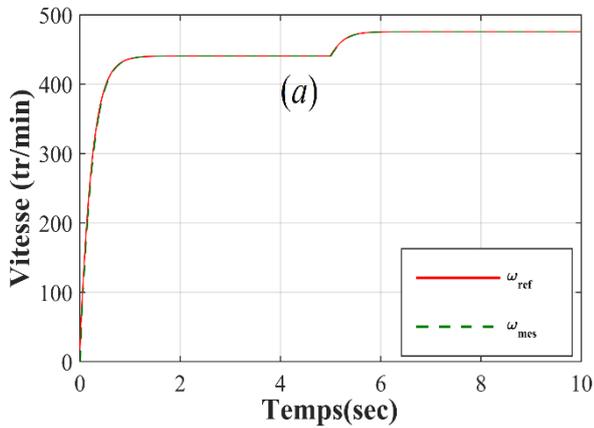
$$\begin{aligned} \dot{v}_b^* - \frac{A_p^2}{A_m K_m V} (v_f - v_b - v_r) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta\pi - \frac{1}{2} \frac{A_p e_{vb} v_b^2}{V} &= -k_1 e_1 \\ \dot{v}_r^* - \frac{A_p^2}{A_m K_m V} (v_f - v_b - v_r) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta\pi - \frac{1}{2} \frac{A_p e_{vr} v_r^2}{V} &= -k_2 e_2 \end{aligned} \quad (III.51)$$

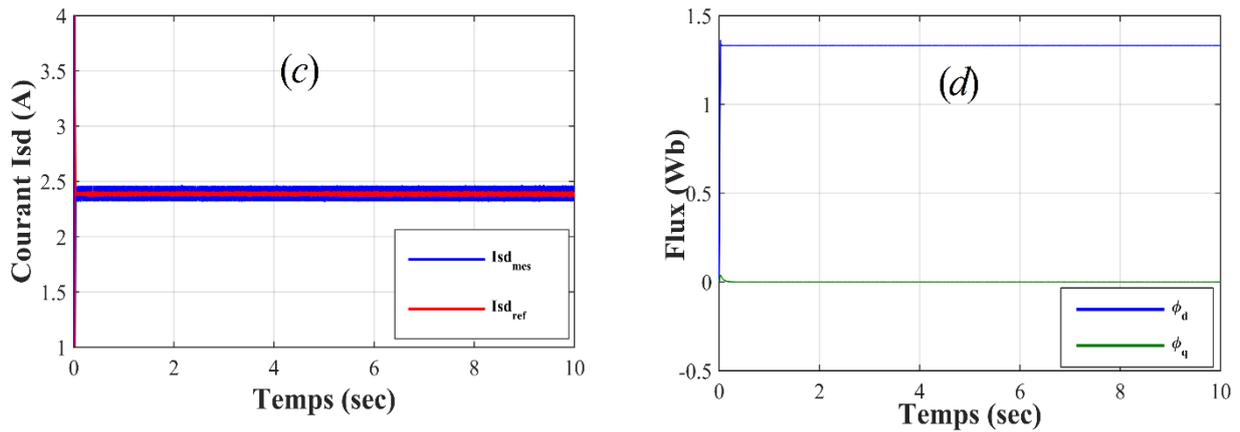
Avec cette structure de commande calculée on assure que le système soit asymptotiquement stable.

$$\begin{aligned} e_{vb} &= \frac{2V}{A_p v_b^2} \left( -k_1 e_1 + \frac{A_p^2}{A_m K_m V} (v_f - v_r - v_b) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta\pi - \dot{v}_b^* \right) \\ e_{vr} &= \frac{2V}{A_p v_r^2} \left( -k_2 e_2 + \frac{A_p^2}{A_m K_m V} (v_f - v_r - v_b) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta\pi - \dot{v}_r^* \right) \end{aligned} \quad (III.52)$$

#### IV.11. Résultats de simulations et interprétations

Dans un premier temps, nous avons commencé par la simulation du schéma global qui est décrit par la *FigII.1* afin d'étudier le comportement du processus RO lors de l'application d'une commande non linéaire basée sur une fonction de Lyapunov avec un changement de référence.



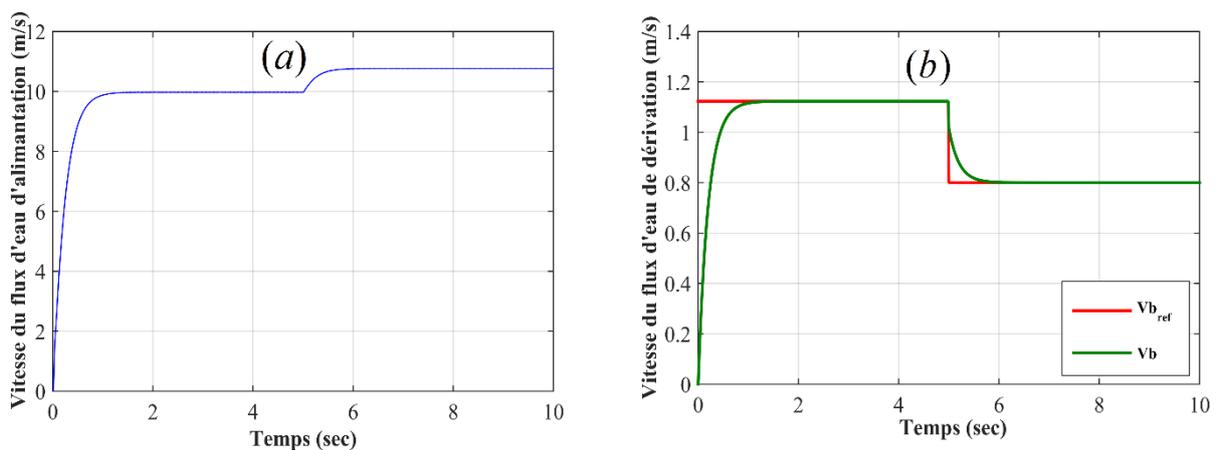


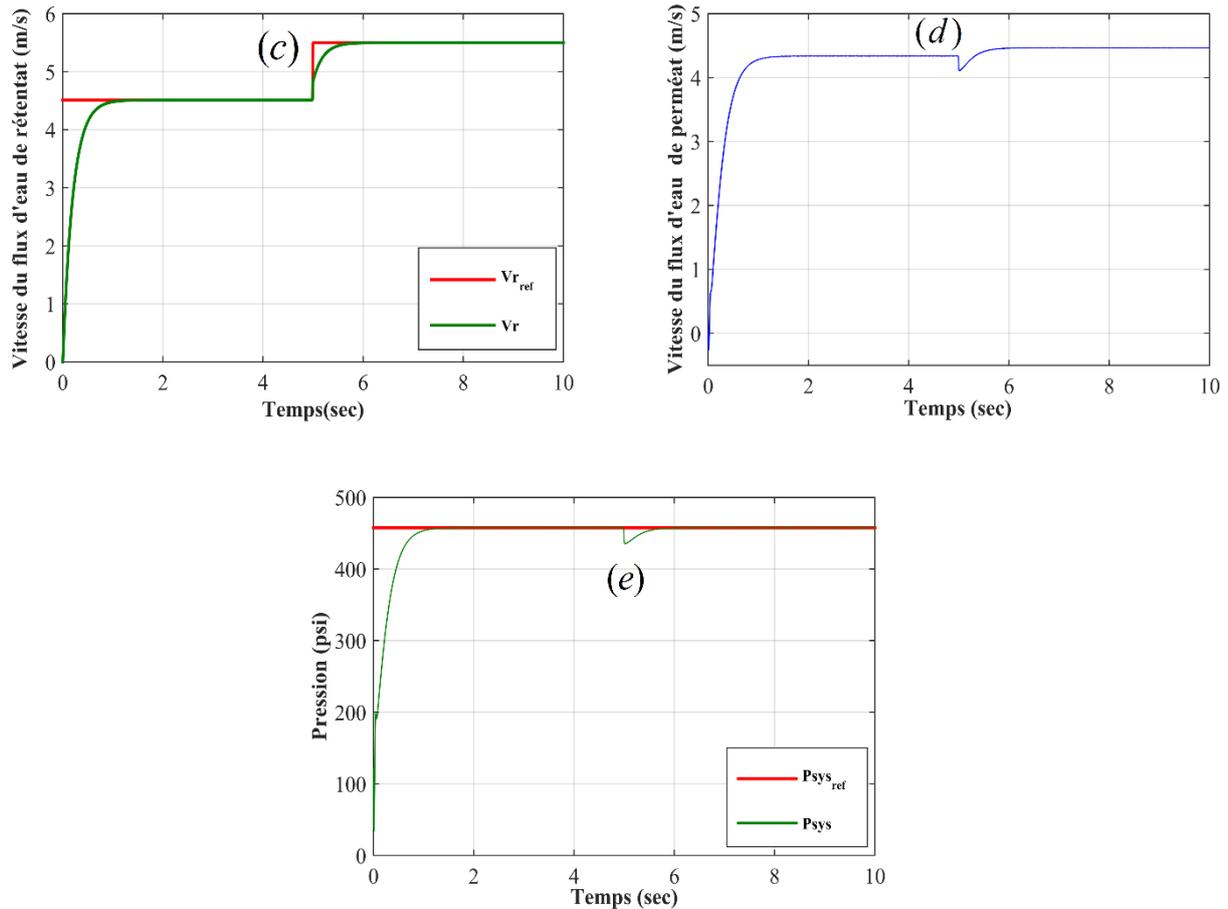
FigIII.10 :(a) vitesse du variateur de fréquence ( $S_{VFD}$ ) (b) Couple résistif ( $C_r$ ) et réponses de couple électromagnétique ( $C_{em}$ ) (c) courant direct ( $i_{sd}$ ) (d) Réponse en flux du rotor ( $\phi_d$ ) et ( $\phi_q$ ).

La figure III.10(a) montre que la vitesse du moteur à induction suit sa référence qui est imposée par le régulateur de la pression du système ( $S_{VFD}$ ) avec une bonne dynamique qui montre l'efficacité du régulateur ( $S_{VFD}$ ), ce qui permet ensuite d'obtenir le débit souhaité de la pompe.

Le couple électromagnétique instantanément chute à une valeur constante en régime permanent ; elle est égale au couple de la pompe (Figure. III.10(b)).

Le courants ( $i_{sd}$ ) suit sa référence grâce à son régulateur PI (figure. II.1(c)), Le flux quadratique est nul ce qui montre que le découplage est bien réalisé et le flux direct est constant la figure III.10(d).





FigIII.11 : (a)vitesse de flux d'eau d'alimentation( $v_f$ ) (b) vitesse de flux d'eau de dérivation( $v_b$ ) (c) vitesse de flux d'eau de rétentat( $v_r$ ) (d) vitesse de flux d'eau de perméat( $v_p$ ) (e) Pression du système ( $P_{sys}$ ).

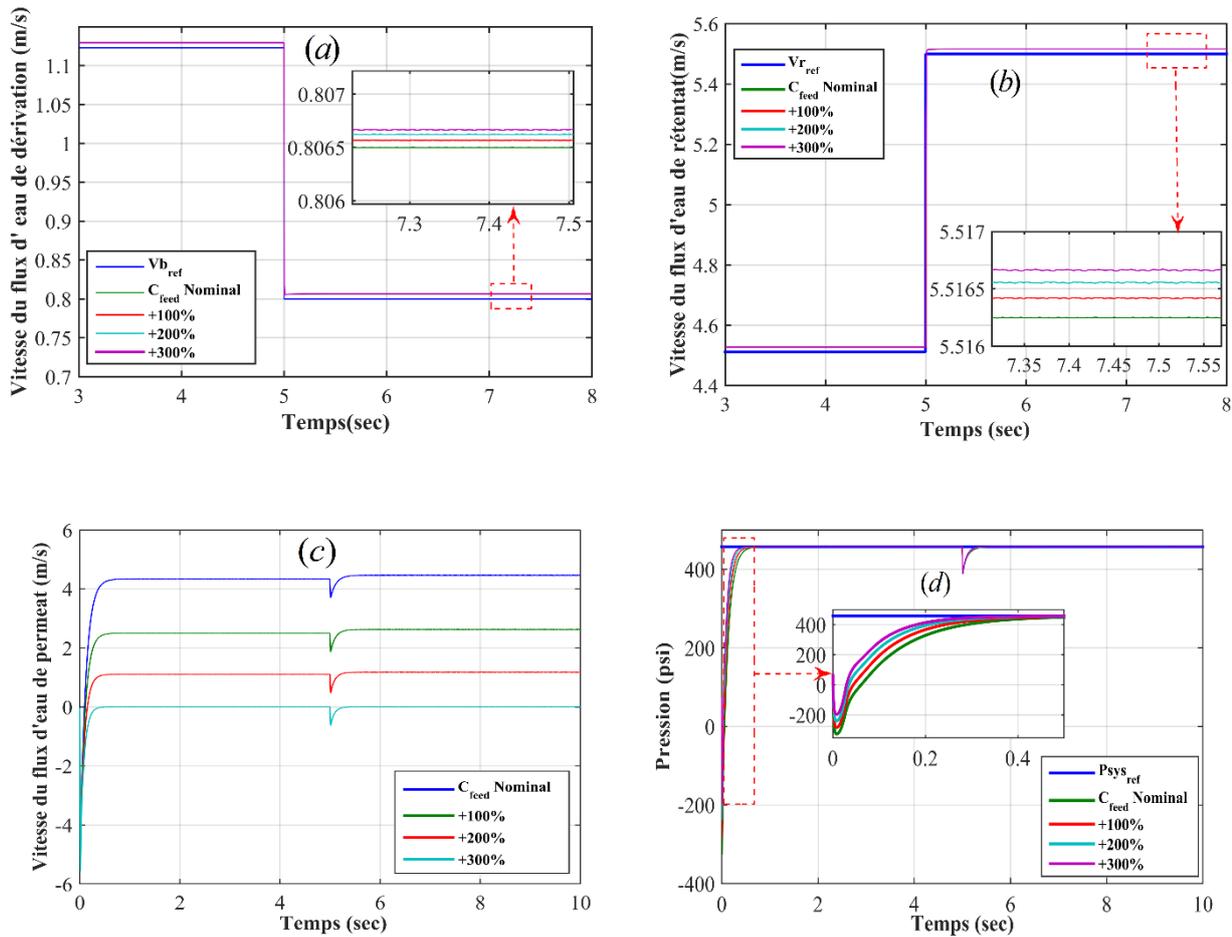
Dans la *figure (a)* on remarque une augmentation du flux d'alimentation ( $v_f$ ) en raison du changement des références.

La vitesse du flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) et de rétentât ( $v_r$ ) suivent ses références avec dynamique lente.

La *figure (d)* montre l'allure de la vitesse du flux d'eau de perméat ( $v_p$ ) à la sortie de la membrane. On remarque que ( $v_p$ ) s'écarte légèrement puis elle converge vers sa consigne. Le contrôle de la vitesse du flux d'eau de perméat dépend du contrôle de la vitesse du flux de dérivation( $v_b$ ), de la vitesse du flux d'eau de rétentât ( $v_r$ ) et la pression du système( $p_{sys}$ ).

La *figure (e)* montre que la pression du système s'écarte d'abord légèrement de la valeur souhaitée, à l'instant  $t = 5s$  lorsqu'un changement se produit dans les valeurs de référence de ( $v_b$  et  $v_r$ ) puis atteint sa référence avec une bonne dynamique, ce qui montre l'efficacité du régulateur *PI*. La pression du système ( $P_{sys}$ ) est la variable directe ayant un effet sur les autres variables ( $v_b$ ,  $v_r$ ,  $v_p$ ).

Le deuxième ensemble de simulation est conçu pour tester la robustesse de la commande proposée lorsqu'elle est présentée avec une variation de la qualité d'eau d'alimentation ( $C_{feed}$ ).



FigIII.12 : Résultats de la réponse du système de RO en cas de variation de la concentration d'alimentation ( $v_f$ )(b) vitesse de flux d'eau de dérivation( $v_b$ ) (c) vitesse de flux d'eau de rétentat ( $v_r$ ) (d) vitesse de flux d'eau de perméat ( $v_p$ )(e) Pression du système ( $P_{sys}$ ).

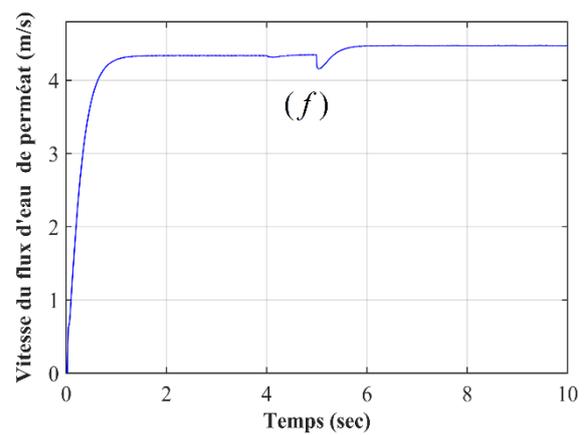
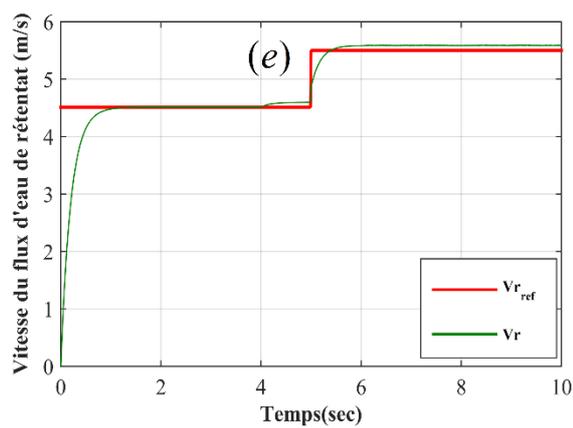
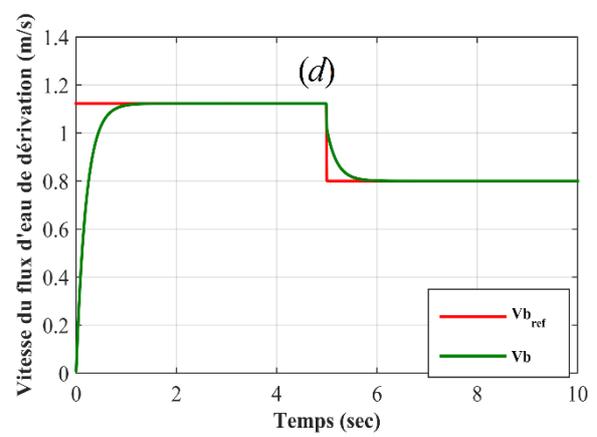
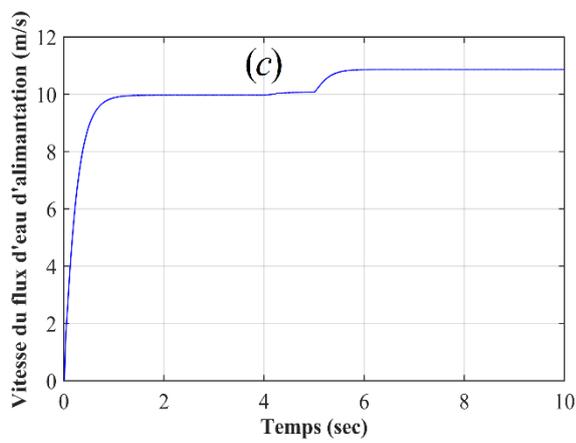
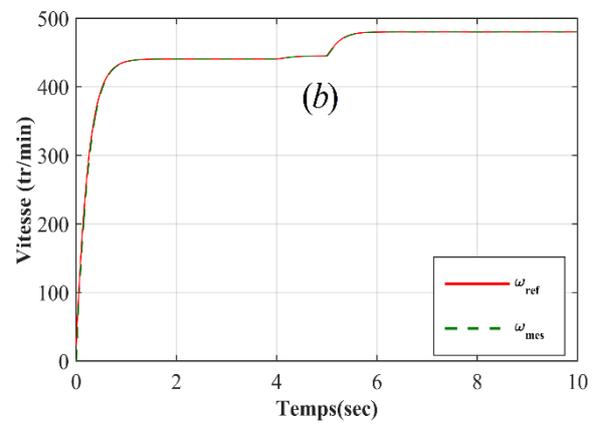
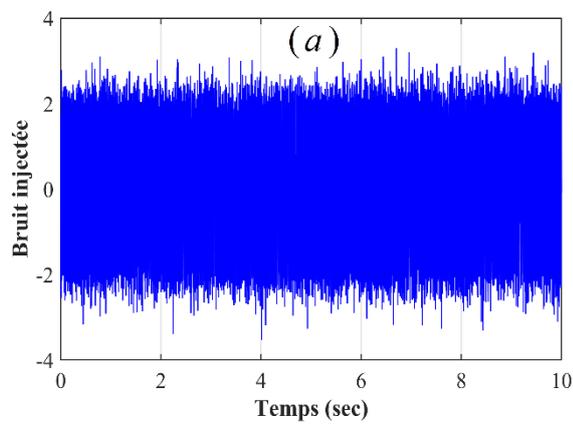
On observe dans la *figureIII.12(a)* et *(b)* que les réponses de la vitesse du flux d'eau de dérivation et la vitesse de flux de rétentat ( $v_r$ ) convergent vers les valeurs désirées avec une erreur statique.

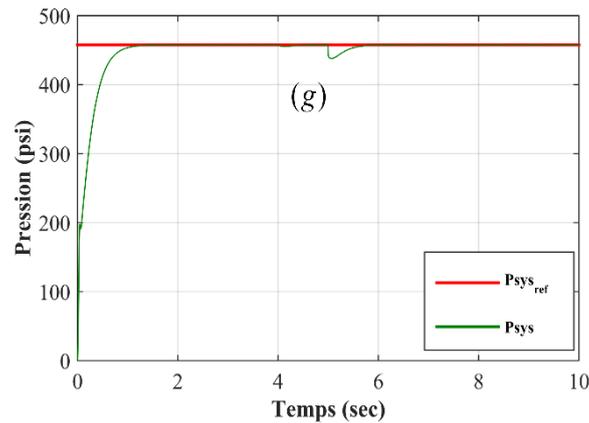
La commande basée sur une fonction de Lypounuv s'adapte à ces changements de paramètres, mais en présence des erreurs statiques.

Comme le montre la *figureIII.12(c)*, la vitesse du flux d'eau de perméat( $v_p$ ) diminue lorsque la concentration d'alimentation augmente ( $C_{feed}$ ), accompagnée d'une augmentation de la pression osmotique entraîne une augmentation de la résistance de l'écoulement à travers la membrane.

L'augmentation de la pression osmotique force la pression du système à augmenter afin de maintenir l'équilibre.

Par conséquent, la commande du ( $S_{VFD}$ ) doit abaisser le débit d'alimentation pour maintenir la pression du système au niveau réglé point de  $457,51 \text{ psi}$  comme indiqué à la Fig. III.12(d).





FigIII.13 : Résultats de la réponse du système d'osmose inverse dans des conditions bruyantes. (a) bruit injecté. (b) vitesse du variateur de fréquence ( $S_{VFD}$ ) (c) vitesse de flux d'eau d'alimentation ( $v_f$ ) (d) vitesse de flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) (e) vitesse de flux d'eau de rétentat ( $v_r$ ) vitesse de flux d'eau de perméat ( $v_p$ ) (g) Pression du système ( $P_{sys}$ ).

À cette fin, la mesure de bruit gaussien blanc supplémentaire est illustré à la *figure*.

III.13(a).

Comme le montre la *figure III.13(e)*, lorsque nous introduisons le signal de bruit, la commande basée sur une fonction de Lyapunov rejette environ 70 % du bruit de la mesure du capteur et force l'état de la grandeur mesurée (vitesse du flux d'eau de rétentat) pour correspondre à sa référence à l'état stationnaire.

En outre, la vitesse de flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) n'est pas affectée par la mesure incertitude relative au bruit (*figure. III.13(d)*).

Dans la *figure III.13(g)*, la pression du système s'écarte légèrement puis elle suit sa consigne de 457.51 psi .

Le bon comportement de la pression du système se traduit par une réponse en douceur de la vitesse de la pompe (il n'y a pas d'oscillations) (*Figure. III.13(b)*) et ; à son tour, la vitesse du flux d'alimentation est maintenue à valeur constante  $v_f=10$  m/s (*Figure. III.13(c)*).

La commande basée sur une fonction de Lyapunov élimine le bruit de mesure jusqu'à une certaine limite de plus elle assure un bon fonctionnement du processus de dessalement de l'eau par osmose inverse mais la dynamique des réponses du système est un peu lente.

#### IV.13. Conclusion

Ce chapitre traite les solutions envisageables pour parier au non linéarité de la commande de la chaîne de dessalement (RO). La première solution consiste à linéariser le système autour d'un

point de fonctionnement qui est le nœud stable du système. En premier temps on a appliqué la commande par retour d'état. En deuxième temps la commande non linéaire basée sur fonction de Lyapunov est appliquée sur le système. Les commandes proposées ont été utilisées pour commander les deux électrovannes de dérivation ( $e_{vb}$ ) et de rétentat ( $e_{vr}$ ) actionnées par la vitesse du flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) et de rétentat ( $v_r$ ).

Le contrôleur  $PI$  a été utilisé pour le réglage de la pression du système  $S_{VFD}$ , en ajustant le débit d'alimentation ( $V_f$ ).

L'architecture globale du système de dessalement d'eau par osmose inverse a été implémentée sur Matlab/Simulink. Il contient une source d'alimentation directe, une machine à induction associée à une pompe centrifuge et une membrane d'osmose inverse.

Chaque partie de cette structure a été présentée avec son propre contrôle. La performance de la commande proposée pour la membrane d'osmose inverse a été analysée dans plusieurs conditions tel que les conditions nominales et avec des incertitudes causées par des variations paramétriques, on tient donc compte du bruit de mesure.

Les résultats de simulation obtenus confirment la robustesse et l'efficacité de la commande non linéaire basée sur une fonction de Lyapunov par rapport à la commande par retour d'état. La dernière solution envisageable qui sera l'originalité de notre travail et la commande par mode glissant applicable à la membrane (RO).

# Chapitre IV

---

Commande par mode glissant du système  
de dessalement d'osmose inverse

---

## IV.1. Introduction

La commande par mode glissant a connu un essor considérable durant les dernières décennies [30]. Cela est dû à ses performances, principalement à la propriété de convergence rapide et en temps fini des erreurs, ainsi, que la grande robustesse par rapport aux erreurs de modélisation et certains types de perturbations extérieures [31].

Ce chapitre est consacré à l'application de la commande par mode glissant au niveau de la membrane d'osmose inverse. Nous présentons en premier lieu le principe de la commande par modes glissants d'ordre 1. Ensuite nous allons appliquer cette stratégie pour commander la membrane RO afin d'évaluer ses performances et son effet sur le système de dessalement.

## IV.2. Commande par mode glissant

### IV.2.1. Synthèse de la loi de commande

La synthèse de la commande par modes glissants se fait en trois étapes :

- Choix de la surface de glissement
- Etablir la condition de convergence
- Déterminer la loi de commande qui permet d'atteindre la surface souhaitée et d'y demeurer.

### IV.2.2. Choix de la surface de glissement « $S$ »

Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante (IV.1) :

$$\dot{x}^n = f(x, t) + g(x, t)u \quad (IV.1)$$

Où  $f$  et  $g$  sont des fonctions non linéaires,  $g$  est supposée inversible.

$u$  : L'entrée du système.

$x$ : état du système.

Soit  $x_d$  la consigne désirée et  $e$  l'erreur de poursuite définie par :

$$e = x_d - x \quad (IV.2)$$

La formule générale de la surface de glissement est définie en fonction de l'ordre du système comme suit [34] :

$$s(x) = \left( \frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{n-1} e(x) \quad (IV.3)$$

Où  $n$  : le degré relatif du système par rapport à la sortie  $y(t)$ . Il représente le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie  $y(t)$  par rapport au temps, pour y voir apparaître l'entrée.

### IV.2.3 Condition d'existence du mode de glissement

Le choix de la fonction de glissement étant fait, la deuxième étape consiste à concevoir une loi de commande qui puisse amener le vecteur d'état à converger vers la surface et y demeurer

( $S=0$ ). Pour cela, il faut que la loi de commande soit conçue de telle manière à ce que  $S$  soit attractif.

Pour déterminer la condition d'attractivité, considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$v(s) = \frac{1}{2} s^2$$

Une condition nécessaire et suffisante, appelée condition d'attractivité, pour qu'une variable de glissement  $s(x, t)$  tende vers 0 est que la dérivée temporelle de  $S$  soit définie négative :

$$\dot{s}.s < 0 \quad (IV.4)$$

Si la condition (IV.4) est vérifiée, alors la variable de glissement et sa dérivée sont de signe contraire quel que soit le temps et que 0 est un centre attracteur pour  $S$ .

Le temps de convergence, ou le temps d'atteinte « reaching time »  $tr$  dépend directement du choix de  $S$ .

Pour une convergence en temps fini, la condition (IV.4) qui ne garantit qu'une convergence asymptotique vers la surface de glissement est remplacée par une condition plus restrictive dite de  $\eta$ -attractivité et donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{s}.s &\leq -\eta|s| \\ \eta &\geq 0 \end{aligned} \quad (IV.5)$$

### 1.2.4 calcul de la commande

Dans notre cas, la méthode choisie est celle de la commande équivalente. La commande équivalente est une fonction continue qui sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement :

$$\{s = 0\}$$

Elle est obtenue grâce aux conditions d'invariance de la surface :

$$s = 0$$

$$\dot{s} = 0 \quad (IV.6)$$

Où

$u_q$  est déduite de la relation

$$\dot{s} = 0$$

Physiquement la commande équivalente présente la valeur moyenne de la commande  $u$ . Cependant, cette commande ne force pas les trajectoires du système à converger vers la surface de glissement. Ainsi, la commande  $u$  est la somme de la commande équivalente et d'une composante discontinue assurant une convergence et un régime glissant.

$$u = u_{eq} + u_d \quad (IV.7)$$

Avec :

$$u_d = -\alpha \text{sign}(s)$$

$\alpha$  est une constante positive,  $\text{sign}$  est la fonction signe et  $u_d$  est la commande discontinue.

D'autres fonctions existent telles que les fonctions,  $\tanh(s/\varepsilon)$ ,  $2\pi \arctan(s/\varepsilon)$  ...)

### IV.3. Applications de la commande par mode glissant dans un système de dessalement par osmose inverse (RO)

Nous considérons le système (II.16) comme suit [32] :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)U \\ y = h(x) \end{cases} \quad (IV.8)$$

Avec

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_r \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{vb} \\ e_{vr} \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} v_b \\ v_r \\ p_{sys} \end{bmatrix} \quad (IV.9)$$

Et

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p_{sys} A_p}{\rho V} \\ \frac{p_{sys} A_p}{\rho V} \end{bmatrix} \quad (IV.10)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_1(x) \\ g_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \left( \frac{A_p v_b^2}{V} \right) \\ -\frac{1}{2} \left( \frac{A_p v_r^2}{V} \right) \end{bmatrix} \quad (IV.11)$$

La loi de commande  $U = [u_1 u_2]^T$  est conçue pour conduire le système à la surface souhaitée

$S = [s_1 s_2]^T$  cette dernière est conçue comme :

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_b - v_{bref} \\ v_r - v_{rref} \end{bmatrix} \quad (IV.12)$$

Où  $S$  est les surfaces de glissement de la vitesse du flux d'eau de dérivation et de retentat respectivement

#### Proposition 1

Considérons le système (II.11) et la surface de glissement  $S$  définie dans (IV.12). Soit

$U = U_{eq} + U_n$  avec

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1eq} + u_{1n} \\ u_{2eq} + u_{2n} \end{bmatrix} \quad (IV.13)$$

$$U_n = k \operatorname{sign}(s(x)) \quad (IV.14)$$

Où

$U_n$  : est le terme de contrôle de commutation. Le terme de contrôle de commutation fait le système, quel que soit son état initial, atteint le collecteur coulissant en temps fini, qui sont calculés par application de la commande par mode glissant.

$U_{eq}$  : est le terme de contrôle équivalent. Le terme de contrôle équivalent faire bouger le système le long du collecteur coulissant dans des conditions idéales, et ces termes peuvent accélérer la réponse du système et réduire les erreurs à l'état d'équilibre [33].

Les termes de contrôle équivalents sont calculés en définissant :

$$\begin{aligned} \dot{S} &= 0 \\ \dot{S} &= \begin{bmatrix} \dot{S}_1 \\ \dot{S}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}_b - \dot{v}_{bref} \\ \dot{v}_r - \dot{v}_{rref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (IV.15)$$

$$U_{eq} = \begin{bmatrix} u_{1eq} \\ u_{2eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{v}_{bref} V - \frac{A_p^2}{A_m K_m} (v_f - v_b - v_r) - \frac{A_p}{\rho} \Delta \pi}{-0.5 A_p v_b^2} \\ \frac{\dot{v}_{rref} V - \frac{A_p^2}{A_m K_m} (v_f - v_b - v_r) - \frac{A_p}{\rho} \Delta \pi}{-0.5 A_p v_r^2} \end{bmatrix} \quad (IV.16)$$

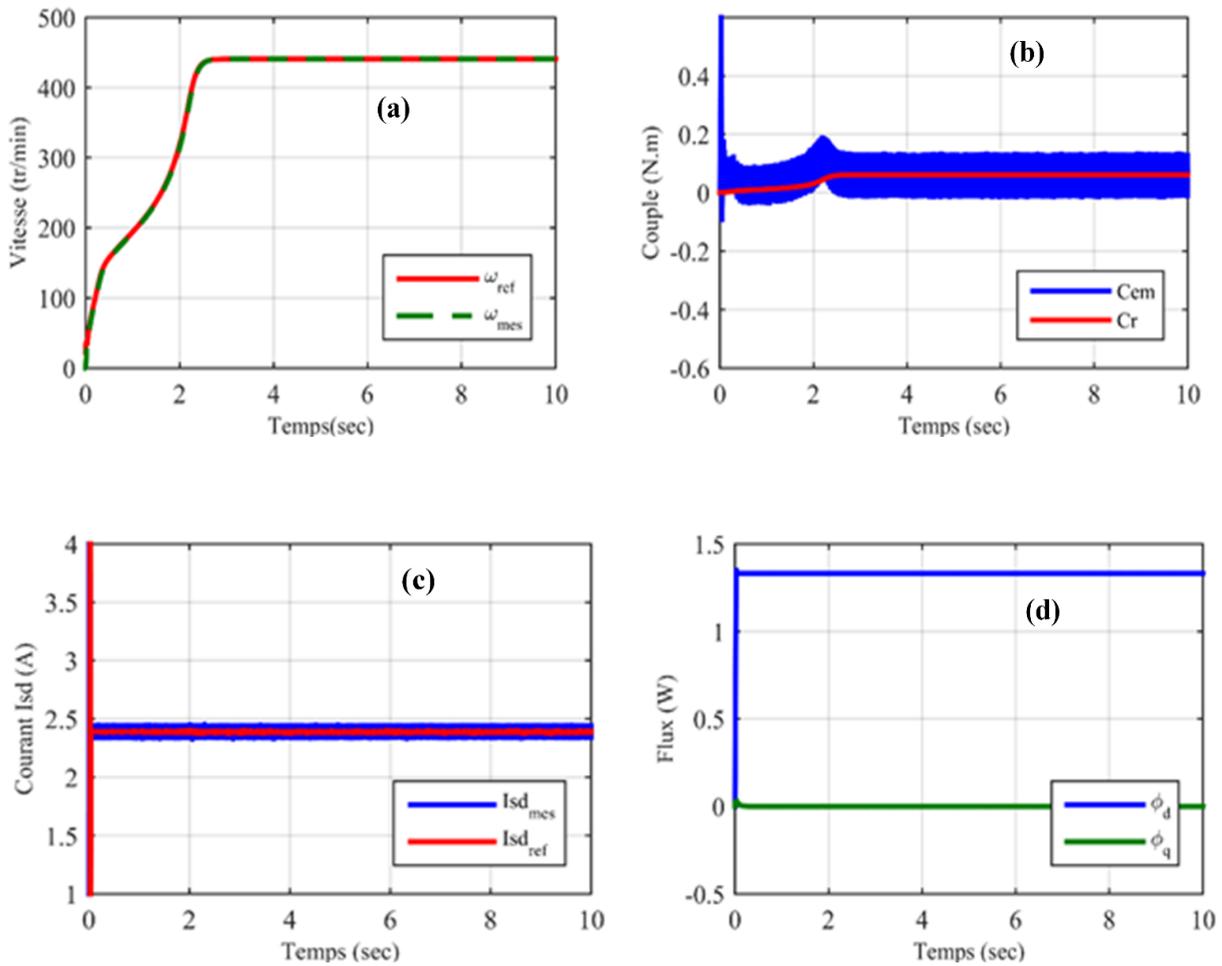
En utilisant les équations (II.16), (II.17) et (II.18)

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{v}_{bref} V - \frac{A_p^2}{A_m K_m} (v_f - v_b - v_r) - \frac{A_p}{\rho} \Delta \pi}{-0.5 A_p v_b^2} + k_1 \operatorname{sign}(s_1) \\ \frac{\dot{v}_{rref} V - \frac{A_p^2}{A_m K_m} (v_f - v_b - v_r) - \frac{A_p}{\rho} \Delta \pi}{-0.5 A_p v_r^2} + k_2 \operatorname{sign}(s_2) \end{bmatrix} \quad (IV.17)$$

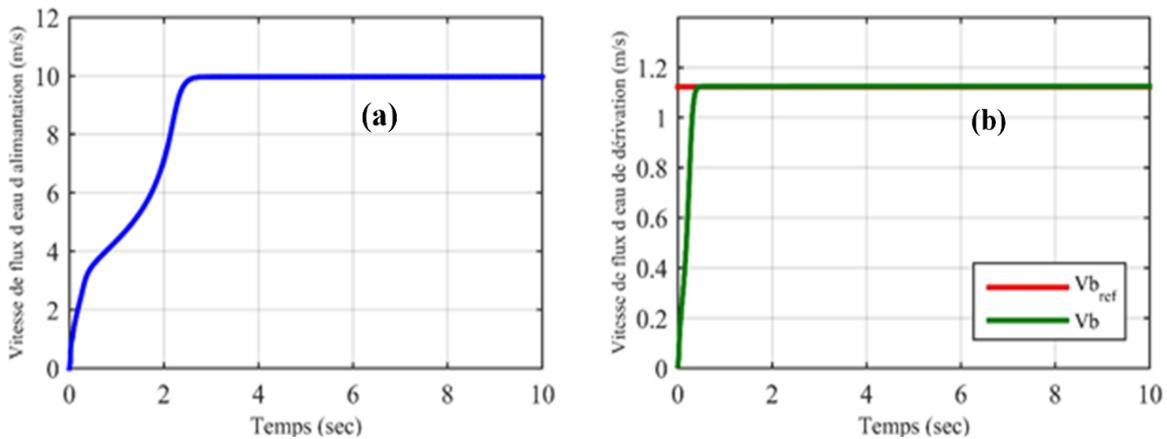
#### IV.4. Résultats de simulations et interprétations

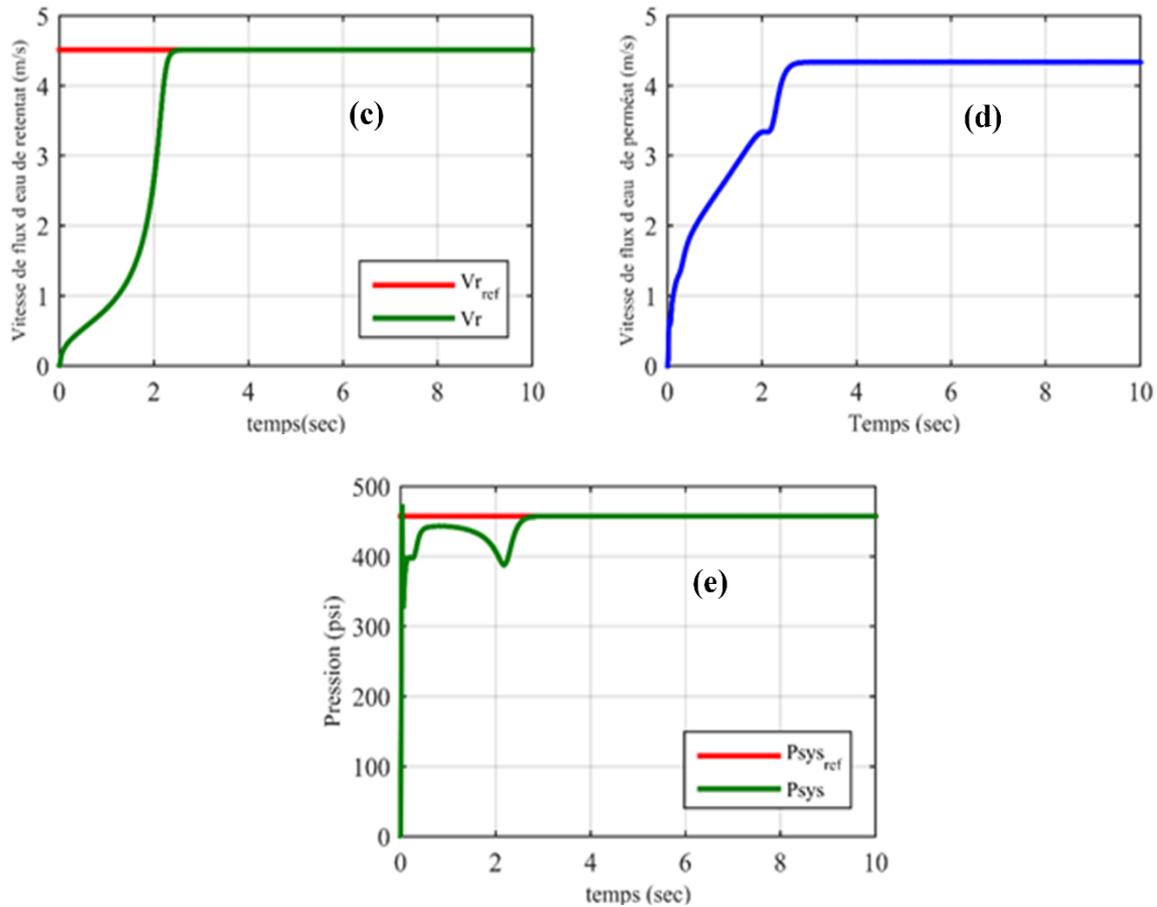
Afin de démontrer l'efficacité de la commande appliquée au système de dessalement d'eau par osmose inverse, plusieurs tests de simulation de la chaîne globale dans des conditions spécifiques sont mis en œuvre dans MATLAB/Simulink à l'aide des paramètres indiqués dans le fichier Annexe A.

Dans un premier temps, nous avons commencé par la simulation du schéma global qui est décrit par la *Figure II.1* afin d'étudier le comportement du processus (RO) lors de l'application de la commande par mode glissant sans aucune perturbation extérieure.



FigIV.1 (a) vitesse du variateur de fréquence ( $S_{VFD}$ ) (b) Couple résistif et réponses de couple électromagnétique (c) Réponse du courant statorique direct ( $i_{sd}$ ) (d) Réponse en flux du rotor.





FigIV.2 : (a)vitesse de flux d'eau d'alimentation (b) vitesse de flux d'eau de dérivation (c) vitesse de flux d'eau de rétentat (d) vitesse de flux d'eau de perméat (e) Pression du système ( $P_{sys}$ ).

La *Figure. IV.1(a)* montre clairement que la vitesse du moteur à induction suit parfaitement sa référence qui est imposée par le régulateur de la pression du système ( $S_{VFD}$ ) (*FigureII.1*) avec une bonne dynamique qui montre l'efficacité du régulateur ( $S_{VFD}$ ) (*Fig.II.1*), ce qui permet ensuite d'obtenir le débit souhaité de la pompe.

Le couple électromagnétique instantanément chute à une valeur constante en régime permanent ; elle est égale au couple de la pompe (*Figure. IV.1(b)*).

Le courant statorique ( $i_{sd}$ ) suit sa référence avec précision grâce à la fonction de son régulateur ( $PI$ ) (*Figure. IV.1(c)*).

La *Figure. IV.1(d)* montre le comportement de l'élément flux direct et quadratique du rotor. Nous remarquons que le flux quadratique est nul et le flux direct est constant, ce qui confirme que le découplage est très bien réalisé.

Un contrôleur ( $PI$ ) robuste est appliqué dans la première boucle pour amener le système pression jusqu'à un point de consigne de  $P_{sys}=457.51 \text{ psi}$  en ajustant la vitesse du  $S_{VFD}$  qui permet au système de contrôle d'ajuster la vitesse du flux d'eau d'alimentation ( $v_f$ ). Au fur et à mesure vu

dans la *Figure. IV.2(a)*, la vitesse du flux d'alimentation est fixée à une valeur constante  $v_f=10$  m/s (valeur de consigne) à l'entrée de la membrane car la pompe atteint sa vitesse optimale (*Figure. IV.1(a)*). On remarque que le débit (vitesse d'écoulement) de la pompe dépend de la vitesse du moteur à induction.

La vitesse du flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) et la vitesse du flux d'eau de rétentat ( $v_r$ ) ont été réglées sur 1,123 m/s et 4,511 m/s respectivement.

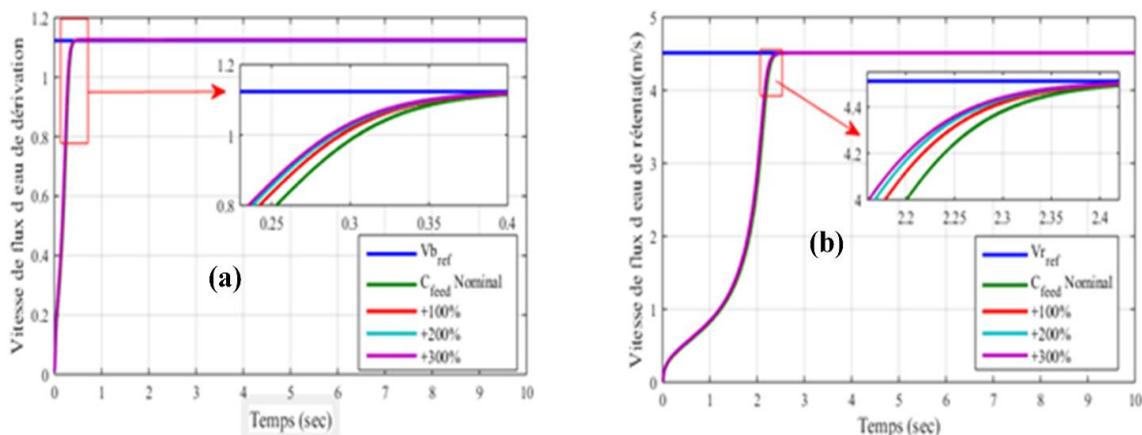
Les *Figure. IV.2(b)* et (c) montrent l'efficacité du régulateur proposé où la vitesse du flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) et la vitesse du flux d'eau du rétentat ( $v_r$ ) sont converger rapidement vers ses valeurs désirées. La commande par mode glissant permet d'obtenir un bon suivi des grandeurs désirées avec un temps de réponse réduit et aucun dépassement.

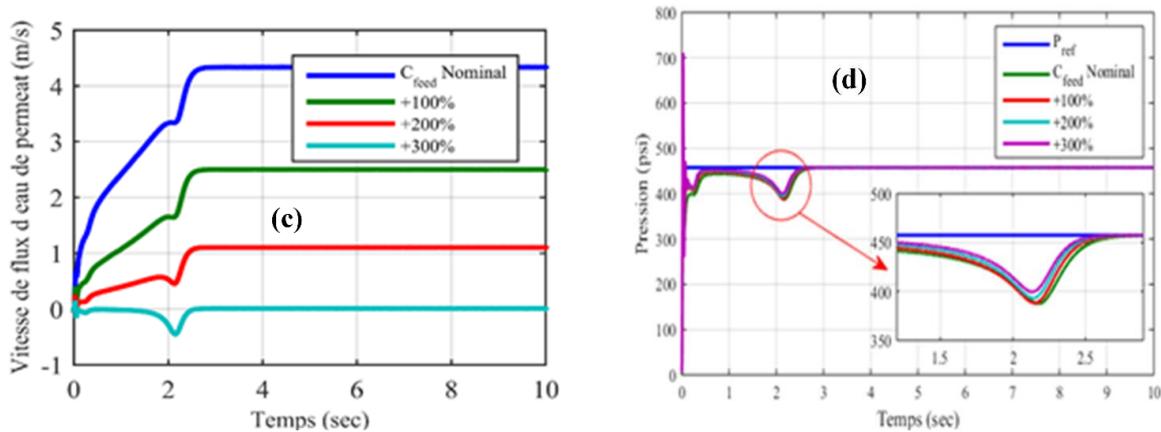
La figure IV.2(d) montre le comportement de la vitesse du flux de perméat ( $v_p$ ) à la sortie de la membrane. Contrôle de la vitesse du flux de perméat dépend du contrôle de la vitesse du flux de dérivation, et de la vitesse du flux d'eau de rétentat et la pression du système.

La figure IV.2(e) montre que la pression du système s'écarte d'abord légèrement de la valeur souhaitée, puis atteint sa valeur de référence avec une bonne dynamique, ce qui montre l'efficacité du régulateur PI. La pression du système ( $P_{sys}$ ) est la variable directe ayant un effet sur les autres variables ( $v_b, v_r, v_p$ ).

En fait, le contrôle de la pression du système est la clé de la performance du dessalement par osmose inverse.

Le deuxième ensemble de simulation est conçu pour tester la robustesse de la commande proposée lorsqu'elle est présentée avec une variation de la qualité d'eau d'alimentation ( $C_{feed}$ ).





FigIV.3 : Résultats de la réponse du système de (RO) en cas de variation de la concentration d'alimentation. (a) vitesse de flux d'eau de dérivation ( $v_b$ )(b) vitesse de flux d'eau de rétentat ( $v_r$ ) (c) vitesse de flux d'eau de perméat ( $v_p$ ) (d) Pression du système ( $P_{sys}$ ).

On peut observer dans la *Figure. IV.3(a)* et *(b)* que les réponses de la vitesse du flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) et la vitesse de flux de rétentat ( $v_r$ ) convergent assez rapidement vers les valeurs désirées et ne présentent aucune erreur en régime permanent pendant tous les changements de concentration d'eau d'alimentation.

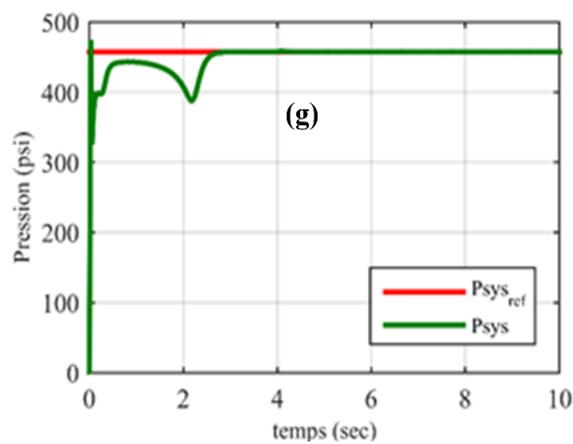
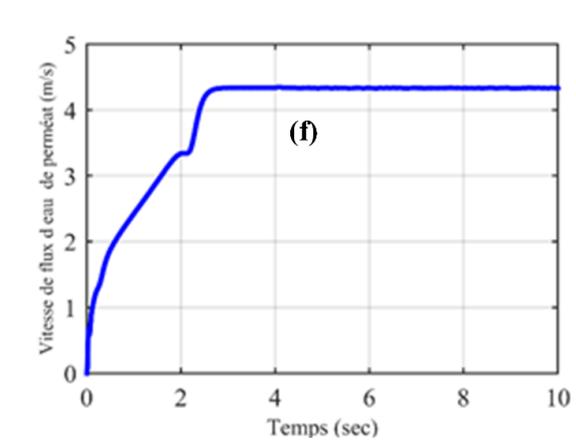
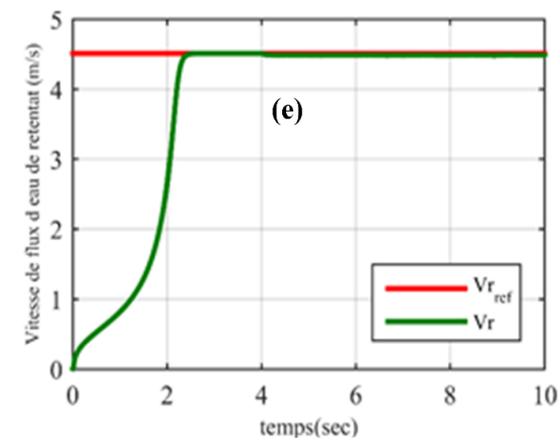
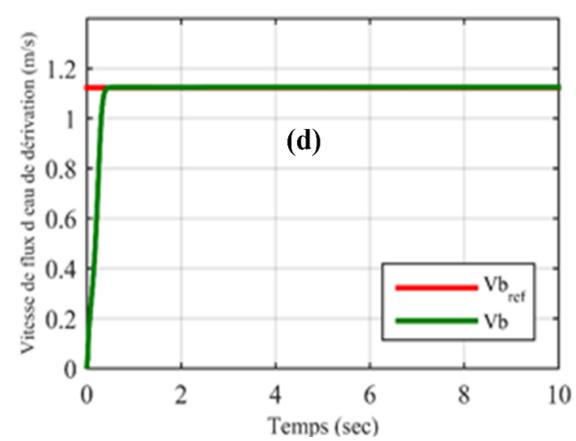
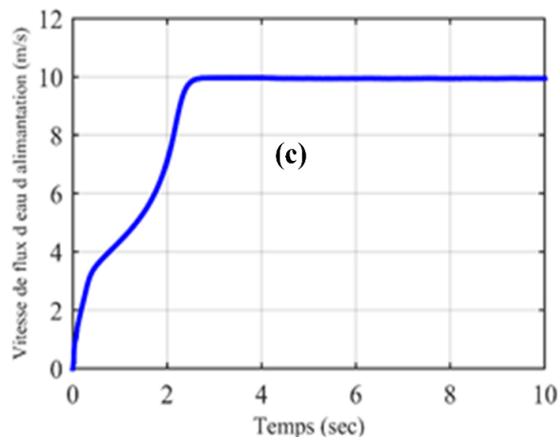
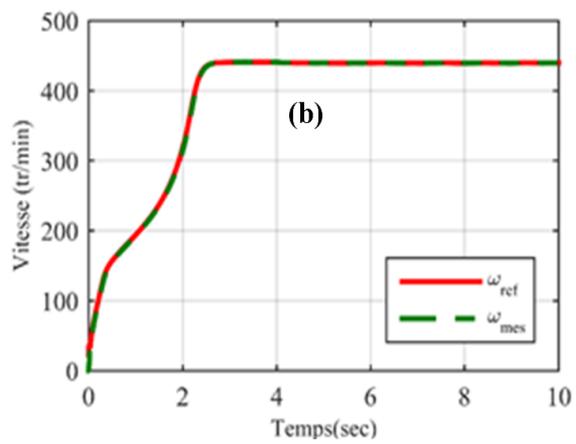
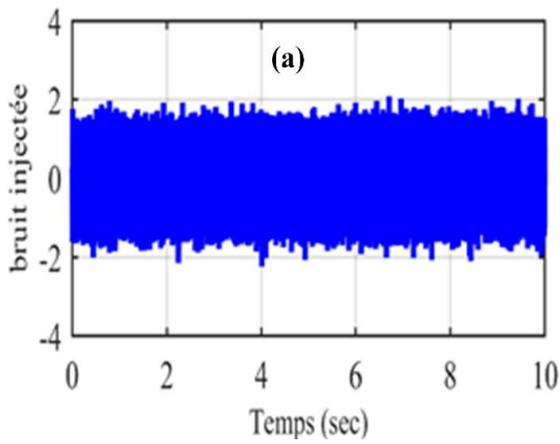
On peut clairement remarquer que la commande par mode glissant peut s'adapter efficacement à ces changements de paramètres, avec d'excellentes performances.

Comme le montre la *figure IV.3(c)*, la vitesse du flux d'eau de perméat ( $v_p$ ) diminue lorsque la concentration d'alimentation augmente, ce résultat est attendu en raison de l'augmentation dans la concentration d'eau d'alimentation, accompagnée d'une augmentation de la pression osmotique entraîne une augmentation de la résistance de l'écoulement à travers la membrane.

L'augmentation de la pression osmotique force la pression du système à augmenter afin de maintenir l'équilibre.

Par conséquent, la commande du  $S_{VFD}$  doit abaisser le débit d'alimentation pour maintenir la pression du système au niveau réglé point de  $457,51 \text{ psi}$  comme indiqué à la *figure. IV.3(d)*.

Dans les opérations réelles de l'usine de dessalement d'eau par RO, les sorties mesurées sont soumises à des bruits de mesures des capteurs. Dans la troisième série de simulations, nous introduisons un signal de bruit à  $t=4 \text{ s}$  dans le capteur de mesure de flux de rétentat pour vérifier l'aptitude du régulateur à contrôler de manière efficace, manipuler le système dans des conditions bruyantes.



FigIV.4 : Résultats de la réponse du système d'osmose inverse dans des conditions bruyantes.

(a) bruit injecté. (b) vitesse du variateur de fréquence ( $S_{VFD}$ ) (c) vitesse de flux d'eau de dérivation ( $v_d$ ) (d) vitesse de flux d'eau d'alimentation (e) vitesse de flux d'eau de rétentat ( $v_r$ ) (f) vitesse de flux d'eau de perméat ( $v_p$ ) (g) Pression du système ( $P_{sys}$ ).

À cette fin, la mesure de bruit gaussien blanc supplémentaire est illustré à la Fig. IV.3(a).

Comme le montre la Fig. IV.4(e), nous avons remarqué que lorsque nous introduisons le signal de bruit, la commande par mode glissant rejette environ 90 % du bruit de la mesure du capteur et force l'état de la grandeur mesurée (vitesse du flux d'eau de rétentat) pour correspondre à sa référence en régime permanent.

En outre, la vitesse de flux d'eau de dérivation n'est pas affectée par l'incertitude du bruit de mesure (Fig. IV.4(d)).

Dans la Fig. IV.4(g), la pression du système est donnée dans des conditions de mesure bruyantes.

On remarque que la pression du système s'est maintenue stable et assez proche de sa référence ; le bruit de mesure doit être rapidement amorti dans le temps (la boucle de régulation  $S_{VFD}$  est maintenue à une pression de consigne de 457,51 psi). Le bon comportement de la pression du système se traduit par une réponse en douceur de la vitesse de la pompe (il n'y a pas d'oscillations) (Fig. IV.4(b)) et ; à son tour, la vitesse du flux d'alimentation est maintenue à une valeur constante  $v_f=10$  m/s (Fig. IV.4(c)).

Ce résultat démontre l'immunité au bruit de mesure de la commande par mode glissant. De plus, il élimine le bruit de mesure jusqu'à une certaine limite, ce qui signifie que dans le cas de distorsion importante causée par la mesure du bruit. La commande par mode glissant assure un fonctionnement sûr du processus de dessalement d'eau par osmose inverse.

#### **IV.5. Comparaison entre les quatre commandes**

Pour dégager la meilleure commande entre ceux étudiés, on fait une étude comparative en se basant sur les critères représentés dans le tableau suivant :

	Commande par retour d'état	Commande par retour d'état avec action intégrale	Commande basée sur une fonction de Lyapunov	Commande par mode glissant
Temps de réponse	rapide	rapide	rapide	Très rapide
Poursuit de la référence	Pas bonne	bonne	Très bonne	Très bonne
Variations paramétriques	Pas robuste	Pas robuste	robuste	très robuste
Bruits de mesure	Pas robuste	Pas robuste	robuste	Très robuste

D'après le tableau de comparaison on voit bien que la commande mode glissant apparaît robuste par rapport aux trois autres commandes, elle est rapide en plus elle n'est pas influencée par les variations paramétriques et les bruits de mesure.

#### IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité la commande par mode glissant du système de dessalement d'osmose inverse. Cette commande non linéaire a été utilisée pour manipuler les deux électrovannes de dérivation et de retentât c'est à ce niveau qu'on rapporte le plus de problème dans les installations industrielles.

Pour la vitesse qu'on impose au moteur, elle est régulée par un contrôleur PI qu'on déduit de la pression du système SVFD qui est connue pour ses performances industrielles.

L'architecture globale du système de dessalement d'eau par osmose inverse a été implémentée sur Matlab/Simulink, contenant une source d'alimentation directe, une machine à induction associée à une pompe centrifuge et une membrane d'osmose inverse. On a essayé de se rapprocher le plus possible du problème réel.

Chaque partie de cette architecture a été présentée avec son propre contrôle. La performance de la commande proposée pour la membrane d'osmose inverse a été analysée dans plusieurs conditions telles que les conditions nominales et avec des incertitudes causées par des variations paramétriques, ou un bruit de mesure.

Les résultats de simulation confirment la robustesse et l'efficacité de la commande par mode glissant.

## Conclusion générale et perspective

Dans ce travail, l'objectif était de répondre à un besoin industriel très importants, qui est la régulation d'un système de dessalement d'eau par l'osmose inverse (RO) afin de produire l'eau potable. La quasi-totalité des stations de traitement d'eau utilise des régulateurs classiques qui sont dimensionnés au tour d'un point de fonctionnement. Des problèmes surviennent lorsqu'on s'éloigne de ce point. Cela devient critique au niveau de la membrane osmose par conséquent aux niveaux des électrovannes.

En premier nous avons fait une étude bibliographique sur les techniques conventionnelles de dessalement de l'eau. Nous avons exposé l'état de l'art des procédés de dessalement d'eau et nous avons présenté une description des différents procédés de dessalement les plus connus et les plus importants. Cette partie de l'étude nous a permis d'extraire les composants du système qui sont liés par leurs entrées et leurs sorties suite à une modélisation mathématique des différents constituants du système de dessalement d'eau (pompe centrifuge, moteur à induction et la membrane (RO)).

Les modèles obtenus permettent de voir la non linéarité entre les entrées et les sorties du système. Pour parier aux non linéarités de la commande de la chaine de dessalement (RO). La première solution consiste à linéariser le système autour d'un point de fonctionnement qui est le nœud stable du système afin de reproduire les conditions de fonctionnement industriel. En premier temps on a appliqué la commande par retour d'état. En deuxième temps la commande non linéaire basée sur fonction de Lyapunov est appliquée sur le système. Les commandes proposées ont été utilisées pour commander les deux électrovannes de dérivation ( $e_{vb}$ ) et de rétentat ( $e_{vr}$ ) actionnées par la vitesse du flux d'eau de dérivation ( $v_b$ ) et de rétentat ( $v_r$ ).

Le contrôleur PI a été utilisé pour le réglage de la pression du système  $S_{VFD}$ , en ajustant le débit d'alimentation ( $v_f$ ).

L'architecture globale du système de dessalement d'eau par osmose inverse a été alors implémentée sur Matlab/Simulink. Il contient une source d'alimentation directe, une machine à induction associée à une pompe centrifuge et une membrane d'osmose inverse.

La performance de la commande proposée pour la membrane d'osmose inverse a été analysée dans plusieurs conditions tel que les conditions nominales et avec des incertitudes causées par des variations paramétriques, on tient donc compte du bruit de mesure.

Les résultats de simulation obtenus confirment la robustesse et l'efficacité de la commande non linéaire basée sur une fonction de Lyapunov par rapport à la commande par retour d'état. La dernière solution envisageable qui sera l'originalité de notre travail est la commande par mode glissant applicable à la membrane (RO).

Cette commande non linéaire a été utilisée pour manipuler les deux électrovannes de dérivation et de retentât c'est à ce niveau qu'on rapporte le plus de problème dans les installations industrielles.

Pour la vitesse qu'on impose au moteur, elle est régulé par un contrôleur PI qu'on déduit de la pression du système  $S_{VFD}$  qui est connue pour ses performances industrielles.

On a essayé de se rapprocher le plus possible du problème réel.

Chaque partie de cette architecture a été présentée avec son propre contrôle. La performance de la commande proposée pour la membrane d'osmose inverse a été analysée dans plusieurs conditions telles que les conditions nominales et avec des incertitudes causées par des variations paramétriques, ou un bruit de mesure.

Les résultats de simulation confirment la robustesse et l'efficacité de la commande par mode glissant en présence de variation paramétrique ou en présence de bruit.

On rappelle que notre travail s'intègre dans un projet de doctorat au niveau du laboratoire *LGEP* et qui a donné lieu à une publication dans le revue « *Super-twisting sliding mode control and robust loop shaping design of RO desalination process powered by PV generator* » de l'éditeur elsevier » spécialisé dans le sujet.

Dans des travaux futurs on pourra envisager :

- L'utilisation d'une source d'énergie renouvelable pour l'alimentation du système tel que les panneaux photovoltaïques, les éoliennes ou les systèmes hybrides.
- L'application des autres commandes telle que la commande optimale,  $H^\infty$  et super twisting.
- L'utilisation d'une troisième électrovane de régulation pour une commande tolérante aux défauts qui sert d'une électrovane de secours dans le cas d'un blocage éventuel des deux autres électrovannes vu que c'est un problème récurrent en industrie.

---

# Annexes

---

**Annexe :**

**A.1. Les grandeurs et paramètres de la machine à induction (MI) utilisée**

**A.1.1. Grandeurs et paramètres électriques**

$$R_s = 11.3085 \Omega$$

$$R_r = 11.8 \Omega$$

$$L_s = 0.5578 H$$

$$L_r = 0.6152 H$$

$$M_{sr} = 0.5578 H$$

$$P_n = 0.75 KW$$

$$V_s = 220/380 V$$

$$I_{sn} = 2.5 A$$

**A.1.2. Grandeurs et paramètres Mécanique**

$$J = 0.0020 Kgm^2$$

$$F = 0.00031165 Kg m^2/S$$

$$\Omega_n = 2840 tr/min$$

**A.1.3. Grandeurs et paramètres électromécanique**

$$C_n = 2.52 N.m$$

$$P = 1$$

**A.2. Les grandeurs et paramètres de la pompe centrifuge utilisée**

$$Q_{max} = 30 m^3/h$$

$$H = 80 m$$

$$N = 2900 r/min$$

**A.3. Les grandeurs et paramètres de la membrane (RO) utilisée**

$$\rho = 1000 kg/m^3$$

$$V = 0.04 m^3$$

$$A_p = 1.27 cm^2$$

$$A_m = 30 m^2$$

$$K_m = 9.218 \cdot 10^{-9} s/m$$

$$\alpha = 0.5$$

$$T = 25 \text{ }^\circ C$$

$$R = 0.993$$

$$\delta = 0.2641$$

## Annexe B

## B.1. Modélisation de l'onduleur de tension

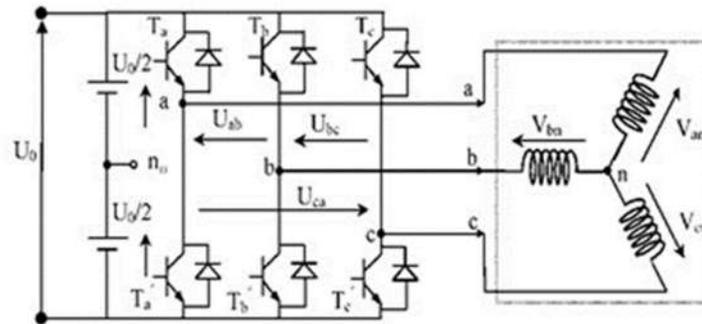


Fig. B.1 : schéma de l'onduleur triphasé deux niveaux.

Pour modéliser l'onduleur de tension, Figure (B.1), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée être constituée de deux générateurs de f.é.m. égale à  $U_0/2$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$ .

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ .

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$ . On appelle  $T_i$  et  $T_i'$  les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux), on a :

Si  $S_i = 1$ , alors  $T_i$  est fermée et  $T_i'$  est ouvert.

Si  $S_i = 0$ , alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est fermée.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = b_{an0} - b_{cn0} \\ U_{bc} = b_{bn0} - b_{an0} \\ U_{ca} = b_{cn0} - b_{bn0} \end{cases} \quad (B.1)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \left(\frac{1}{3}\right)[U_{ab} - U_{ac}] \\ V_{bn} = \left(\frac{1}{3}\right)[U_{bc} - U_{ba}] \\ V_{cn} = \left(\frac{1}{3}\right)[U_{ca} - U_{cb}] \end{cases} \quad (B.2)$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$

$$\begin{cases} V_{an} + V_{mn0} = V_{an} \\ V_{bn} + V_{mn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{mn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (B.3)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{mn0} = \left(\frac{1}{3}\right)[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (B.4)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits :

Si (1 ou 0)  $\{i=a, b, c\}$  on a

$$V_{in0} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad (B.5)$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0.5)U_0 \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5)U_0 \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5)U_0 \end{cases} \quad (B.6)$$

En remplace B (5) dans B (6) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an0} - \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn0} \end{cases} \quad (B.7)$$

En remplaçant B (6) dans (7) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_0}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (B.8)$$

## B.2. Modulation de largeur d'impulsion «MLI »

La modulation de largeur d'impulsion est une technique de découplage de tension ou de courant permettant de générer des formes d'ondes quasi sinusoïdales. L'objectif principal de cette technique est de régler l'amplitude et la fréquence du terme fondamental et de rejeter les harmoniques indésirables générées par une ondulation « pleine onde » vers les fréquences élevées, leurs amplitudes devenant alors négligeables.

Chaque bras de pont Figure (B.1) est chargé de générer par modulation de largeur d'impulsion un signal dont le fondamental est le signal de référence.

Il existe différents types de modulation de largeur d'impulsion :

MLI naturelle ou interjectives : le calcul des instants de commutation se fait par Intersection du signal de référence avec un signal triangulaire.

MLI avec contrôle d'amplitude : l'amplitude crête est constante et pour la valeur efficace du fondamental, on agit sur la largeur des impulsions. Pour maintenir  $U/f=Cte$ , il faut modifier la valeur des angles d'amorçage de MLI pour chaque valeur de vitesse. Ceux –ci sont donc pré calculés et stockés dans une mémoire.

MLI vectorielle : les instants de commutation sont calculés en ligne.

En ce qui nous concerne pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture (instants de commutation) des interrupteurs, on utilise la technique MLI naturelle consistant à comparer le signal de référence onde (modulante) de forme sinusoïdale à faible fréquence, à un signal triangulaire onde (porteuse) de fréquence élevée. Le signal modulé est au niveau haut lorsque la modulante est supérieure à la porteuse et est au niveau bas lorsque la modulante est inférieure à la porteuse. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, Figure (B.2).

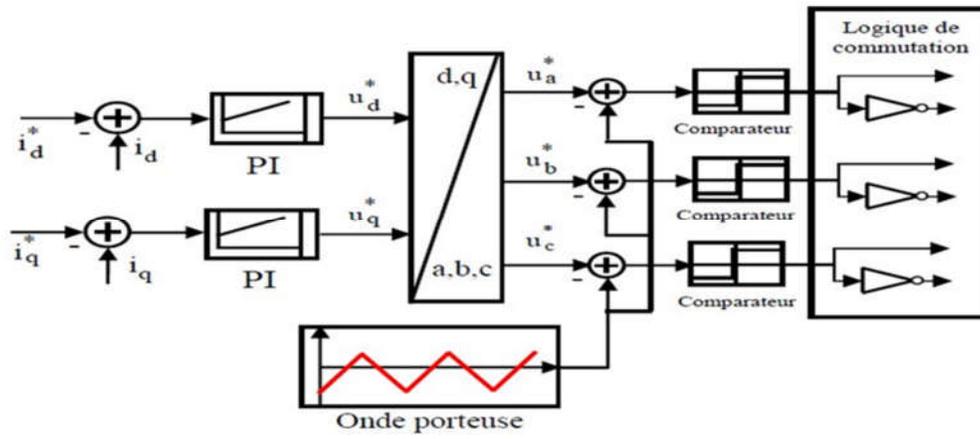


Fig. B 2 : Schéma de principe de la commande par MLI.

## Nomenclatures

### 1. Symbole

$T_r$ :	Couple de charge hydrodynamique de la pompe
$Q$ :	Débit de la pompe
$H$ :	Hauteur totale de la pompe
$L_s$ :	Inductance cyclique propre du stator.
$L_r$ :	Inductance cyclique propre du rotor.
$R_s$ :	Résistance statorique.
$R_r$ :	Résistance rotorique.
$P$ :	Nombre de paires de pôles.
$J$ :	Moment d'inertie.
$F$ :	Coefficient de friction.
$\Omega_s$ :	Fréquence de glissement angulaire.
$\Omega_r$ :	Vitesse angulaire du rotor.
$v_{dq}$ :	Composante des axes d et q de la tension de stator.
$\Phi_{dq}$ :	Valeurs instantanées des composantes du flux rotorique (d, q).
$I_{dq}$ :	Valeurs instantanées des composantes du courant statorique (d, q)
$\delta$ :	Coefficient de fuite.
$v_b$ :	Vitesse de flux d'eau de dérivation.
$v_r$ :	Vitesse de flux d'eau de rétentat.
$v_f$ :	Vitesse de flux d'eau d'alimentation.
$v_p$ :	Vitesse de flux d'eau de perméat.
$e_{vb}$ :	Résistance de la valve de dérivation.
$e_{vr}$ :	Résistance de la valve de rétentat.
$\Delta\pi$ :	Pression osmotique.
$P_{sys}$ :	Pression de système.
$A_p$ :	La section transversale du tuyau.
$A_m$ :	La surface de la membrane.
$K_m$ :	Le coefficient de transfert de masse global de la membrane
$\rho$ :	La densité du fluide.

$C_{\text{feed}}$ :	La quantité totale de solides dissous.
$\alpha$ :	Le coefficient de pondération de la concentration efficace.
$R$ :	Le rejet de sel fractionné de la membrane.
$T$ :	La température du processus.

## 2. Abréviations

RO :	Osmose inverse
$S_{\text{VFD}}$ :	Vitesse d'entraînement à fréquence variable.
MI :	Moteur à induction.
MLI :	Modulation de la largeur d'impulsion.
PI :	Régulateur Proportionnel et Intégral.

- [1] L. F. Greenlee, D. F. Lawler, B. D. Freeman, B. Marrot, et P. Moulin, « Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges », *Water Research*, vol. 43, no 9, p. 2317-2348, mai 2009.
- [2] M. Zebbar, Y. Messlem, A. Gouichiche, et M. Tadjine, « Super-twisting sliding mode control and robust loop shaping design of RO desalination process powered by PV generator », *Desalination*, vol. 458, p. 122-135, mai 2019.
- [3] Mehdi METAICHE. Optimisation Des Systèmes De Dessalement Par Osmose Inverse : Conception, Paramètres De Fonctionnement Et Simulation Numérique. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique. (2006).
- [4] Viviane RENAUDIN, "Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres", rapport de l'Université Henri Poincaré.
- [5] A. Al-Ansari, H. Ettouney, et H. El-Dessouky, « Water-zeolite adsorption heat pump combined with single effect evaporation desalination process », *Renewable Energy*, vol. 24, no 1, p. 91-111, sept. 2001.
- [6] M. Methnani, « Influence of fuel costs on seawater desalination options », *Desalination*, vol. 205, no 1, p. 332-339, févr. 2007.
- [7] M. A. Eltawil, Z. Zhengming, et L. Yuan, « A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no 9, p. 2245-2262, déc. 2009.
- [8] A. Kaya, M. E. Tok, et M. Koc, « A Levelized Cost Analysis for Solar-Energy-Powered Sea Water Desalination in The Emirate of Abu Dhabi », *Sustainability*, vol. 11, no 6, p. 1691, janv. 2019.
- [9] K. Billal. Modélisation et commande d'un système solaire thermique-dessalement eau de mer : Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, juin 2013.
- [10] M.A. Eltawil, Z. Zhengming, L. Yuan, A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13 (9) (2009) 2245–2262 Dec.
- [11] Murray Thomson. A ; " Reverse-Osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics Without Batteries" These de Doctorat Loughborough University. 2003.
- [12] M. A. Alghoul et al., "Design and experimental performance of brackish water reverse osmosis desalination unit powered by 2 kW photovoltaic system," *Renew. Energy*, vol. 93, no. Supplement C, pp. 101–114, Aug. 2016.
- [13] Mohamed Arrouf, "Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque ", Thèse de Doctorat de l'Université Mentouri Constantine 2007.
- [14] M. Ouada, M. S. Meridjet, M. S. Saoud, And N. Derradji, "Study of new configuration photovoltaic pumping system," in 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), 2014, pp. 1–5
- [15]: « Speed control of induction motor-pump supplied by Photovoltaic generator - IEEE Conference Publication ». [En ligne]. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6750897>. [Consulté le: 03-juill-2019].
- [16] P.G. Kini, R.C. Bansal, R.S. Aithal, Performance analysis of centrifugal pumps subjected to voltage variation and unbalance, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 55 (2) (2008) 562–569 Feb.
- [17] H. Bouzeria, C. Fetha, T. Bahi, and L. Rachedi, "Speed control of induction motor pump supplied by photovoltaic generator," in 3rd International Conference on Systems and Control, 2013, pp. 445–450..

- [18] J.P Louis, "Models pour la commande des actionneurs électriques ",Edition Lavoisier 2004.
- [19] G. Abdelmadjid, « Diagnostic et commande d'une machine asynchrone à base d'observateur. Étude expérimentale », Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2010.
- [20] E. Simonguy, E. Korsaga, J. M'boliguipa, T. T. Guingané, et Z. Koalaga, « Performance Determination of Photovoltaic AC Water-Pumping System Using a Boost Converter Controlled by PI Regulator », vol. 14, no 10, p. 6, 2019.
- [21] A.R. Bartman, A. Zhu, P.D. Christofides, Y. Cohen, Minimizing energy consumption in reverse osmosis membrane desalination using optimization-based control, *J.Process Control* 20 (10) (2010) 1261–1269 Dec.
- [22] L. Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », Université Henri Poincaré - Nancy I, 1999.
- [23] A. Gouichiche, S. Boucherit, M. Tadjine, A. Safa, Y. Messlem, An improved stator winding fault tolerance architecture for vector control of induction motor: theory and experiment, *Electr. Power Syst. Res.* 104 (Nov. 2013) 129–137.
- [24] L. BAGHLI. Modélisation et commande de la machine asynchrone. Notes de cours. IUFM de Lorraine. 2005.
- [25] S. BACHIR, S. Tnani. Induction motor modelling of broken rotor bars and fault detection by parameter estimation. *IEEE International SDEMPED'01*, Grado, Italie, pp. 145-149, September 2001..
- [26] T. Poompavai et M. Kowsalya, « Control and energy management strategies applied for solar photovoltaic and wind energy fed water pumping system: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, p. 108-122, juin 2019.
- [27] A.R. Bartman, P.D. Christofides, Y. Cohen, Nonlinear model-based control of an experimental reverse-osmosis water desalination system, *Ind. Eng. Chem. Res.* 48 (13) (2009) 6126–6136 Jul.
- [28] « Introduction to Feedback Control Theory | Taylor & Francis Group ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780203750117>. [Consulté le: 02-juill-2019].
- [29] Commande des systèmes, performance et robustesse, régulateurs monovariables et multivariables,application. Henri BOURLES.
- [30] L.Fridman, Y. Shtessel, C. Edwards and Xing-Gang Yan, "High-order sliding-mode observer for state estimation and input reconstruction in nonlinear systems", *international Journal of robust and nonlinear control* 18(4-5): pp 399-413, 2008.
- [31] A Hamzaoui, N Essounbouli and J Zaytoon, "Fuzzy Sliding Mode Control for Uncertain SISO Systems", *Processing of IFAC Conf. on Intelligent Control Systems and Signal ICONS'03*, pages 233–238, 2003.
- [32] C. Lascu and F. Blaabjerg, "Super-twisting sliding mode direct torque control of induction machine drives," in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014, pp. 5116–5122.
- [33] M. Derbeli, M. Farhat, O. Barambones, L. Sbita, Control of PEM fuel cell power system using sliding mode and super-twisting algorithms, *Int. J. Hydrog. Energy* 42 (13) (2017) 8833–8844 Mar.

- [34] B. D. H. Phuc, S.-S. You, T.-W. Lim, and H.-S. Kim, “Dynamical analysis and control synthesis of RO desalination process against water hammering,” *Desalination*, vol.402, no. Supplement C, pp. 133–142, Jan. 2017.
- [35] A.R. Bartman, C.W. McFall, P.D. Christofides, Y. Cohen, Model-predictive control of feed flow reversal in a reverse osmosis desalination process, *J. Process Control* 19 (3) (2009) 433–442 Mar.

### ملخص:

. تحلية مياه البحر بالتناضح العكسي هي أكثر التقنيات المستخدمة على نطاق واسع لإمدادات المياه العذبة لأنها تقدم العديد من الفوائد. يعد تطوير استراتيجيات تحكم دقيقة هي واحدة من أصعب المهام في محطات تحلية مياه البحر بالتناضح العكسي، لا سيما في ظل ظروف عدم اليقين والاضطراب من أجل تجنب فشل النظام المحتمل والأضرار التي لحقت التشغيل الآمن. تقدم هذه الرسالة بنية شاملة لعملية تحلية مياه البحر بالتناضح العكسي التي تغذيها تغذية مباشرة. تم تطوير النمذجة الديناميكية للمكونات المختلفة لهذا الهيكل. تتم معالجة استراتيجيات التحكم للنظام بأكمله مع وحدة تحكم لكل جزء بالإضافة إلى ذلك، يتم إيلاء اهتمام خاص للتصميم القوي لعشاء التناضح العكسي لمراعاة التغييرات الهامة في النقاط المحددة والقدرة على رفض الاضطرابات الخارجية والتعامل مع حالات عدم اليقين البارامترية مثل الاختلافات في ملوحة تغذية المياه. يتم تقسيم كتلة التحكم إلى حلقتين الأولى باستخدام وحدة التحكم  $PI$  والثانية استخدمنا أوامر مختلفة أولاً تم تطبيق الأوامر الخطية مثل التحكم في ردود الفعل الغير المتكاملة و الغير الخطية متنوعة بالأوامر الغير الخطية مثل التحكم الغير الخطي المستند الى  $Lyapunov$  أخيراً يتم تطبيق التحكم في وضع الانزلاق على نظام تحلية المياه. تظهر نتائج المحاكاة للحالات المختلفة فعالية النظام المقترح.

**الكلمات المفتاحية:** تحلية المياه، التناضح العكسي، مضخة طرد مركزي، النفاذية، التركيز الملحي.

### Résumé :

La technique de dessalement par osmose inverse (RO) est la technologie la plus utilisée pour l'approvisionnement en eau douce car elle offre des nombreux avantages. L'élaboration d'une stratégie de contrôle précise est l'une des tâches les plus difficiles dans les usines de dessalement par osmose inverse, surtout dans des conditions d'incertitude et de perturbations afin d'éviter toute défaillance possible du système et les dommages pour un fonctionnement en toute sécurité.

Ce mémoire présente une architecture globale du procédé de dessalement par osmose inverse alimenté avec une alimentation directe. Une modélisation dynamique des différentes composantes de cette architecture est développée. Une stratégie de contrôle de l'ensemble du système est adressée avec un contrôleur pour chaque partie.

En outre, une attention particulière est accordée ici à la conception robuste de la membrane d'osmose inverse (RO) pour tenir compte des modifications importantes des points de consigne et de la capacité de rejeter les perturbations externes et de faire face aux incertitudes paramétriques comme variations de la salinité de l'eau d'alimentation. Le bloc de commande est divisé en deux boucles, la première utilisant un régulateur PI et pour la deuxième boucle on a utilisé des différentes commandes. Tout d'abord on a appliqué des commandes linéaires telle que la commande par retour d'état sans et avec action intégrale, ensuite des commandes non linéaires comme la commande non linéaire basée sur une fonction de Lyapunov. Enfin la commande par mode glissant est appliquée sur le système de dessalement d'eau.

Les résultats des simulations portant sur différents cas montrent l'efficacité du système proposé.

**Mots clés :** Dessalement, osmose inverse (RO), pompe centrifuge, perméat, rétentat.

### Abstract

Reverse osmosis (RO) desalination is the most widely used technology for fresh water supply because it offers many advantages. Developing an accurate control strategy is one of the most difficult tasks in reverse osmosis desalination plants, especially under conditions of uncertainty and disruption to avoid possible system failure and damage for safe operation.

This thesis presents a global architecture of the reverse osmosis desalination process powered by a direct power supply. A dynamic modeling of the different components of this architecture is developed. A control strategy for the entire system is addressed with one controller for each part.

In addition, particular attention is paid here to the robust design of the reverse osmosis (RO) membrane to take into account significant changes in setpoints and the ability to reject external disturbances and cope with parametric uncertainties such as variations in feed water salinity. The control block is divided into two loops, the first using a PI controller and the second using different controls. First, linear controls such as the state feedback control without and with integral action were applied, followed by non-linear controls such as the non-linear control based on a Lyapunov function. Finally, the sliding mode control is applied to the water desalination system.

The results of simulations on different cases show the effectiveness of the proposed system

**Keywords:** Desalination, reverse osmosis(RO), centrifugal pump, permeate, retentate.