

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département d'automatique



Projet de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Automatique

Thème :

Commande d'un Système de Dessalement d'Eau de Mer par Osмосes Inverse

Proposé et dirigé par :

Pr. M.TADJINE.

Etudié par :

BOUGUERROUCHE Moussa

HAMICHE Koussaila

*Laboratoire de Commande des Processus
Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie*

REMERCIEMENT

Nous remercions d'abord **ALLAH** qui nous a guidé, et nous a donné le courage, la volonté et la patience pour tenir à terme ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre promoteur, monsieur le professeur **M.TAJINE**, pour sa disponibilité et sa contribution avec ses précieuses orientations et ses pertinents conseils et remarques, qu'il trouve ici notre profonde reconnaissance pour son temps qu'il nous a consacré. Nos chaleureux remerciements vont aussi à monsieur **M.CHAKIR** pour son assistance, ses éclaircissements et son aide inestimable ainsi que ses encouragements durant toute la période du travail.

Nous tenons à remercier très chaleureusement :

- Monsieur **H.ABDELOUAL** pour avoir fait l'honneur de présider notre jury de soutenance.
- Monsieur **R.ILLOUL** pour l'honneur qu'il nous a fait d'avoir accepté d'en être examinateur et d'avoir consacré de son temps précieux à la lecture de ce mémoire.

Nos vifs remerciements sont adressées aussi à tous les enseignants du génie électrique et du département de l'automatique en particulier pour leurs engagements, leur générosités et leurs sérieux au travail afin qu'ils nous transmettent de leur précieux savoir tout au long de notre cursus à l'Ecole Nationale Polytechnique.

C'est avec une attention particulière que nous remercions chaleureusement nos deux familles pour leurs aides permanentes, et soutiens aussi bien financier qu'affectif. On leurs témoigne notre profondes reconnaissance et gratitude

Nous remercions profondément tous nos amis qui nous ont été d'un grand soutiens et appui dans les moments plus difficiles.

Que les nombreuses personnes qui par une participation quelconque ou avec une simple suggestion, nous ont aidés, qu'ils trouvent nos sincères reconnaissances.

Dédicaces

Je dédie ce travail à:

Ma Mère, ma Mère, ma Mère.

Mon Père.

Mes frères et sœurs et leurs familles.

La famille de mon frère LAKHDAR (Ath Yarhem Rebbi), sa femme, ses enfants ; MOHAND(Bouhouche), CHAHRA, KARIM.

A mes amis ; Khali sofiane, Akh Lyes, Titouche, Jugou, Youcef, Ouahmed, Mohand, et tous les autres.

Mon binôme Koussaila.

Et à Vous

Moussa

Je dédie ce travail à:

Mes très chers parents, mon frère Magssen et ma sœur Narimane, ainsi que toute la famille Hamiche et la famille Zahar.

Et à vous mes amis ; Ammar, Arezki, Halim, Jugo, Ouamed, Tahar, Le Titouche et tous les autres.

Koussaila

ملخص

يهدف هذا العمل الى المساهمة في تلبية حاجة صناعية الا و هي توفير المياه الصالحة للشرب لاستيعاب الطلب المتزايد على هذا العنصر الحيوي. حيث ينحصر العمل في التحكم في نظام تحلية مياه البحر بواسطة التناضح العكسي. قمنا أولاً بتقديم أهم الآليات المستخدمة في التحلية وركزنا على نظام التناضح الذي هو هدف دراستنا. ثم عمدنا إلى تطبيق عدة اليات تحكم على نظام خطي تم تحديده في مخبر في الكويت من اجل تعديل التدفق وناقلية الماء المنتجة. وفي الجزء الثالث والأخير قمنا بتطبيق الية تحكم أكثر نجاعة من أجل التحكم في التدفق الماء الصالح للشرب لوحده, كذلك قمنا بتعديل سرعة محرك مضخة الضغط العالي.

الكلمات المفتاحية : التناضح العكسي, التحلية

Résumé :

Ce manuscrit apporte une contribution à un besoin industriel spécifique ; celui de produire de l'eau potable afin de subvenir à la demande croissante de cet élément vital. Le travail consistait donc à la commande d'un système de dessalement d'eau mer par osmose inverse. Nous avons décrit en premiers lieu les techniques de dessalements existantes et on s'est concentré sur l'osmose inverse qu'on a simulé son modèle en boucle ouverte. Nous avons appliqués par la suite différentes commandes sur la première structure présentée par un système linéaire identifié à un laboratoire à Al Kuwait dont nous avons régulé le flux et la conductivité de l'eau produite. Et dans la dernière partie nous avons utilisés une structure non linéaire de l'osmose inverse, nous lui avons appliqué une commande robuste H_{∞} afin de réguler le flux tout seul de l'eau produite, et une régulation de la machine entrainant la pompe à haute pression a été effectuée.

Mot clés : Osmose inverse, Dessalement, RO, Membrane, H_{∞} .

Abstract :

This manuscript brings a contribution for a specific industrial need; which is the production of fresh water in order to provide for the growing of demand of this vital element. The work focus on control of a sea water reverse osmosis desalination system. We initially explained the different techniques used to desalinate sea water and we focused on reverse osmosis witch we have simulated his model in an open loop. Then we applied various controllers on the first structure of RO presented by linear system identified in a laboratory at Al Kuwait of which we controlled the flow and the conductivity of produced water. And finally we used a nonlinear structure of reverse osmosis, we applied a robust controller H_{∞} in order to control only the flow of the fresh water, and a regulation of the machine actuating the high pressure pump of the system was done.

Key words : Reverse Osmosis, Desalination, RO, Membrane, H_{∞} .

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur les techniques de dessalement d'eau de mer	3
I.1.Définition	5
I.2.Procédés de dessalement	5
I.2.1.Procédés de distillation par vapeur	6
I.2.1.1.Evaporation à effet simple (Single effect evaporation).....	6
I.2.1.2.Distillation simple effet par compression de vapeur	7
I.2.1.3.Distillation à multiples effets	9
I.2.1.3.1.Distillation à multiples effets	9
I.2.1.4. Distillation par détente successives ou procédé Flash.	11
I.2.2.Procédés membranaires	11
I.2.2.1. Distillation membranaire par contact direct (DMCD)	11
I.2.2.2. Distillation membranaire par balayage des gaz SGMD	12
I.2.2.3. Distillation à membrane sous vide VMD	13
I.2.2.4. Distillation à membrane air gap (AGMD)	13
I.2.2.5. L'osmose inverse	14
I.2.2.5.1. Historique.....	14
I.2.2.5.2.Description du processus et principe de fonctionnement	15
I.2.2.5.3.Type de membranes de l'osmose inverse.....	17
I.2.2.5.3.1.Membranes cellulosiques	17
I.2.2.5.3.2.Membranes aromatiques polyamides	17
I.2.2.5.3.3.Thin-film composites	17
I.3.Modèle mathématique	18
I.3.1.Réponse indicielle.....	19
Chapitre II : Commande du système de dessalement d'eau de mer osmose inverse	21
II.1.Application de différentes commandes sur le système osmose inverse	22
II.1.1.Commande par PID.....	22
II.1.1.Commande par retour d'état et action intégrale.....	24
II.1.1.Commande LQR	26
II.1.1.Commande à modèle de référence	28

II.2.Etude comparative	31
Chapitre III : Commande d'un système non linéaire d'osmose inverse	34
III.1.Problématique de commande.....	35
III.2.Commande de la machine asynchrone	36
III.2.1.Modèle de la machine asynchrone.....	36
III.2.1.1.Hypothèses simplificatrices	36
III.2.1.2.Equation électriques de la machine	37
III.2.1.3.Modèle de la machine asynchrone avec orientation du flux rotorique	37
III.2.2.Principe de la commande.....	38
III.2.2.1.Réglage de la vitesse.....	38
III.2.2.2.Réglage du flux.....	38
III.2.2.3.Structure générale de la commande	39
III.3.Commande du flux de l'eau produite	39
III.3.1.Modélisation du système	40
III.3.1.1.Hypothèses sur le système	40
III.3.1.2.Modèle mathématique	40
III.3.1.3.calcul du linéarisé	42
III.4.Choix des parités	42
III.5.Application d'une commande robuste	43
III.5.1.Etat de l'art	43
III.5.1.1.Commande par mode glissant (Sliding Mode control, SMC)	43
III.5.1.2.Commande LQG/LQR	45
III.5.1.3.Commande adaptative	45
III.5.1.3.1.Commande adaptative indirecte	46
III.5.1.3.1.Commande adaptative directe.....	46
III.5.2.Commande H_{∞}	47
III.5.2.1.Principe.....	47
III.5.2.2.Problème à sensibilité mixte.....	48
III.5.2.3.Choix des pondérations	48
III.5.2.4.Résolution des équations de RICCATI.....	49
III.6.Simulations et analyses	49

III.6.1. Résultats de simulation de la machine asynchrone.....	49
III.6.2. Résultats de simulation de la commande du flux	50
III.6.2.1. performances	50
III.6.2.2. Résultats de simulation par la commande H_{∞} et la commande PID	52
III.6.2.3. Evaluation de la Robustesse de la commande H_{∞}	53
III.6.2.3.1. Robustesse vis-à-vis des changements paramétriques	53
III.6.2.3.1.1. Robustesse vis-à-vis du changement de la pression osmotique	53
III.6.2.3.1.2. Robustesse vis-à-vis du changement du coefficient de transfert de masse de la membrane.....	54
III.6.2.3.2. Robustesse vis-à-vis des perturbations	55
Conclusion générale	56

Listes des figures

Chapitre I

figI.1. distribution de l'eau dans le monde	4
figI.2.Schéma général de la technique de dessalement de l'eau salée	5
figI.3.Description des procédés de dessalement	6
figI.4.Distillation par simple effetles plus connus et les plus importants	7
figI.5.Distillation simple effet par compression de vapeur	9
figI.6.Schéma de distillation à multiples effets à alimentation parallèle	10
figI.7.Distillation à effet multiple à alimentation parallèle avec compression de vapeur	10
figI.8.Distillateur par détente successives ou procédé flash MSF (multistage flash)	11
figI.9.Distillation par contact direct	12
figI.10.Distillation membranaire par balayage des gaz	12
figI.11.Distillation à membrane sous vide.....	13
figI.12.Air gap membrane distillation	14
figI.13. Phénomène de l'Osmose Inverse	16
fig.I.14. Schéma bloc illustrant l'interaction entre les variables commandées et les variables de commande.....	19
fig.I.15. Réponse indicielle.....	19

Chapitre II

figII.1.Réponse du flux et de la conductivité du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant un régulateur PI	23
figII.2.Réponse de la pression et du pH du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant un régulateur PI	23
figII.3.Schéma de la commande par retour d'état avec une action intégrale	25
figII.4.Réponse du flux et de la conductivité du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande RE avec action intégrale	25

figII.5. Variations de la pression et du pH à un changement du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande RE avec action intégrale.....	26
fig.II.6. Schéma de la commande LQR.....	27
figII.7. Réponse du flux et de la conductivité du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande LQR	27
figII.8. Variations de la pression et du pH à un changement du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande LQR.....	28
figII.9. Un système avec la structure RST.....	28
figII.10. Variations de la pression et du pH à un changement du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant le régulateur RST	31
figII.11. Réponse du flux et de la conductivité du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant le régulateur RST	31
figII.12. Réponse du flux et de la conductivité du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande LQR, RE avec action intégrale, le régulateur RST et le PI.....	32
figII.12. Variations de la pression et du pH à un changement du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande LQR, RE avec action intégrale, le régulateur RST et le PI	32

Chapitre III

figIII.1. Schéma pratique de l'unité de dessalement par l'osmose inverse	35
figIII.2. Schéma de commande de l'osmose inverse	35
fig.III.3. Schéma de commande de la vitesse	38
fig.III.4. Schéma de commande du flux.....	38
III.5. Structure de réglage de la vitesse de la MAS avec orientation directe du flux rotorique.....	39
figIII.6. Schéma de commande de l'osmose inverse	40
figIII.7. Principe de commande par mode de glissement	44
figIII.8. Schéma de commande de par LQG/LTR	45
figIII.9. Schéma de la commande adaptative indirecte.....	46
figIII.10. Schéma de la commande adaptative directe.....	46
figIII.11. Forme standard de la commande H_{∞}	47
figIII.12. mise sous forme standard.....	48
figIII.13. Résultats de simulation de la machine asynchrone avec un couple de charge de 20 N.m	50

figIII.14.la valeur singulière de la fonction de sensibilité S et $1/W1$ et la sensibilité complémentaire T et $1/W2$ pour le système G11	51
figIII.15.les valeurs singulières de la fonction de sensibilité S et $1/W1$ et de la sensibilité complémentaire T et $1/W2$ pour le système G22	51
figIII.16.variations de la commande $ev1$ et $ev2$	52
figIII.17.Réponse des deux vitesses $v2$ et $v3$	52
figIII.18.les commande $ev1$ et $ev2$ suite au changement de $\Delta\pi$	53
figIII.19.les réponse des deux vitesses $v2$ et $v3$ suite au changement du paramètre $\Delta\pi$	54
figIII.20.Commande $ev1$, $ev2$ et les vitesses $v2$ et $v3$ suite au changement du paramètre K_m	55
figIII.21.Réponse de $ev1$, $ev2$ et de $v2$, $v3$ en présence des perturbations	56

Notations et Abréviations

Chapitre II :

F :	Flux
C :	Conductivité
P :	Pression transmembranaire

Chapitre III :

Paramètres du système de dessalement :

ρ :	Densité du fluide.
V :	Molome interne.
W_p :	Puissance fournie par la pompe.
A_p :	Section du pipe.
e_{v1}, e_{v2} :	Constantes représentant l'ouverture la fermeture des vannes.
A_m :	Surface de la membrane.
K_m :	Coefficient de transfert de masse.
$\Delta\pi$:	Pression osmotique.
P :	Pression transmembranaire.

Paramètres de la MAS :

d, q :	Indices relatives au axes direct et en quadrature.
(P) :	Matrice de Park.
(V_s) :	Vecteur des tensions statoriques.
(V_r) :	Vecteur des tensions rotoriques.
(\dot{i}_{qs}) :	Composante du courant statorique selon l'axe q .
(\dot{i}_{ds}) :	Composante du courant statorique selon l'axe d .
Ψ_{dr} :	Composante d du flux rotorique dans le repère (d, q).
Ψ_{qr} :	Composante q du flux rotorique dans le repère (d, q).
Ψ [Wb] :	Flux
M_{sr} [H] :	Inductance mutuelle stator-rotor.
M_s [H] :	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
M_r [H] :	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique.
l [H] :	Inductance propre.
J [kg.m ²] :	Moment d'inertie de la masse tournante.
K_f [N.m.sec/rad] :	Coefficient de frottement visqueux.
P :	Nombre de pair de pôles.
L_s [H] :	Inductance cyclique propre du stator.
L_r [H] :	Inductance cyclique propre du rotor.
M [H] :	Inductance cyclique mutuelle stator-rotor.
T_s :	Constante du temps statorique.
T_r :	Constante du temps rotorique.

σ :	Coefficient du dispersion de Blondel
Ω_m :	Vitesse de rotation mécanique.
θ :	Angle rotorique.
ω_s :	Pulsation des grandeurs statoriques.
ω_r :	Pulsation des grandeurs rotoriques.
Γ_e :	Couple électromagnétique.
Γ_r :	Couple résistant.

Autres paramètres :

$\bar{\sigma}$:	Valeur singulière maximale.
S :	Fonction de sensibilité.
T :	Fonction de sensibilité complémentaire.
W_1, W_2 :	Fonctions de pondération.

Introduction générale

Pour un développement durable, l'humanité est confrontée à divers défis. Le scientifique américain RICHARD E. Smalley, prix nobel de chimie en 1996, a défini les dix plus grands problèmes auxquels la planète sera confrontée. Il les a classé comme suit [29]: Energie, eau, Nourriture, environnement, pauvreté, terrorisme et guerre, maladie, éducation, démocratie, population

L'électricité et l'eau sont deux éléments indispensables dans la vie, le problème étant que ces deux derniers deviennent de plus en plus difficiles à produire. En effet, la production des besoins énergétiques mondiaux se base principalement sur les énergies fossiles, qui restent les principales sources de production d'électricité, qui disparaîtra dans un futur proche, et les sources d'eau douce avec le réchauffement climatique se raréfient et pour certaines régions elles se sont épuisées. Il est donc impératif de trouver une alternative non conventionnelle à ces deux problèmes.

Le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre constituent une solution adéquate du problème de l'insuffisance des ressources naturelles en eau, surtout dans les pays à climat aride et semi-aride, vu l'importance des quantités d'eau salée disponible dans le globe (plus de 97% de la quantité total de l'eau). La technique de dessalement peut traiter les eaux de différentes origines : l'eau de mer (dont la concentration en sels varie entre 35.000 à 49.000 ppm), l'eau saumâtre et l'eau souterraine (où la concentration varie de 1.000 à 10.000 ppm), l'eau de drainage, l'eau usée, l'eau polluée par les métaux lourds, et l'eau polluée par les radioactifs.

Dans ce contexte de travail, nous avons traité le sujet « Commande d'un système de dessalement d'eau de mer par osmose inverse » afin de produire une eau douce permettant ainsi de contribuer à satisfaire un besoin capital.

Le travail présenté dans ce mémoire est subdivisé en trois chapitres ; dans le premier chapitre, nous avons présenté le problème du manque d'eau douce et que le 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, dessalement par distillation et par contact membranaire, on a explicité et détaillé un peu plus le processus de l'osmose inverse qui est l'objet de notre étude et qui présente des avantages économiques considérable par rapport aux autres techniques de commande, et enfin on a présenté son modèle mathématique.

Dans le deuxième 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 une meilleure performance. Pour se faire, on a utilisé un modèle identifié par Al Atiqi et al. Qui est largement utilisé dans la littérature. La commande ainsi appliquée nous permet de garder la valeur du flux dans la plage tolérée par le fabricant ce qui permet une plus grande durée de vie à la membrane ainsi que garder la conductivité constante quelque soit la valeur du flux dans cette plage pour que l'eau produite soit potable.

Et enfin dans le troisième chapitre, nous avons présenté une nouvelle structure d'osmose inverse qui permet de palier au problème du pH qui persiste et qui sort des limites de linéarités. Cette structure permet de traiter le pH et la conductivité séparément, telle que le pH est traité au prétraitement et la conductivité est réglée au post-traitement. Dans ce système la vitesse de la machine entraînant la pompe est gardée constante, et le flux est régulé grâce aux deux vannes de l'eau de mer et de l'eau saumâtre.

Chapitre I

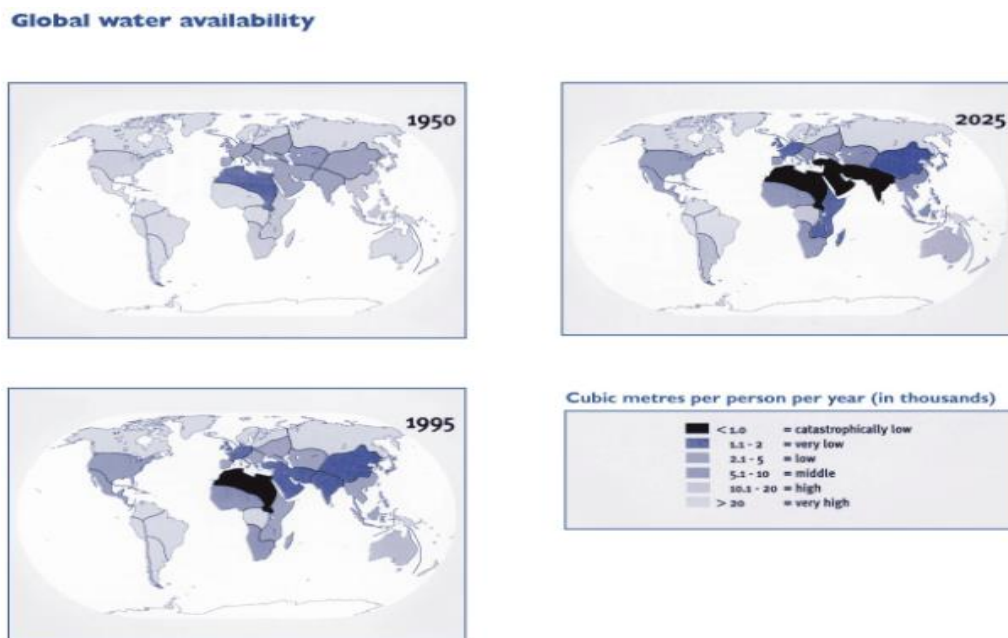
*GENERALITE SUR LES
TECHNIQUES DE DESSALEMENT
D'EAU DE MER*

Introduction :

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, et la fournir est devenu un véritable défi que se fixent les autorités. En effet, les besoins croissants en eau douce que ce soit pour la consommation quotidienne ou d'autres utilisations tel que l'agriculture, et l'inégalité de répartition de l'eau douce dans le monde comme le montre la figure figI.1 [1], (72% d'eau recouvre la terre et 3% de cette eau est douce) 60% d'eau douce est le cota de 10 pays différents, font du dessalement d'eau de mer un domaine important vu qu'elle représente une source pratiquement inépuisable. Ainsi les recherches faites dans ce sens sont diverses afin d'approvisionner la population avec un meilleur rapport qualité/prix.

Les techniques de dessalement 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. Cette dernière produit plus de 40% de la production mondiale en matière de dessalement [2]. Dans une étude faite en 2001, Wade a estimé les coûts de production d'eau pure avec une distillation par multistage flash (MSF), multi-effect desalination (MED) et par RO avec des boosters de saumure d'installations de dessalement d'eau de mer en 1.04, 0.95 et 0.75 (US \$/m³) respectivement [8].

Dans ce chapitre nous allons présenter les procédés de dessalements en général et l'Osмосe Inverse en particulier, et enfin nous présenterons son modèle mathématique et on le simulera en boucle ouverte.



FigI.1. distribution de l'eau dans le monde.

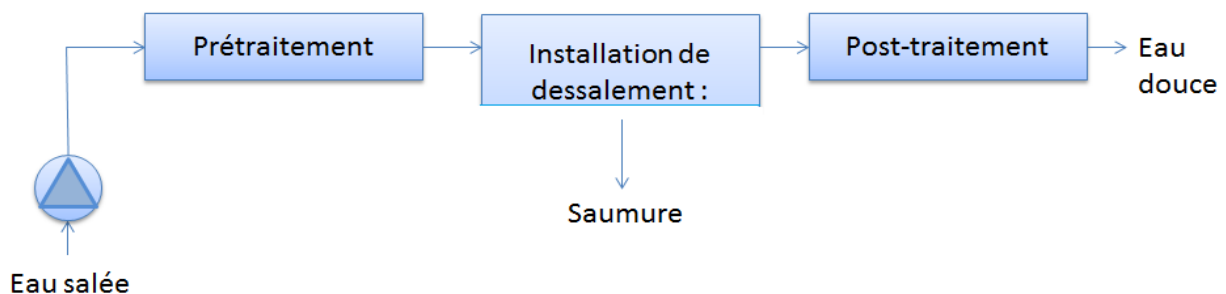
I.1. Définition :

Dans le travail qu'on présentera, certains mots vont se répéter dont nous devons fournir la définition qui est donnée dans [40] :

- Adsorption : Phénomène réversible de fixation et de concentration de substances particulaires, moléculaires ou ioniques d'un fluide sur la surface active d'un corps (par exemple une membrane).
- Perméabilité : Aptitude d'une membrane à se laisser traverser par un fluide.
- Sélectivité : Aptitude d'une membrane à séparer les constituants d'un mélange.
- Perméat : Phase traversant la membrane lors de la filtration, appelé aussi filtrat.
- Retentât : Phase retenue par la membrane lors de la filtration.
- Pression transmembranaire : Différence de pression de part et d'autre d'une membrane.
- Convection : Transfert de solutés à travers une membrane poreuse entraînés par le flux de solvant, créé par une différence de pression.
- Diffusion : Transfert de solutés à travers une membrane sous l'effet d'une force motrice telle qu'une différence de concentration, de potentiel chimique ou de potentiel électrique.
- 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)
- Densité de flux de perméation : Flux volumique ou massique traversant une membrane, pour 1 m^2 de surface membranaire.

I.2. Procédés de dessalement :

Il existe plusieurs techniques de dessalement d'eau de mer, mais toutes les installations se basent sur un même principe de fonctionnement. Voici un schéma le montrant :



figI.2. Schéma général de la technique de dessalement de l'eau salée

L'alimentation en eau de mer :

Elle peut s'effectuer soit par prise directe, soit par puits côtiers. Ce dernier système permet d'obtenir une eau non turbide, ce qui soulage les prétraitements.

Le prétraitement :

- 1) Chloration : Bloque de la prolifération des organismes vivants. Evite l’obstruction des conduites.
- 2) Filtration : Protège les pompes et assure le bon fonctionnement des pulvérisateurs.
- 3) Antitartre : La distillation favorise la précipitation du carbonate et du calcium qui se dépose sur la paroi des échangeurs et réduit le transfert de chaleur.

Installation de dessalement :

- 1) Procédés de distillation : L’eau de mer chauffée produit de la vapeur d’eau qu’il suffit de condenser pur obtenir de l’eau pure.
- 2) Procédés membranaires : L’eau et les sels dissous sont séparés au moyen de membranes sélectives.

Le post-traitement :

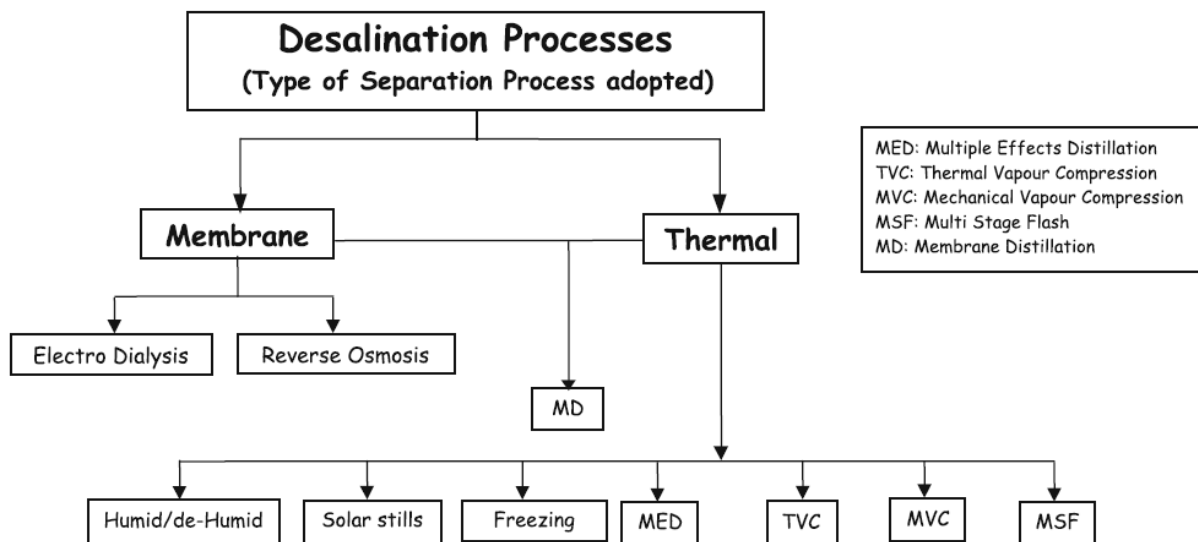
Permet de rendre l’eau potable en 2 étapes (en sortie de l’unité de dessalement, l’eau n’est pas potable car elle est déminéralisée).

- 1) Correction de la corrosivité : le traitement consiste à ajouter du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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.

Dans ce qui suit, on s’intéressera à la partie, installation de dessalement. Dans cette partie plusieurs technologies et techniques sont utilisées, elles sont divisées en deux grandes familles :

- Dessalement par distillation.
- Dessalement par contact membranaire.

Le schéma suivant illustre les différentes techniques [3]:



figI.3.Description des procédés de dessalement les plus connus et les plus importants

I.2.1.Procédés de distillation par vapeur:

I.2.1.1.Evaporation à Effet Simple (Single Effect Evaporation) :

L’eau de mer avec laquelle on alimente l’installation ($M_{cw}+M_f$) avec une température (T_{cw}) et une concentration en sel (X_f) est introduite dans un tube du condenseur

(préchauffage) où sa température augmente vers (T_f). L'eau de refroidissement (cooling water) (M_{cw}) est jetée à la mer. La fonction de l'eau de refroidissement (cooling water) dans le condenseur est d'absorber l'excès de chaleur ajouté au système dans l'évaporateur par la vapeur chauffée. Ceci implique que l'évaporateur ne consomme pas toute la chaleur fournie, à la place, il dégrade sa qualité. Le réchauffement de l'eau d'alimentation (M_f) dans les tubes du condenseur de (T_{cw}) à (T_f) est essentiel à l'amélioration des performances thermiques du processus. La chaleur nécessaire pour chauffer l'eau de mer au sein des tubes du condenseur est obtenue de la vapeur condensée formé par l'ébullition dans l'évaporateur (M_d) [4].

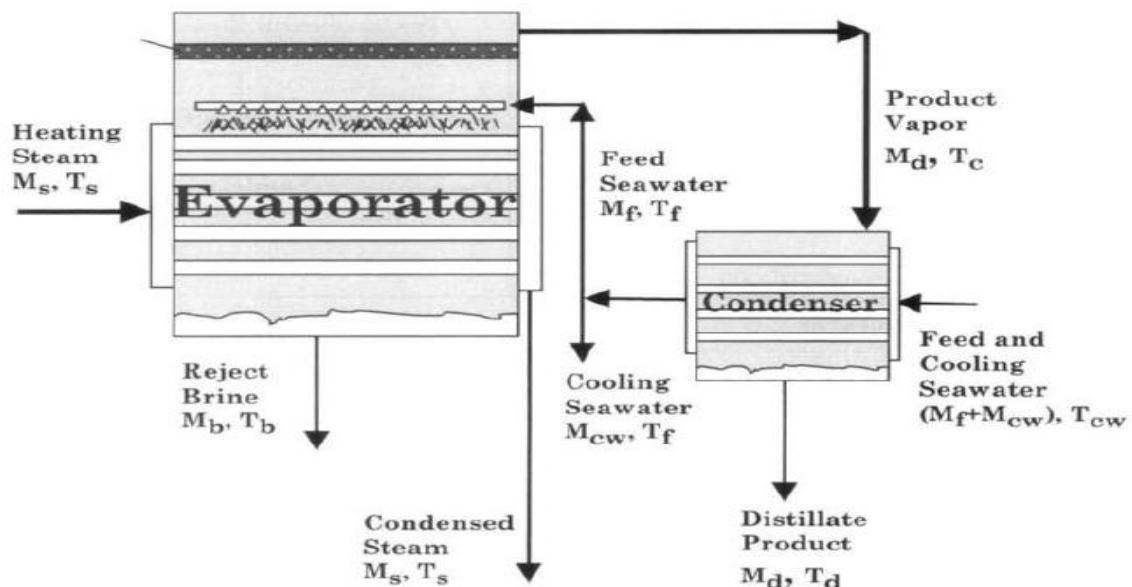
La température de condensation de la vapeur et conséquemment la pression dans l'espace de vapeur pour l'évaporateur et le condenseur est contrôlée par :

- le flux de l'eau du refroidissement (cooling water) (M_{cw}).
- La température de l'eau d'alimentation (T_{cw}).
- La surface valable du transfert de chaleur dans le condenseur (A_c).
- Le coefficient global de transfert de chaleur entre la vapeur condensée et l'eau de mer qui circule (U_c).

Par conséquent, le condenseur a trois fonctions :

- Enlever l'excès de chaleur du système.
- Améliorer les performances du processus.
- Ajuster la température d'ébullition dans l'évaporateur.

Le schéma suivant montre le principe de fonctionnement [4] :



figI.4. Distillation par simple effet

I.2.1.2. Distillation Simple Effet par Compression de Vapeur :

L'eau de mer avec laquelle on alimente l'installation ($M_{cw}+M_f$) avec une température (T_{cw}) et une concentration en sel (X_f) est introduite dans un tube du condenseur (préchauffage) où sa température augmente vers (T_f). L'eau de refroidissement (M_{cw}) est rejetée à la mer. La circulation de l'eau de refroidissement sous forme de vapeur mobile est nécessaire pour faire marcher le jet ejector [4].

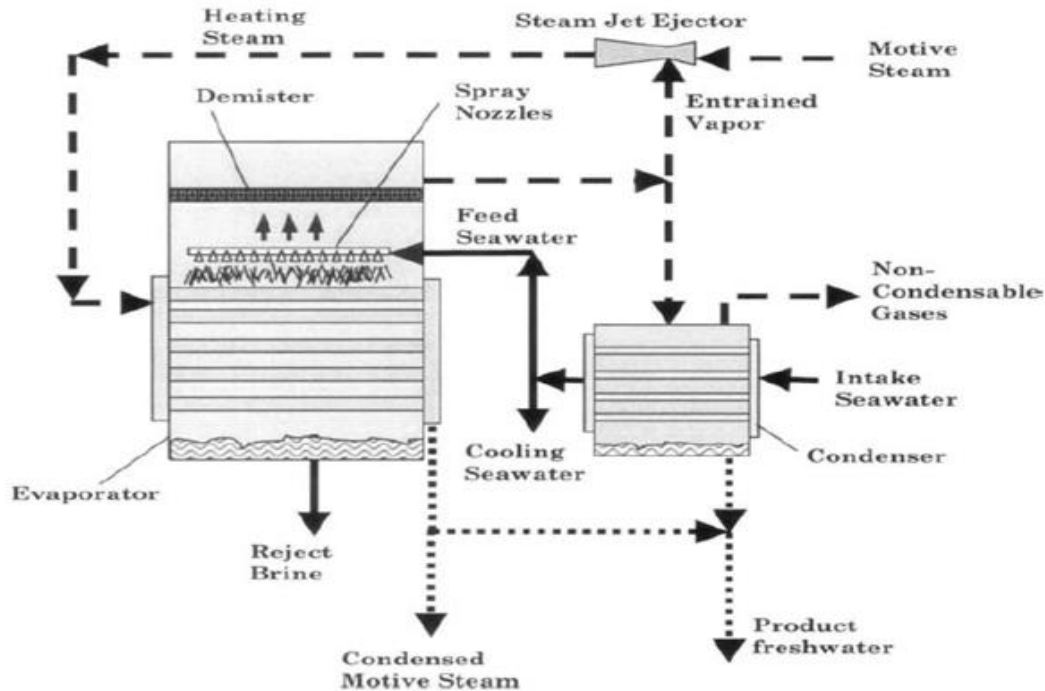
La chaleur nécessaire pour chauffer l'eau de mer au sein des tubes du condenseur est obtenue en condensant une portion commandée de vapeur formée par l'ébullition dans l'évaporateur (M_c). La température de condensation de la vapeur et conséquemment la pression dans l'espace de vapeur pour l'évaporateur et le condenseur est contrôlée par :

- le flux du cooling water (M_{cw}).
- La température de l'eau d'alimentation (T_{cw}).
- La surface de transfert de chaleur dans le condenseur (A_c).
- Le coefficient global de transfert de chaleur entre la vapeur condensée et l'eau de mer qui circule (U_c).

Par conséquent, le condenseur a trois fonctions :

- Enlever l'excès de chaleur du système.
- Améliorer les performances du processus.
- Ajuster la température d'ébullition dans l'évaporateur.

Avant de pomper l'eau dans l'évaporateur, elle est traitée chimiquement pour éviter la mousse et la formation de tartre car ces deux facteurs peuvent sérieusement nuire au système. Et puis dans l'évaporateur, l'eau d'alimentation à (T_f) est pulvérisée au sommet où elle tombe sur les tubes qui sont disposés horizontalement. La température de l'eau d'alimentation augmente à (T_b). La valeur de (T_b) est imposée par la nature des composants chimiques utilisés pour contrôler la formation de tartre et l'état de la vapeur en ébullition. Cette température est maîtrisée en fixant la pression dans l'espace de vapeur de l'évaporateur. La vapeur formée par ébullition avec (M_d) n'a plus de sel. La température de la vapeur générée (T_v) est moins élevée par rapport à celle de l'ébullition (T_b). La vapeur ainsi générée dedans circule dans le circuit du séparateur connu sous le nom de treillis d'antibuée (wire mesh demister) qui enlève les gouttelettes d'eau porteuse de sel. L'eau doit être complètement dépourvue de gouttelettes porteuses de sel pour éviter la contamination de l'eau produite et les surfaces de transfert de chaleur dans lequel elle se condense [4]. Le schéma suivant montre le principe de fonctionnement de la distillation simple effet par compression de vapeur :



figI.5. Distillation simple effet par compression de vapeur

I.2.1.3. Distillation à Multiples Effets :

Le système d'évaporation à effet multiple est formé par un ordre des vaporisateurs à effet simple, 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.

Le processus d'évaporation à effet multiple peut être configuré en alimentation avant, arrière, ou parallèle. Les trois configurations diffèrent dans les sens d'écoulement de la vapeur chauffante et de la saumure d'évaporation, la plus utilisée reste celle en parallèle [4].

I.2.1.3.1. Distillation à multiples effets à alimentation parallèle :

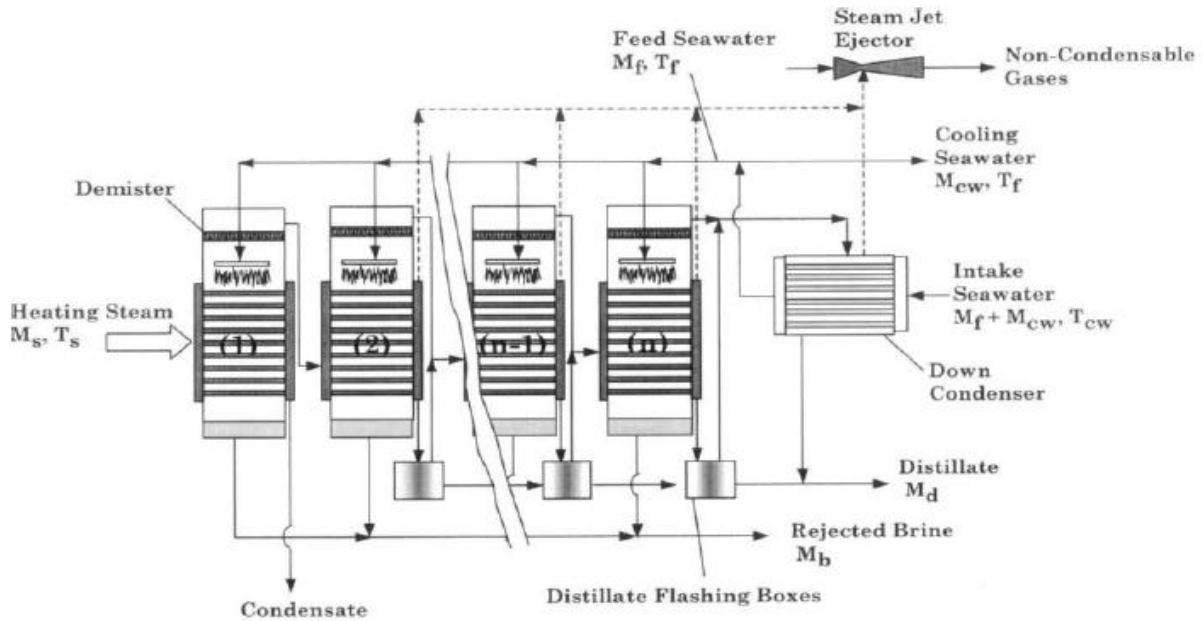
Le processus de distillation à multiples effets à alimentation parallèle est constitué autour de plusieurs cellules (effets) simples consécutives dans lesquelles on diminue la pression (et la température) du premier (chaud) au dernier (froid) [13].

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 [4]. 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

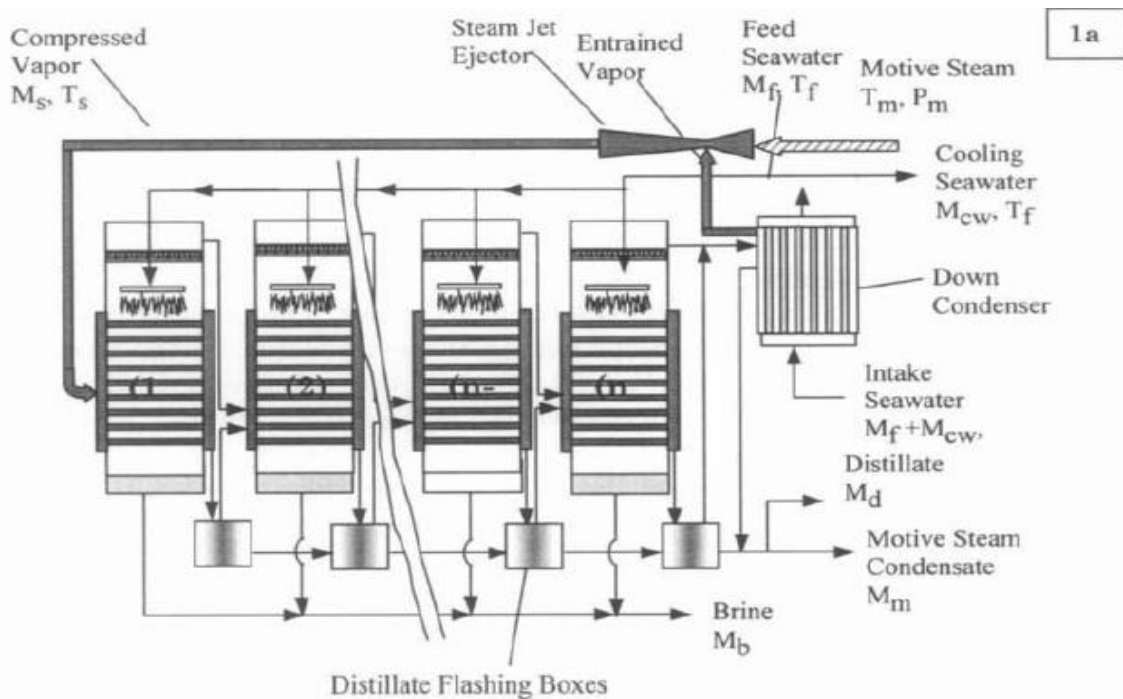
condensat de qualité, du premier effet, est retourné de nouveau à la chaudière [4]. La vapeur créée par l'évaporation de l'eau de mer est utilisée comme moyen de chauffage pour l'effet suivant où le processus se répète.

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.



figI.6.Schéma de distillation à multiples effets à alimentation parallèle.

Une amélioration significative de l'efficacité du système est apportée par la compression de vapeur [13], comme il est montré dans le schéma ci-dessous.



figI.7.Distillation à effet multiple à alimentation parallèle avec compression de vapeur.

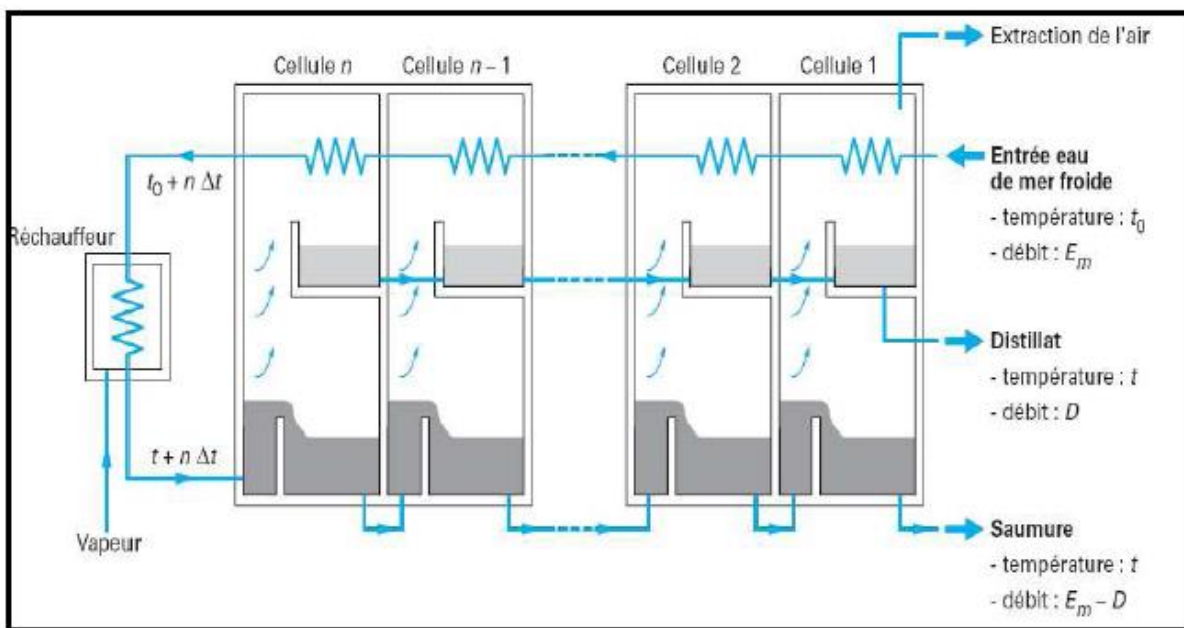
I.2.1.4. Distillation par Détentes Successives ou Procédé Flash (MSF) :

Cette technologie est apparue en 1960 pour faire face aux problèmes d'entartrage que connaissent les procédés de distillation à multiples effets [13].

Comme le montre la figure figI.7, l'eau de mer d'alimentation est introduite dans les tubes de l'appareil de chauffage de la saumure où la vapeur chauffante se condense dans les surfaces externes des tubes du condenseur. L'eau de mer absorbe la chaleur latente de la vapeur condensée, et sa température augmente à sa valeur maximale T_0 [4].

L'eau salée introduite à T_0 serpente à travers les différentes chambres en condensant de la vapeur au passage. Elle passe ensuite dans un réchauffeur où elle atteint T_{max} puis elle est introduite dans le bas des chambres où elle se vaporise puis se condense sur le serpentin. Cette vapeur condensée de l'eau fraîche à l'extérieur des tubes du condenseur s'accumule et forme le distillat.

Dans chaque chambre, la vapeur qui résulte du flashing se condense sur la surface extérieure des tubes de condenseur, où l'eau de mer d'alimentation coule à l'intérieur des tubes du côté froid au côté chaud du système. Ce rétablissement de chaleur améliore l'efficacité du processus en raison de l'augmentation de la température d'eau de mer d'alimentation [4].

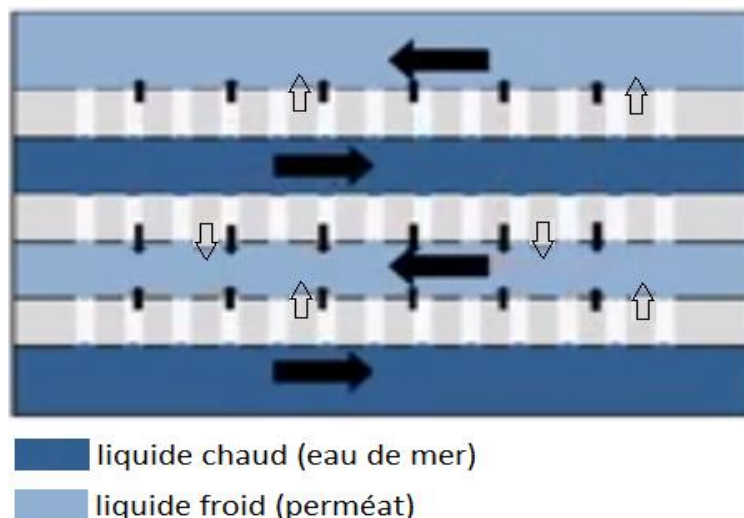


figI.8. Distillateur par détente successive ou procédé flash MSF (multistage flash)

I.2.2. Procédés membranaires :

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

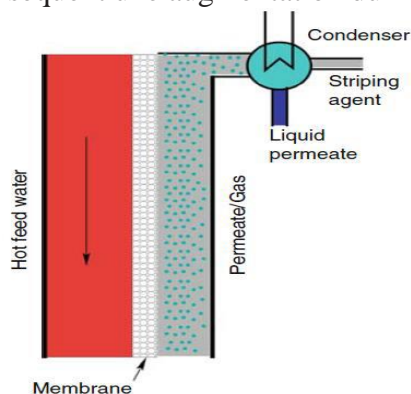
Le DMCD est l'un des processus les plus anciens et les plus utilisés, il est en contact avec du liquide des deux côtés de la membrane. Le liquide chaud qui est l'eau de mer circule dans l'évaporateur tandis que le liquide froid qui le perméat est diffusé. Le transfert de chaleur et de masse se fait du côté chaud vers le côté froid. La diffusion de vapeur est limitée par l'épaisseur de la membrane, elle réduit la résistance du transfert de masse et de chaleur [5].



figI.9. Distillation par contact direct.

I.2.2.2. Distillation Membranaire par Balayage des Gaz SGMD (Sweeping Gas Membrane Distillation):

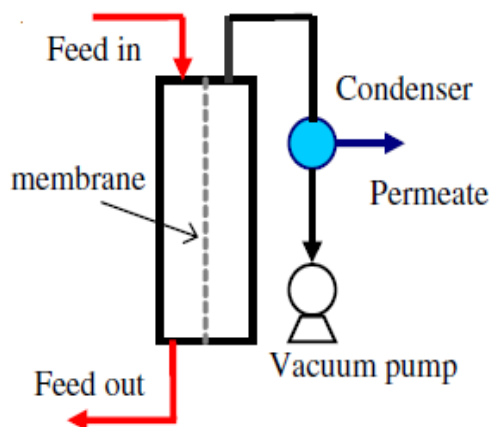
Dans la distillation membranaire par balayage de gaz (SGMD), la membrane hydrophobe microporeuse sépare une solution aqueuse d'une phase gazeuse, agissant en tant qu'agent d'extraction. La vapeur formée par évaporation à l'interface liquide / vapeur, diffuse à travers un film le gaz stagnant dans les pores de la membrane vers le gaz de balayage. Le côté gauche (canal d'évaporation) est rempli d'une solution aqueuse chaude (l'eau de mer chaude) (figI.10). Le côté droit (canal de perméat) contient le perméat vaporisé, ainsi qu'un agent de démoulage (air sec). En SGMD, l'agent d'extraction dans le canal de perméat s'écoule de façon continue et transporte la vapeur dans un condenseur, qui est situé à l'extérieur du module. Les dimensions du condenseur externe doivent être relativement importantes en raison de la haute fraction gazeuse, et un débit relativement élevé. Un flux de faible volume se traduirait par une augmentation de la température des gaz et des vapeurs de fraction dans le gaz de balayage, et donc à une diminution de la température effective à travers la membrane (la force motrice pour le transfert de masse). L'agent de décapage peut également être refroidi par l'intermédiaire d'un canal supplémentaire situé à côté du canal du perméat (analogue à AGMD). L'avantage de SGMD, par rapport à AGMD, est une diminution de la résistance de la masse à transporter en raison de la turbulence obtenue par la phase gazeuse en circulation et par conséquent une augmentation du flux spécifique de vapeur [7].



figI.10. Distillation membranaire par balayage des gaz

I.2.2.3. Distillation à Membrane sous vide VMD (Vacuum Membrane Distillation):

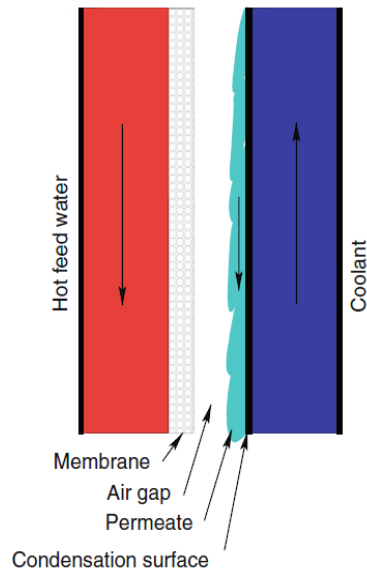
Dans cette technique, on applique un vide qui permet de maintenir la pression du côté du perméat, ainsi la membrane joue le rôle d'un extracteur. La vapeur formée par évaporation à l'interface liquide / vapeur, diffuse à travers un film le gaz stagnant dans les pores de la membrane vers le gaz de balayage. Le côté gauche (canal d'évaporation) est rempli d'une solution aqueuse chaude (l'eau de mer chaude) (figI.11). Le côté droit (canal de perméat) contient le perméat vaporisé, ainsi qu'un agent de démoulage (air sec) [7]. En SGMD, l'agent d'extraction dans le canal de perméat s'écoule de façon continue et transporte la vapeur dans un condenseur, qui est situé à l'extérieur du module. Les dimensions du condenseur externe doivent être relativement importantes en raison de la haute fraction gazeuse, et un débit relativement élevé. Un flux de faible volume se traduirait par une augmentation de la température des gaz et des vapeurs de fraction dans le gaz de balayage, et donc à une diminution de la température effective à travers la membrane (la force motrice pour le transfert de masse). L'agent de décapage peut également être refroidi par l'intermédiaire d'un canal supplémentaire situé à côté du canal du perméat [7].



figI.11. Distillation à membrane sous vide.

I.2.2.4. Distillation à Membrane Air Gap (AGMD) :

Les modules de distillation à membrane air Gap (AGMD) sont composés de trois canaux séparés: le canal d'évaporation (eau de mer chaude), le canal condenseur (courant de refroidissement) et l'intervalle d'air (ou canal de perméat). La condensation du distillat prend place sur une surface froide séparée de la membrane par un espace supplémentaire où circule un gaz inerte, typiquement de l'air (figI.12). Cet entrefer, entre la membrane et la surface de condensation, permet de réduire sensiblement la perte de chaleur à travers la membrane. L'avantage de l'AGMD, par rapport à DCMD, est une plus faible consommation d'énergie spécifique, mais l'inconvénient est la réduction des flux spécifique [7].



figI.12.Air gap membrane distillation

I.2.2.5.L'osmose inverse :

I.2.2.5.1. Historique :

Les procédés membranaires ont toujours existé, on citera :

La peau de tous les mammifères est considérée comme une membrane très efficace et très sélective qui permet de contrôler la libération de sueur pour se rafraîchir sous forme de gouttelettes en temps chaud. La sélectivité de la peau apparait, car quand on regarde sous la peau on trouve du sang qui circule dans les veines et si par malheur on se blesse, elle dégage du sang. Une peau saine et intacte ne fait pas sortir du sang lorsque on sue [4].

- 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 dedans lors de l'inspiration et cela sans tenir compte de sa présence en grande quantité [4].
- Les membranes du rein régulent l'eau, les sels ions, les protéines et d'autres nutriments dans le corps. Les reins sont extrêmement et tellement efficaces qu'un corps sain peut survivre avec un quart des deux reins [4].
- 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 [4].

L'homme a essayé de copier le fonctionnement de ces membranes, et ainsi fabriqua des membranes artificielles pour différentes fonction, qui elles aussi se basent sur la séparation de particules de différentes taille. Parmi les principales études faites à ce propos on citera [4] :

- En 1823, 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 du hemicellulose de l'industrie viscosose-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 [4]:

- 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 [4]:

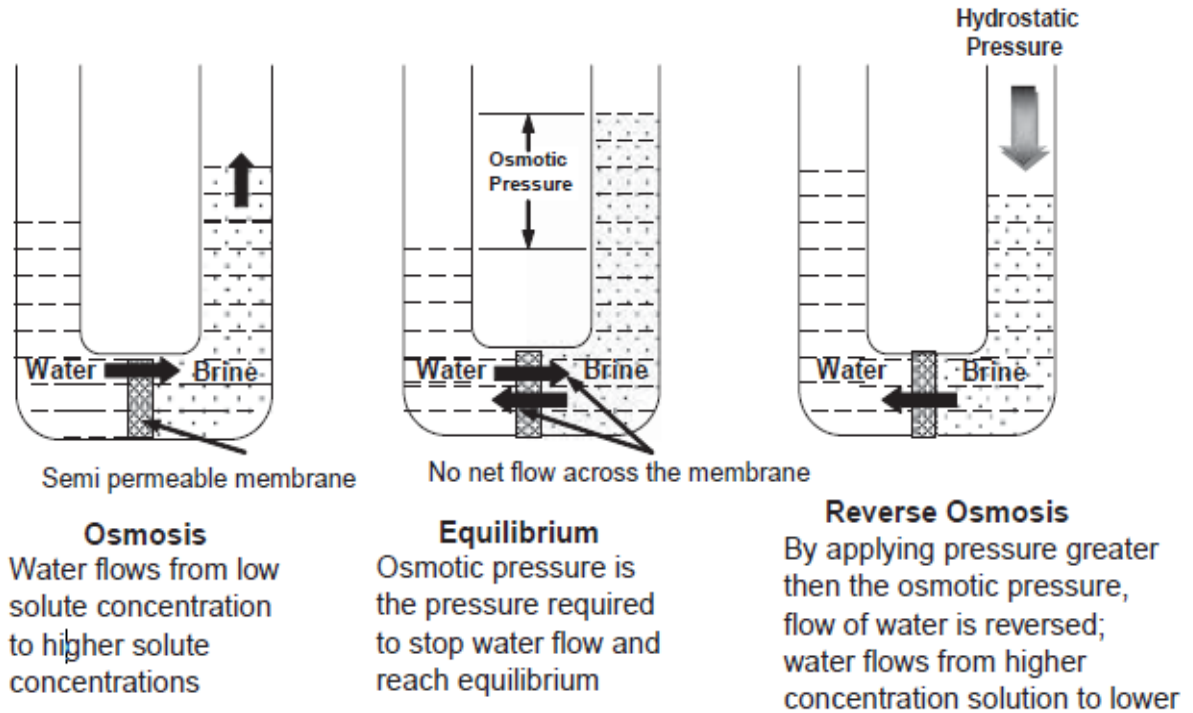
- A la fin des années 1960, le Gulf General Atomics et Aerojet General ont utilisé les membranes de cellulose acétate de Loeb et Sourirajan pour construire des modules spiral wound.
- En 1971, Dupont a introduit le perméateur Permasep B-9 le dessalement d'eau saumâtre. Le perméateur contient des millions de fibres fines creuses de polyamides aromatiques asymétriques (aramid).
- A la fin des années 1973, Dupont a introduit le perméateur 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 perméateurs 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 accroître 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.

I.2.2.5.2. Description du processus et principe de fonctionnement :

L'osmose inverse (RO) est un processus de filtration membranaire qui permet d'enlever le solvant d'une solution en laissant la solution concentrée derrière. Quand une membrane semi-perméable sépare la solution diluée de la solution concentrée, le solvant (l'eau dans le cas de dessalement) traverse du côté dilué vers le concentré de la membrane pour égaliser les

concentrations. Ce flux peut être empêché en appliquant une pression hydrostatique inverse à la solution concentrée [5].

La valeur de pression requise pour complètement contrer le flux du solvant est définie comme « la pression osmotique ». Si la pression hydrostatique appliquée excède à l'osmotique, le flux du solvant sera inversé, ainsi, le solvant va passer de la solution concentrée vers la solution diluée. Ce phénomène est appelé « **osmose inverse** ». La figure est un schéma illustrant les concepts de l'osmose, pression osmotique et de l'osmose inverse.



figI.13. Phénomène de l'Osmose Inverse [5].

La pression osmotique (π_i) est une propriété thermodynamique de la solution et elle est reliée à la fraction molaire du solvant X_{Bi} , tel que :

$$\pi_i = -\left(\frac{RT}{V_B}\right) \ln X_{Bi} \quad (I.1)$$

Où R est la constante des gaz universelle (J/K mol), T la température (K), et V_B le volume du solvant (m^3). Et pour les solutions diluées, il a été démontré que l'équation précédente pouvait être simplifiée à l'équation de Van'thoff tel que :

$$\pi_i = C_{Ai}RT \quad (I.2)$$

où : C_{Ai} est la concentration du soluté en (mol/m^3).

Ainsi, la différence de pression entre les deux cotés de la membrane, $\Delta\pi$, est reliée à la différence de concentration, $C_{A2}-C_{A3}$. La pression osmotique ne dépend ni du type du soluté ni de la taille de ses molécules mais seulement de sa concentration molaire comme montré dans la formule I.2 [5].

Pour utiliser le RO comme un processus de purification, la pression de l'eau d'alimentation de l'un des cotés de la membrane semi-perméable doit être assez grande pour dépasser la pression osmotique pour causer l'osmose inverse.

Si la membrane est hautement perméable à l'eau, mais essentiellement imperméable aux impuretés dissous, l'eau pure traversant la membrane est connue sous le nom de l'eau

produite. Quand l'eau produite traverse la membrane, la concentration des impuretés dissous croît près de la surface membranaire, ce qui mène à un phénomène nommé la polarisation de concentration [5]. L'accumulation des particules sur la surface membranaire induit à un encombrement ce qui augmente la pression osmotique du système. On atteint un point où la pression appliquée devient inférieure à la pression osmotique et par conséquent il n'y a plus d'eau produite. De plus, si on augmente la pression pour produire plus d'eau, ceci peut accélérer la formation de tartre, des sels minéraux ou l'encrassement ce qui cause des dommages à la membrane et un éventuel arrêt de tout le système [11]. De plus, il existe une limite à la fraction de l'eau d'alimentation, qui peut être récupérée comme de l'eau pure. Les unités d'osmose inverse fonctionnent dans une configuration dans laquelle seulement une partie de l'eau d'alimentation passe à travers la membrane, le reste étant dirigé vers le drain (cross-flow configuration).

L'eau rejetée par le drain contient des solutés concentrés ainsi que des matériaux insolubles, tels que les bactéries, endotoxine d'autres particules appelé reject stream. Le rapport de l'eau d'alimentation sur l'eau produite peut aller de 10% à 50%. Ce rapport dépend des caractéristiques de l'eau d'alimentation et d'autres conditions telles que le matériau de la membrane et le potentiel d'encrassement [5].

I.2.2.5.3. Types de membranes de l'osmose inverse :

Une membrane RO doit être perméable à l'eau, hautement imperméable aux solutés, et capable de travailler à haute pression. Elles doivent aussi être tolérantes à une large bande de pH et de température, et doivent être résistantes aux attaques chimiques telles que le chlore et des bactéries. Idéalement, elles doivent aussi être résistantes au tartrage et l'encrassement de l'eau contaminées [5]. Il y a trois types principaux des membranes RO :

I.2.2.5.3.1. Membranes cellulosiques :

Le concept du RO a été démontré en premier lieu à la fin de l'année 1950 avec une membrane de cellulose acétate. Ces membranes sont asymétrique, composées d'une surface de layer (couche) fine et dense de (0.2-0.5 μm) et une substructure poreuse et épaisse. Le rejet de soluté est accompli par le layer (couche) et la substructure poreuse fournit une structure solide [5].

I.2.2.5.3.2. Membranes aromatiques polyamides :

Les membranes aromatiques polyamides ont été développées en premier par DuPont dans une configuration hollowfiber (fibres creux). Comme les membranes cellulosiques, elles ont aussi une structure asymétrique avec une peau dense et fine de (0.1-1.0 μm) et une substructure poreuse. Les membranes polyamides ont une meilleure résistance à l'hydrodialyse et aux attaques biologiques que les membranes acétate cellulosiques [5].

I.2.2.5.3.3. Thin-film composites (composites à couche mince) :

Comme son nom l'indique, ces membranes sont formées par une surface fine et dense qui rejette le soluté sur les substructures poreuses. Les matériaux de construction et le processus de fabrication de ces deux layers (couches) peut être différent et optimisé pour une meilleure combinaison pour un grand flux d'eau et une faible perméabilité du soluté. Les caractéristiques, flux de l'eau et de rejet du soluté, sont en général déterminées par la couche fine qui a une épaisseur qui peut aller de 0.01 à 0.1 μm [5].

Le tableau ci-dessous présente les différentes caractéristiques des différentes membranes de l'osmose inverse et compare leurs performances :

Tel que :

L : Low (faible ou bas) ;

M : Medium (moyen) ;

H : High (grand ou Haut).

Caractéristiques	cellulosic	Aromatic polyamide	Thin-film composite
Rejection on organic	L	M	H
Rejection of low-molecular-weight organics	M	H	H
Water flux	M	H	H
pH tolerance	4-8	4-11	2-11
temperature stability	Maximum 35°C	Maximum 35°C	Maximum 45°C
Oxydant tolerance (e.g: free chlorine)	H	L	L
Compaction tendency	H	H	L
Biodegradation	H	L	L
Cost	L	M	H

TabI.1.Caractérisques des différentes membranes de l'osmose inverse [5]

I.3.Modèle mathématique :

Plusieurs modèles mathématiques de différents types d'installations sont présentés dans la littérature, commençant par ceux qui sont obtenus par identification à partir du modèle suivant :

$$G = \frac{K_i(T_a s + 1)}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1} \quad (I.3)$$

Alatiqi et al dans [12] ont proposé un modèle développé à l'Institut du Kuweit pour la recherche scientifique dans lequel ils ont considéré le flux et la conductivité électrique de l'eau comme une mesure de pureté comme variables à commander, la pression transmembranaire et le pH comme variables de commande. Le modèle obtenu est sous la forme suivante [10]:

$$\begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.002(0.056s+1)}{0.003s^2+0.1s+1} & 0 \\ \frac{-0.51(0.35s+1)}{0.213s^2+0.7s+1} & \frac{-57(0.32s+1)}{0.6s^2+1.8s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ pH \end{bmatrix} \quad (I.4)$$

Le K_i indique la direction et l'amplitude de changement des sorties donc [10]

- Un changement unité dans la pression ajoute 0.002 gpm au flux de l'eau produite.
- Un changement dans la pression a un effet négatif sur la conductivité.
- Un changement dans le pH n'a pas d'effet sur le flux.
- Un changement dans le pH a un effet négatif sur la conductivité.

Il est à noter que ces fonctions de transferts représentent une linéarisation locale du vrai système non linéaire. Le tableau suivant montre la plage d'approximation [10]:

Variables	Approximations
Flux (gpm)	0.85-1.25
Pression (psig)	800-1000
Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	400-450
pH	6-7

Tab.I.2. Intervalles de linéarité du système

Le schéma bloc suivant explicite les interactions entre les grandeurs commandées et les variables de commande :

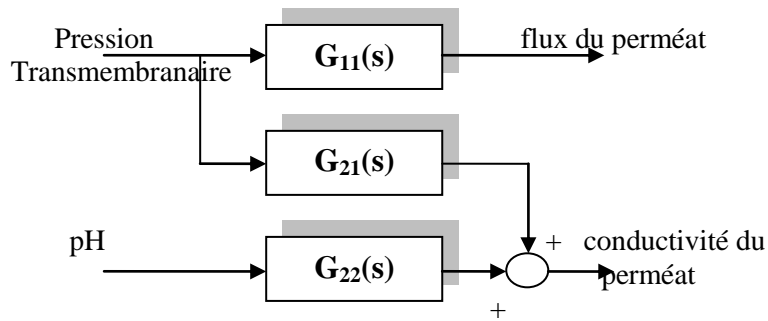


Fig.I.14. Schéma bloc illustrant l'interaction entre les variables commandées et les variables de commande

I.3.1. Réponse indicielle :

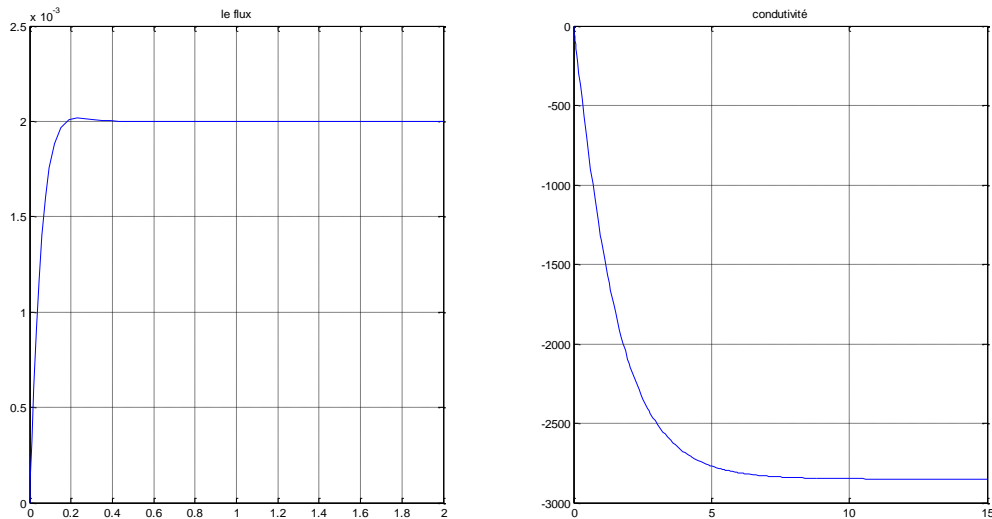


Fig.I.15. Réponse indicielle

Comme nous pouvons le voir :

- La réponse indicielle du flux est comparable à une réponse d'un système du 1^{er} ordre, malgré que G_{11} possède des pôles complexes conjugués (ce qui engendre un

mouvement oscillatoire). Le numérateur joue le rôle d'une action dérivée en amortissant la dynamique.

- La réponse indicielle de la conductivité est comparable à une réponse d'un système du 1^{er} ordre, elle part dans le sens inverse à cause du gain négatif
- La réponse du flux est plus rapide que celle de la conductivité ce qui est logique vu les constantes de temps ($T_{of}=0.34$ s, $T_{0c}= 4.86$ s)

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le problème du manque d'eau douce. Le 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 :

- Par distillation
- Par contact membranaire

On a explicité et détaillé un peu plus le processus de l'osmose inverse qui est l'objet de notre étude, et on a présenté son modèle mathématique.

Chapitre II

*COMMANDE DU SYSTÈME DE
DESSALEMENT D'EAU DE MER
OSMOSE INVERSE*

Introduction :

La régulation des processus industriels est devenue une nécessité pour un meilleur rendement et une meilleure performance. Le système de dessalement d'eau de mer par osmose inverse ne déroge pas à la règle. En effet ce système exige un maintien des différentes grandeurs dans la limite de l'acceptable, tel que les valeurs possibles du pH qui sont spécifiées par le fabricant pour éviter l'augmentation et la croissance de formation du tartre, et de le limiter ce qui nous permettra de travailler dans des conditions optimales, d'avoir une durée de vie plus longue de l'installation, une réduction des coûts du produit [9].

Dans ce qui suit le but est de garder la valeur du flux dans la plage tolérée par le fabricant (ce qui permet une plus grande durée de vie) ainsi que garder la conductivité constante quel que soit la valeur du flux dans cette plage (pour que l'eau produite soit potable).

II.1.Application de différentes commandes sur le système osmose inverse :

Etant donné le système de l'osmose inverse représenté par l'équation (I.4) du premier chapitre, nous allons dans ce chapitre appliqué quatre différents types de commande afin de garder le flux et la conductivité à la sortie du système à leurs valeurs désirées, une étude comparative avec les résultats trouvés par Alatiqi et al. et A. Abbas a été faite afin d'évaluer les performances des commandes calculées.

II.1.1.Commande par PID :

La plupart des régulateurs industriels sont à base des régulateurs PID. Ils ont quand ils s'appliquent une efficacité remarquable et un rapport prix/performance difficile à rivaliser. Ils sont pour ces raisons commercialisés sur une échelle industrielle mondiale et sont un outil de base classique pour l'industrie de production [7]. Historiquement, ils faisaient appel pour leur réalisation à des techniques analogiques. A l'heure actuelle, bien que l'approche numérique soit prédominante, l'utilisation des PI, PID perdure, car elle ne présuppose pas une connaissance précise de la dynamique du procédé à commander.

Il existe dans la littérature plusieurs approche pour le calcul des paramètres du régulateur PID, Nous allons ici utiliser une approche de synthèse algébrique reposant, sur la connaissance d'un modèle de comportement du processus, et un placement de pôles, fixant la réponse en boucle fermée, et les résultats seront comparés à ceux trouvés par Alatiqi qui a utilisé la méthode de Ziegler-Nichols.

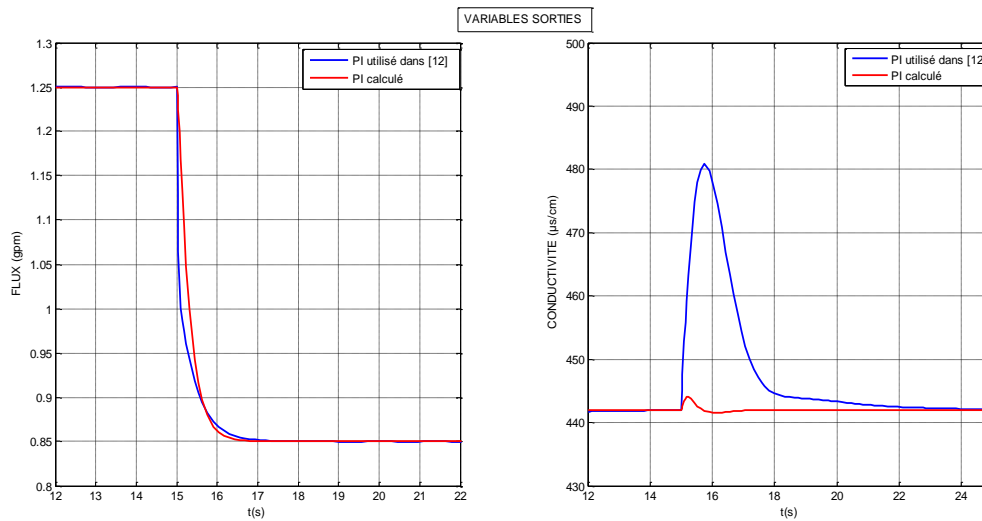
II.1.1.1 Simulations et analyse :

Le calcul des paramètres du PI dans [12] est réalisé par la méthode de Ziegler-Nichols. Et nous avons effectué le calcul avec une méthode analytique. Les résultats obtenus sont sur le tableau suivant :

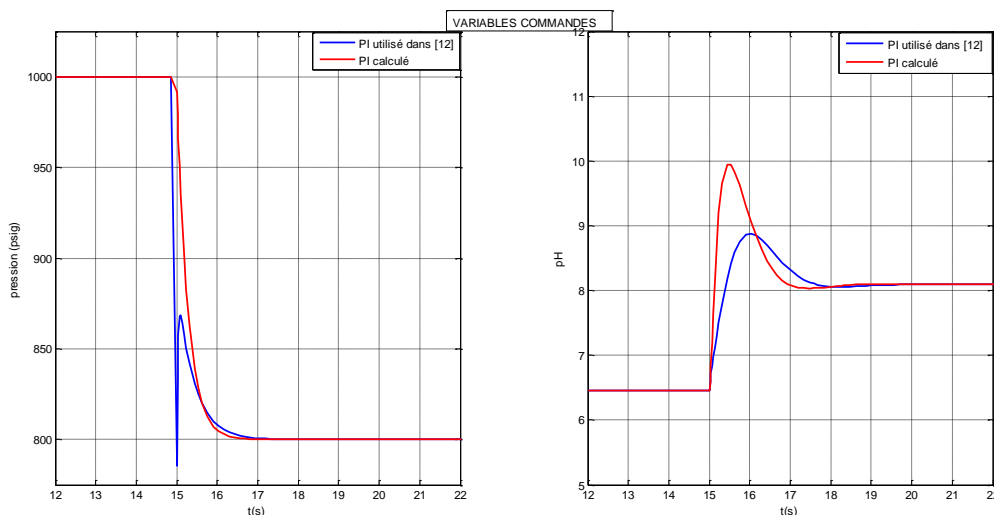
Système	PI utilisé dans [10] et [12]	PI calculé
G11	P= 536 ; T _i =0.23	P= 21.28 ; T _i = 0.0131
G22	P= -0.05 ; T _i =1.81	P= -0.7123 ; T _i = 0.1547

Tableau II.1. Paramètres du régulateur PI

L'application de ces résultats sur le système donne les courbes suivantes :



figII.1. Réponse du flux et de la conductivité du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant un régulateur PI.



figII.2. Réponse de la pression et du pH du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant un régulateur PI.

Les résultats des différentes courbes nous démontrent que :

Pour le flux ; les deux différents paramètres donnent le même résultat, le flux suit la nouvelle référence et arrive au régime permanent après 2.5 secondes.

Pour la pression ; avec les paramètres utilisés dans [10] et [12], la pression descend brutalement de 1000 psig à 785 psig puis remonte brutalement à 868 psig et finalement se stabilise doucement à la valeur finale 800 psig en 2 secondes.

Avec les paramètres qu'on a calculé, la pression descend de 1000 psig à la valeur finale 800 psig sans aucun changement brusque en 2 secondes.

En ce qui concerne la conductivité ; nous constatons qu'avec les paramètres utilisés dans [10] et [12], la conductivité augmente jusqu'à 480 µs/cm et redescend vers sa valeur de référence 442 µs/cm après environ 5 secondes. Et avec les paramètres qu'on a calculés, la

conductivité ne change que de 442 $\mu\text{s/cm}$ à 443 $\mu\text{s/cm}$ et retrouve sa valeur initiale en moins d'une seconde.

Et de ce qui est du pH, avec les paramètres utilisés dans [10] et [12], le pH augmente de 6.45 à 9 pour faire descendre la conductivité, et se stabilise finalement à la valeur 8.1 en 2 secondes. Et avec les paramètres qu'on a calculés, le pH augmente de 6.45 à 10 pour faire descendre la conductivité, et se stabilise finalement à la valeur 8.1 en 2 secondes.

En comparant les deux résultats on voit bien que :

- La réponse du flux est pratiquement la même dans les deux cas.
- La variation de la pression (commande u_1) par rapport au changement du flux avec les paramètres calculés du PI est nettement meilleure qu'avec les paramètres utilisés dans [10] et [12] puisque ces paramètres nous ont permis de nous débarrasser du changement brusque de la pression qui pourrait endommager la pompe.
- La réponse de la conductivité qui est un facteur de qualité et de pureté de l'eau, s'est nettement amélioré. On remarque bien qu'avec les paramètres utilisés dans [10] et [12] la conductivité a atteint 480 $\mu\text{s/cm}$, une valeur assez lointaine de la valeur 442 $\mu\text{s/cm}$ qui est la bonne valeur pour une eau potable et sort de la plage d'approximation du système linéaire. Alors que dans le cas où on a utilisé les paramètres calculés, la conductivité n'a changé que 1 $\mu\text{s/cm}$ en atteignant la valeur 443 $\mu\text{s/cm}$, ce qui est une très bonne correction par rapport à la première commande.
- Le pH varie de 6.45 à une valeur 9 puis se stabilise finalement à 8.1 en utilisant les paramètres utilisés dans [10] et [12]. Et en utilisant les paramètres calculés, le pH varie de 6.45 à 10 puis se stabilise à 8.1. On remarque que dans les deux cas on a un problème dans la valeur du pH qui sort de la plage de fonctionnement de notre système linéaire (présence d'éventuelles non linéarités).

II.1.2. 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 II.1 et II.2 respectivement.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$u(t) = -kx(t) + r(t). \quad (\text{II.2})$$

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 [22].

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

$$u = -kx - k_i \int_0^t e(\alpha) d\alpha \quad (\text{II.3})$$

Posant $Z = \int_0^t e(\alpha) d\alpha$ ce qui fait que $\dot{Z} = e(\alpha) = r - Cx$; avec r la référence.

La commande devient alors

$$u = -kx - k_i Z = -[K \ K_i] \begin{bmatrix} x \\ Z \end{bmatrix} = -\bar{K} \bar{x} \quad (\text{II.4})$$

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

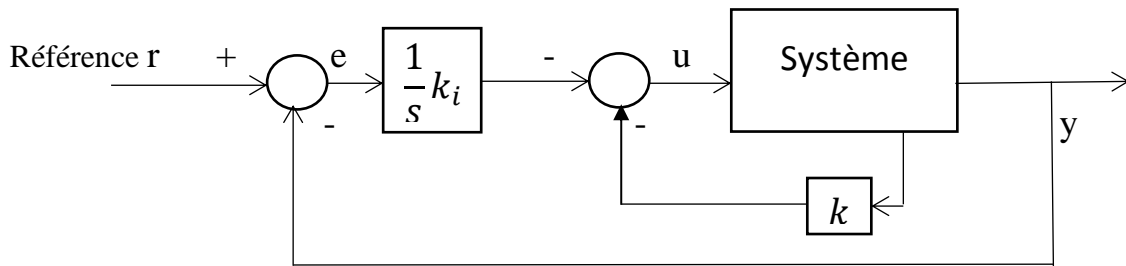
Le système augmenté, associé à ses nouvelles variables, admet la représentation d'état II.3, et la commande prend alors la forme de II.4

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u \\ y = \bar{C}\bar{x} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

$$u = -\bar{K}\bar{x} \quad (\text{II.6})$$

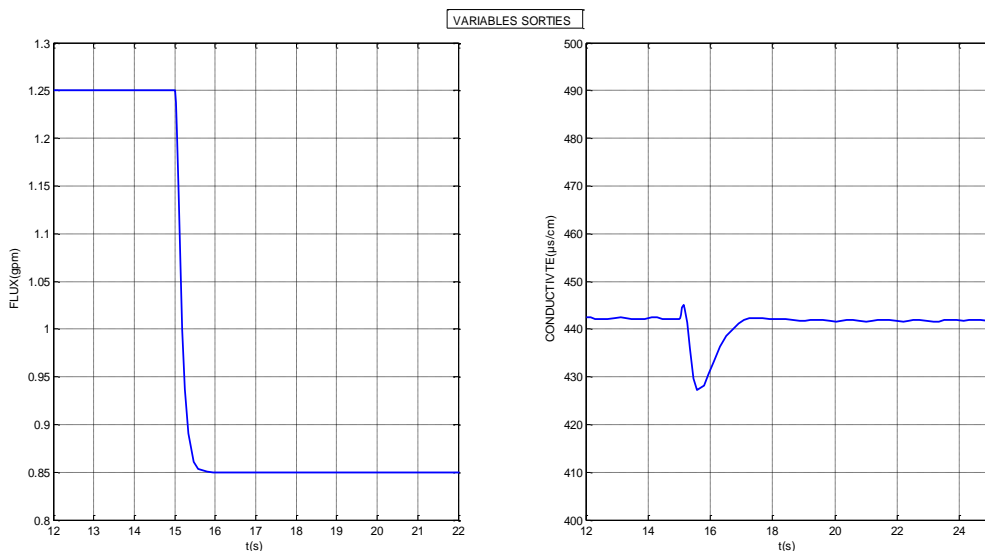
Tel que :

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

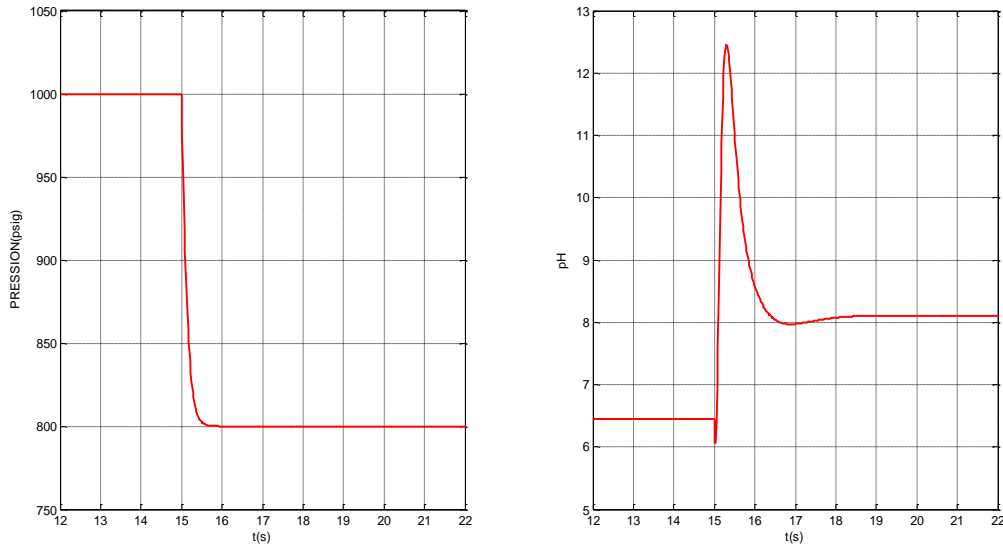


figII.3.Schéma de la commande par retour d'état avec une action intégrale

II.1.2.1.Simulations et analyses :



figII.4.Réponse du flux et de la conductivité du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande RE avec action intégrale.



figII.5. Variations de la pression et du pH à un changement du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande RE avec action intégrale.

Il apparait bien que le flux suit bien la consigne donnée avec un bon temps de réponse, de même pour sa commande qui est la pression qui ne présente pas de changement brusque et reste dans la limite tolérable pour le système.

Cependant, la conductivité présente un pic ce qui nuira à la pureté de l'eau, un comportement similaire est observé dans le comportement de la commande pH.

II.1.3. Commande LQR :

Soit le système sous-représentation d'état suivante :

$$f(x, u, t) = \dot{x} = Ax + Bu. \quad (\text{II.7})$$

L'objectif de la commande u (par retour d'état) est de minimiser le critère :

$$J = \frac{1}{2} \int L dt = \frac{1}{2} \int (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (\text{II.8})$$

Tel que Q et R sont des matrices définies positives.

Le modèle du système constitue une contrainte de type instantanée dont il faut tenir compte dans le critère augmenté, ainsi le nouveau critère est donné :

$$J = \frac{1}{2} \int F dt = \frac{1}{2} \int (L + \Psi^T (f(x, u, t) - \dot{x})) dt \quad (\text{II.9})$$

En posant $\lambda = \frac{\partial F}{\partial \dot{x}}$ on trouve l'Hamiltonien :

$$H(x, u, \Psi, t) = L(e, u, t) + \Psi^T f(x, u, t) \quad (\text{II.10})$$

En dérivant $H(x, u, \Psi, t)$ par rapport à u on trouve :

$$u = -R^{-1}B^{-T} \Psi(t). \quad (\text{II.11})$$

$u(t) = -K(t).x(t)$, et on donne $\Psi(t) = P(t).x(t)$.

Donc l'Hamiltonien devient :

$$H = \frac{1}{2}x^T(Q + PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P)x \quad (\text{II.12})$$

La résolution de l'équation de RICCATI suivante:

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (\text{II.13})$$

Permet de retrouver la solution P, ainsi la commande est donnée par :

$$u(t) = -R^{-1}BPx(t) = -K.x(t) \quad (\text{II.14})$$

Le schéma de commande est donné dans la figure :

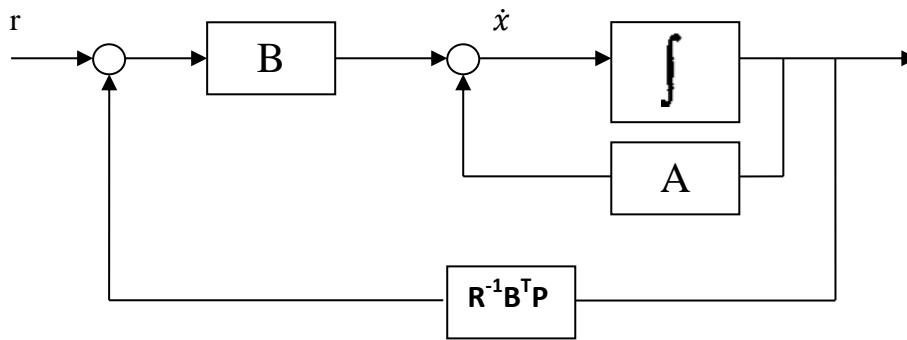
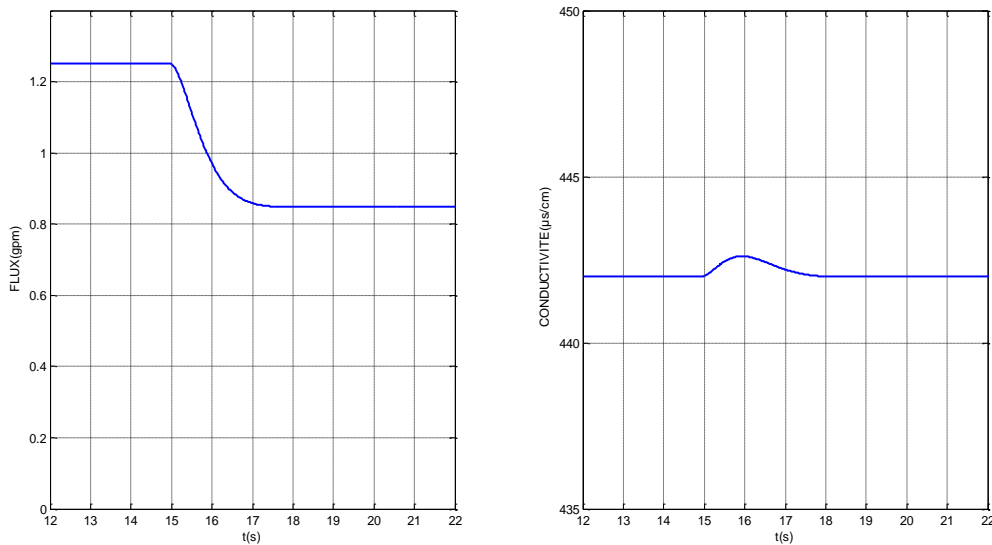
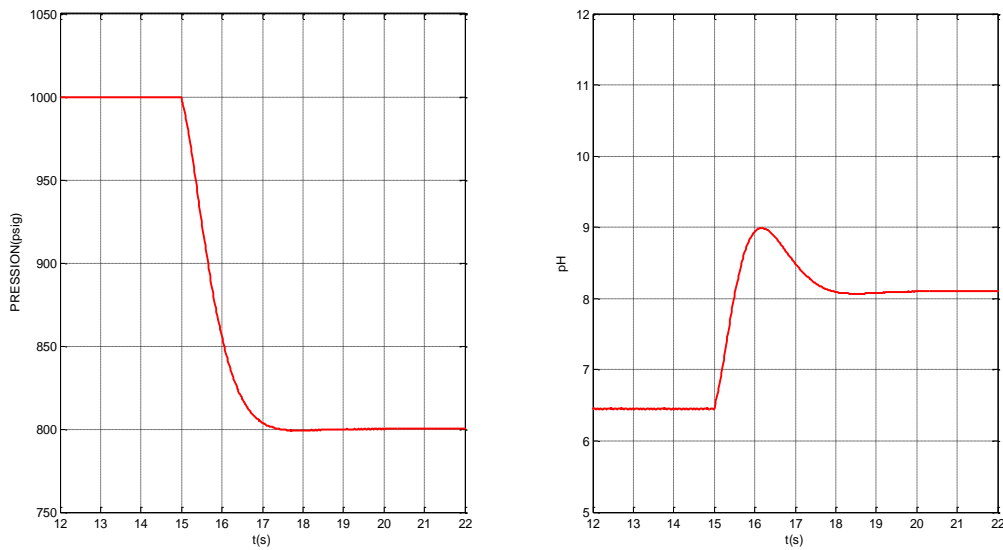


fig.II.6. Schéma de la commande LQR.

II.1.3.1.Simulations et résultats :



figII.7.Réponse du flux et de la conductivité du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande LQR.



figII.8. Variations de la pression et du pH à un changement du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande LQR.

Les résultats des simulations montrent un suivi parfait de la consigne du flux, et la conductivité présente un changement dans sa valeur égale à $0.6 \mu\text{s/cm}$.

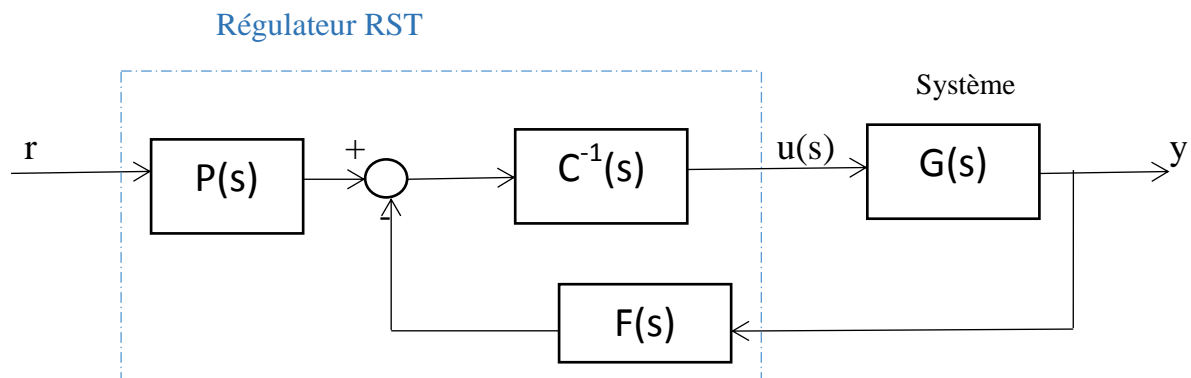
La pression reste dans la plage de fonctionnement qui est (800,1000) et le changement se fait sans variations brusques. Les mêmes valeurs à l'état statique que celles trouvées avec le régulateur RE sont enregistrées dans la commande pH.

II.1.4. Commande à modèle de référence :

II.1.4.1. La structure générale de la commande à trois blocs :

Généralement la commande classique d'un processus est constituée d'un régulateur unique recevant comme entrée l'erreur entre la consigne et la mesure, et fournissant la commande u au processus. Ce type de structure de commande ne permet pas de différencier la dynamique en asservissement de celle du rejet des perturbations.

Le régulateur RST montré dans la figure ci-dessous est un régulateur à une structure polynomiale. Il consiste en 3 polynômes R, S et T. La synthèse du régulateur est basée sur un placement de pôles robuste. [21]



figII.9. Un système avec la structure RST.

Le régulateur à trois blocs est constitué par :

P(s): précompensateur, action feed ward.

C(s): Action cascade.

F(s): Action feedback.

La commande RST prend la forme générale:

$$u(s) = \frac{P(s)}{C(s)}r(s) - \frac{F(s)}{C(s)}y(s) \quad (\text{II.7})$$

$$K_1(s) = \frac{P(s)}{C(s)}, \quad K_2(s) = \frac{F(s)}{C(s)}$$

Le fait de traiter la consigne et la sortie du processus conduit dans la synthèse du correcteur à avoir deux filtres $K_1(s)$ et $K_2(s)$.

II.1.4.1.2. La synthèse d'un régulateur RST :

La commande avec modèle de référence comme on l'a vu dans le paragraphe précédent, est constitué autour de trois polynômes R, S et T, ces polynômes sont de la formes suivantes :

$$F(s) = f_{nf}S^{nf} + f_{nf-1}S^{nf-1} + f_{nf-2}S^{nf-2} + f_{nf-3}S^{nf-3} + \dots + f_0.$$

$$C(s) = C_{nc}S^{nc} + C_{nc-1}S^{nc-1} + C_{nc-2}S^{nc-2} + C_{nc-3}S^{nc-3} + \dots + C_0.$$

$$P(s) = p_{np}S^{np} + p_{np-1}S^{np-1} + p_{np-2}S^{np-2} + p_{np-3}S^{np-3} + \dots + p_0.$$

Tel que leurs degrés sont comme suit :

$$\deg(F(s)) = nf, \quad \deg(C(s)) = nc, \quad \deg(P(s)) = np.$$

$$\text{Le système à contrôler est : } G(s) = \frac{A(s)}{B(s)}$$

Où A(s) et B(s) représente respectivement le numérateur et le dénominateur du système avec des degrés respectivement n et m .

$$A(s) = a_nS^n + a_{n-1}S^{n-1} + a_{n-2}S^{n-2} + a_{n-3}S^{n-3} + \dots + a_0.$$

$$B(s) = b_mS^m + b_{m-1}S^{m-1} + b_{m-2}S^{m-2} + b_{m-3}S^{m-3} + \dots + b_0.$$

Le principe de la méthode est de faire correspondre la dynamique de notre système en question (G(s)) à la dynamique (désirée) d'un système de référence que nous choisissons.

Choix du modèle de référence :

Pour le cas SISO :

$G_{BF}^d = \frac{B(s)^d}{A(s)^d}$; tel que $A(s)^d, B(s)^d$ est le numérateur et le dénominateur respectivement du système désiré avec des degrés respectivement n_d et m_d .

Pour le cas MIMO à deux entrées et deux sorties:

$$G_{BF}^d = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1+sT_1)^{n_{d1}}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1+sT_2)^{n_{d2}}} \end{bmatrix}$$

Tel que T_1 et T_2 sont des constantes de temps des systèmes désirés

n_1 et n_2 représentent les degrés des systèmes désirés qui devront avoir au moins le même degré relatif que le système à commander.

Le transfert entre la commande $r(s)$ et la sortie $y(s)$ dans le système de la figure figII.6, en utilisant II.7 est donné comme suit :

$$y(s) = \frac{B(s)P(s)}{A(s)C(s)+B(s)F(s)} r(s) \quad (\text{II.8})$$

Et donc

$$G_{BF} = \frac{B(s)*P(s)}{A(s)*C(s)+B(s)*F(s)} \quad (\text{II.9})$$

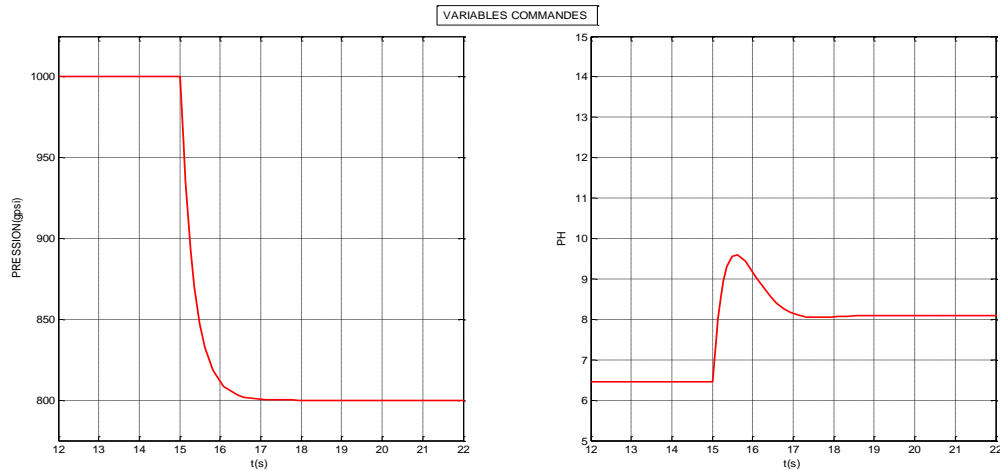
L'équation II.9 représente la fonction en boucle fermée du système à réguler avec la structure RST, et le travail consiste à trouver donc les polynômes $P(s)$, $F(s)$ et $A(s)$ de tel sorte à correspondre la dynamique de la boucle fermée à une dynamique désirée G_{BF}^d .

La solution adoptée en générale est la suivante :

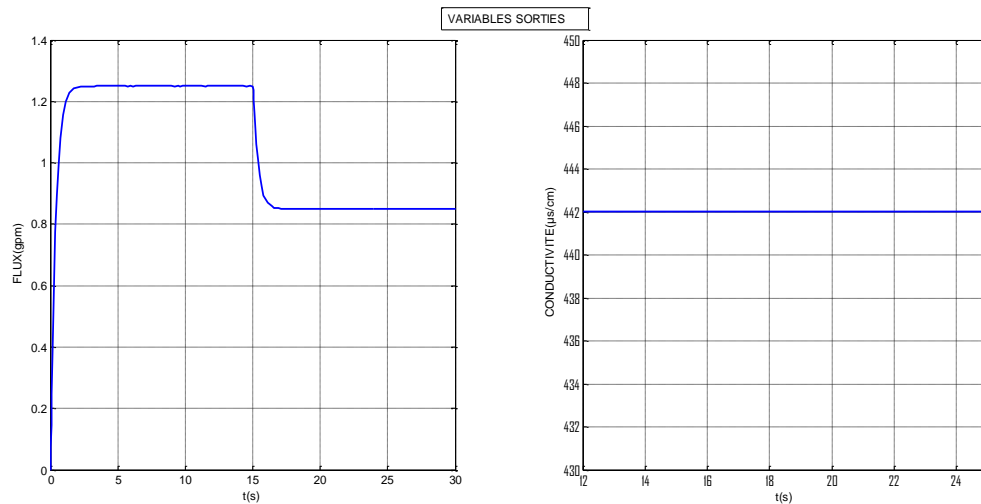
$$\begin{cases} P(s) = B(s)^d \\ A(s) * C(s) + B(s) * F(s) = A(s)^d * B(s) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Les degrés des polynômes de $C(s)$ et $F(s)$ sont déterminés directement à partir des degrés des polynômes $A(s)^d, B(s)^d, A(s), B(s)$. et la détermination de leurs coefficients revient à résoudre un système d'équations linéaires.

II.1.4.1.3. Simulations et analyses :



figII.10. Variations de la pression et du pH à un changement de flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant le régulateur RST.

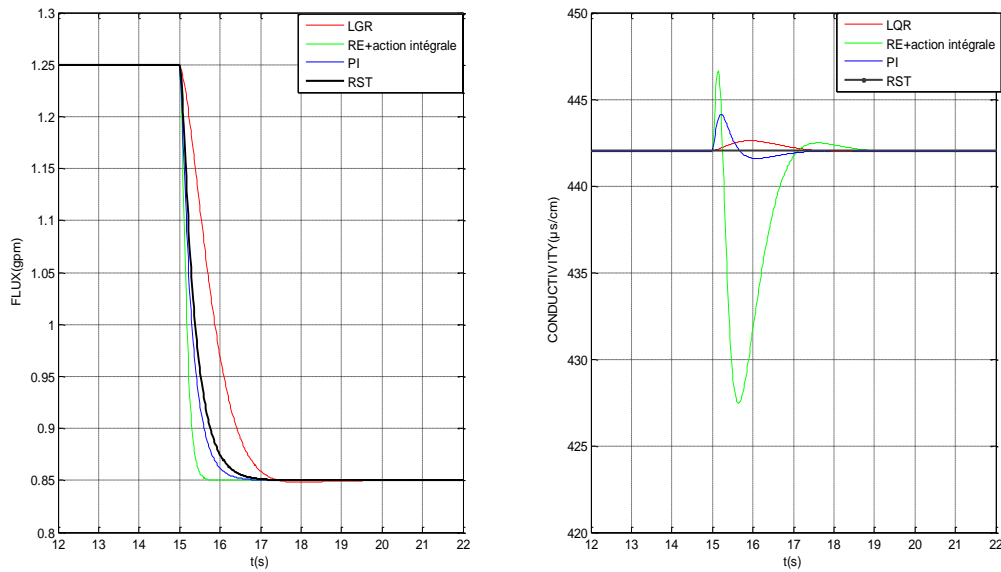


figII.11. Réponse du flux et de la conductivité du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant le régulateur RST.

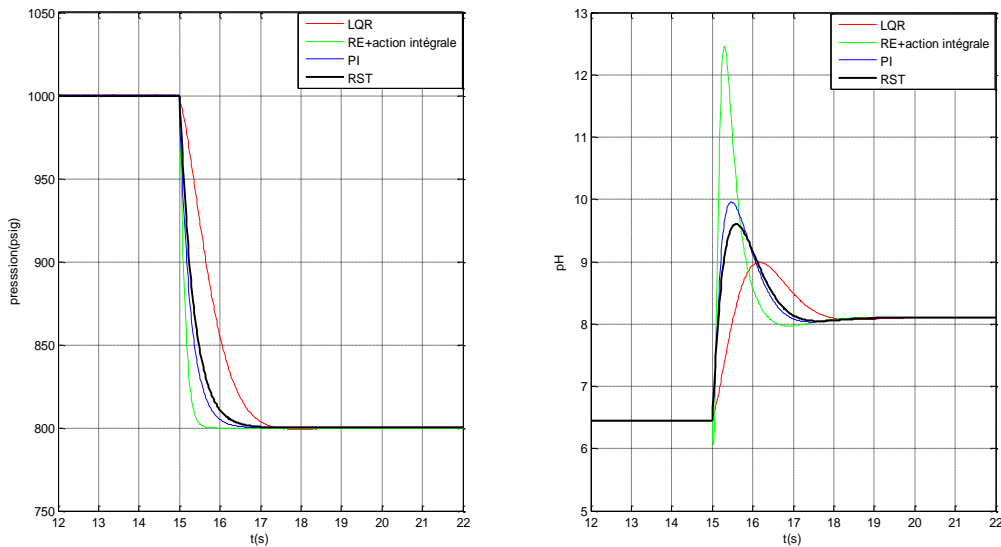
L'utilisation du régulateur RST nous a permis de suivre le changement de la consigne appliqué au flux avec une bonne dynamique de la pression sans entraîner une fluctuation au niveau de la conductivité.

II.2. Etude comparative :

Afin d'apprécier les résultats des différentes commandes appliquées sur le système, nous avons effectué une étude comparative. Les figures figII.11 et fig.12 montrent les résultats obtenus.



figII.12. Réponse du flux et de la conductivité du système à une variation échelon du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande LQR, RE avec action intégrale, le régulateur RST et le PI



figII.13. Variations de la pression et du pH à un changement du flux de 1.25 à 0.85 gpm en utilisant la commande LQR, RE avec action intégrale, le régulateur RST et le PI.

Les quatre types de régulateurs utilisés donnent une dynamique de pression satisfaisante permettant ainsi au flux de suivre la nouvelle consigne dans un temps qui approxime les 2 secondes sans aucun dépassement.

La commande LQR a donné de très bons résultats concernant la conductivité qui n'a présenté qu'un changement de 0.6 µs/cm par contre la commande par retour d'état avec action intégrale a présenté un changement de 15 µs/cm de même pour le pH qui a montré un pic maximum. Cette amélioration est due au caractère de placement de pôles optimal de la commande LQR.

Le régulateur RST assure une meilleure pureté de l'eau en gardant sa valeur à $442 \mu\text{s/cm}$ (la bonne valeur pour une eau potable), contrairement à la commande par retour d'état avec action intégrale, le régulateur PI, la commande LQR, et la commande DMC utilisée dans [24] présentent un dépassement de $442 \mu\text{s/cm}$ à $427.15 \mu\text{s/cm}$, $442 \mu\text{s/cm}$ à $443 \mu\text{s/cm}$, $442 \mu\text{s/cm}$ à $442.6 \mu\text{s/cm}$ et de $442 \mu\text{s/cm}$ à $442.1 \mu\text{s/cm}$ respectivement.

Dans toutes les commandes citées précédemment la valeur du pH passe de 6.45 à 8.1 et se stabilise à cette valeur, cependant cette dernière sort des limites de linéarité déterminées par Alatiqi et al. ce qui peut présenter des non linéarités négligées et des dynamiques non modélisées provoquant un effet imprévisible [10].

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a appliqué quatre différentes commandes sur le système linéaire identifié par Alatiqi et al. La commande RST nous a donné les meilleurs résultats en donnant un bon temps de réponse du flux tout en conservant la conductivité de l'eau douce à sa valeur désirée de $442 \mu\text{s/cm}$. La commande PI calculée s'avère meilleure que celle trouvée par Alatiqi puisque elle ne présente qu'un dépassement de $1 \mu\text{s/cm}$ contre un dépassement de $38 \mu\text{s/cm}$. Quant à la commande LQR, elle a montré son efficacité sur le système puisque elle ne présente qu'un changement de $0.6 \mu\text{s/cm}$ dans la conductivité, ceci est un très bon résultat pour la conservation de la qualité de l'eau. La commande par retour d'état donne une réponse plus rapide au niveau du flux de l'eau produite, mais au détriment de sa conductivité où nous avons enregistré le pic maximum.

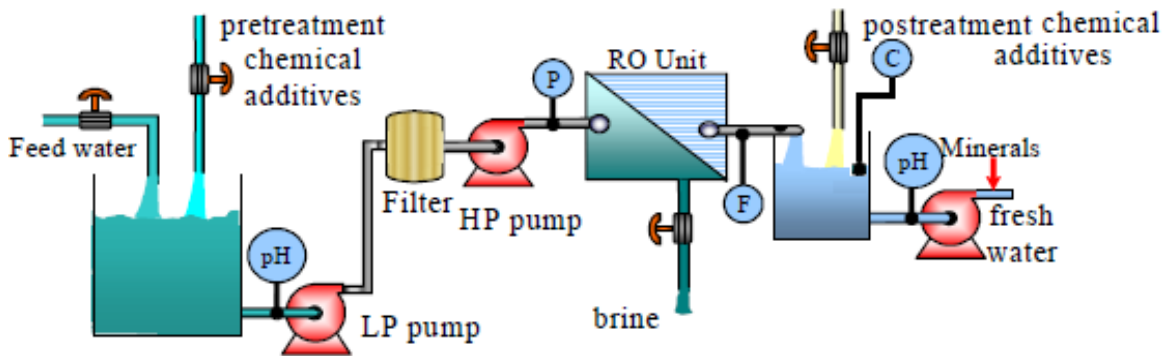
Vu que les valeurs du pH sortent des limites tolérées pour le système linéaire, d'autres structures d'osmose inverse sont proposées afin de palier à ce problème, dans ce qui suit on propose une autre structure de commande qui consiste en la commande du flux, le pH et la conductivité étant ajustés dans la partie prétraitement et post-traitement respectivement.

Chapitre III

*COMMANDE D'UN SYSTÈME NON
LINÉAIRE D'OSMOSE INVERSE*

Introduction :

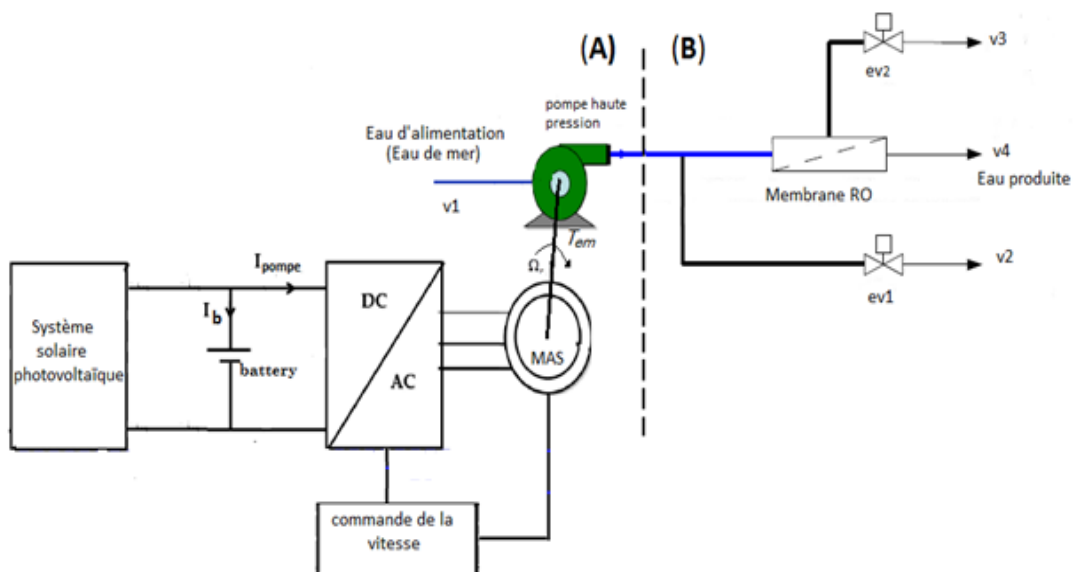
Comme nous l'avons expliqué dans la conclusion du chapitre précédent, la commande pH du système dépasse les valeurs tolérées, ainsi une autre structure de commande est proposée afin de palier à ce problème. Dans cette structure le traitement du pH et de la conductivité se font au prétraitement et au post-traitement respectivement dont le schéma est donné par la figure FigIII.1, et l'objectif de commande serait la régulation du flux tout seul.



figIII.1.Schéma pratique de l'unité de dessalement par l'osmose inverse.

III.1 Problématique de commande :

La figure III.2 montre un schéma du processus de dessalement RO. Elle le représente 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 où l'eau douce est récupérée à sa sortie. L'eau de mer et l'eau saumâtre sont dégagées via les deux vannes ev1 et ev2 respectivement.



FigIII.2.Schéma de commande de l'osmose inverse.

Dans ce système, l'objectif sera de garder la vitesse de la pompe constante, et d'ajuster le flux de l'eau produite à sa valeur désirée.

Le système globale est devisé en deux sous-systèmes découplé que nous allons présenter séparément en détail dans les partie III.2 et III.3. Tel que le premier sous-système représente les équations d'état pour la commande du flux de l'eau douce produite et le deuxième sous-système donne les équations d'état de la machine asynchrone entrainant la pompe.

Les équations d'états qui régissent les deux sous systèmes sont comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \frac{1}{\rho V} \frac{W_p}{v_1(x_1, x_2)} - \frac{1}{2\rho V} (x_1 + v_{2s}) e_{v_1} \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{\rho V} \frac{W_p}{v_1(x_1, x_2)} - \frac{1}{2\rho V} (x_2 + v_{3s}) e_{v_2} \\ \frac{di_{ds}}{dt} = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} \Psi_{dr} + \frac{1-\sigma}{\sigma M} \omega_m \Psi_{qr} + \frac{v_{ds}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -\omega_s i_{ds} - \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{qs} - \frac{1-\sigma}{\sigma M} \omega_m \Psi_{dr} + \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} \Psi_{qr} + \frac{v_{qs}}{\sigma L_s} \\ \frac{d\Psi_{dr}}{dt} = -\frac{\Psi_{dr}}{T_r} + \omega_{sl} \Psi_{qr} - \frac{M}{T_r} i_{ds} \\ \frac{d\Psi_{qr}}{dt} = -\frac{\Psi_{qr}}{T_r} + \omega_{sl} \Psi_{dr} - \frac{M}{T_r} i_{qs} \\ \frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{p \frac{M \Psi_{dr}^*}{L_r} i_{qs} - K_f \Omega_m - \Gamma_r}{J} \end{array} \right. \quad (III.1)$$

Tel que le vecteur d'état du premier sous système est donné par $[x_1 \ x_2]^T$, et le deuxième sous sous-système est donné par $[i_{ds} \ i_{qs} \ \Psi_{dr} \ \Psi_{qr} \ \Omega_m]^T$.

III.2. Commande de la machine asynchrone :

La machine entrainant la pompe du système déjà présenté, fonctionne à une vitesse constante 300 rad/s, d'où l'intérêt de sa régulation. Il existe plusieurs méthodes de régulation de la vitesse de la machine asynchrone, on cite à titre d'exemple la commande scalaire appelé commande à V/f constant, cependant cette technique présente des inconvénients pour les basses vitesses. La commande que nous allons utiliser se base sur la méthode qu'a proposé Blaschke en 1972, et qui se repose sur l'orientation du flux rotorique sur l'axe d du repère fictif (d, q). Cette technique permet de rendre le modèle de la machine semblable à celui de la machine à courant continu en éliminant le couplage naturel qui existe entre le courant qui crée le flux et celui qui crée le couple électromagnétique [26].

III.2.1. Modèle de la machine asynchrone :

III.2.1.1. Hypothèses simplificatrices :

La modélisation de la machine asynchrone est effectuée en admettant les suppositions suivantes [25]:

- l'additivité du flux;

- la constance des inductances propres;
- les inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques varient selon une loi sinusoïdale en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

Celles-ci ne sont possibles qu'en conséquences et moyennant les hypothèses, communément admises, ci-dessous :

- l'entrefer est constant;
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques est négligée;
- le circuit magnétique du stator et du rotor est non-saturé

III.2.1.2. Equations électriques de la machine

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 [27], [28]. Cette transformation est connue par la transformation de PARK.

Les équations de la machine en tenant compte des hypothèses simplificatrices ainsi que la transformation de Park sont donnés dans l'annexe A.

III.2.1.3. Modèle de la machine asynchrone avec orientation du flux rotorique :

Pour pouvoir utiliser la méthode de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique nous faisons recours à un modèle de la machine dans un repère synchrone $\omega_a = \omega_s$ lié au rotor, avec projection du flux rotorique sur l'axe d du repère fictif (d, q) . Ce modèle est obtenu par le biais de la transformation de Park qui projette les composantes du repère (a, b, c) dans un repère fictif (d, q) .

Les équations sont les suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} \psi_{dr} + \frac{v_{ds}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -\omega_s i_{ds} - \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{qs} - \frac{1-\sigma}{\sigma M} \omega_m \psi_{dr} + \frac{v_{qs}}{\sigma L_s} \\ \frac{d\psi_{dr}}{dt} = -\frac{\psi_{dr}}{T_r} - \frac{M}{T_r} i_{ds} \\ 0 = \omega_s \psi_{dr} - \frac{M}{T_r} i_{qs} \end{cases} \quad (III.2)$$

L'équation mécanique et le couple électromagnétique sont donnés par III.3 et III.4 :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = p \frac{M \psi_{dr}^*}{L_r} i_{qs} - K_f \Omega_m - \Gamma_r \quad (III.3)$$

$$\Gamma_e = p \frac{M \psi_{dr}^*}{L_r} i_{qs} \quad (III.4)$$

III.2.2.Principe de la commande :

La synthèse et la structure de réglage se base sur deux équations ; l'équation mécanique du système et celle de la dynamique du flux ψ_{dr}

III.2.2.1.Réglage de la vitesse :

La synthèse d'un régulateur pour la vitesse est calculée à partir de l'équation III.3, où la composante i_{qs} est la commande. L'équation est réécrite dans le domaine fréquentiel comme suit :

$$Js\Omega_m(s) = (p \frac{M\psi_{dr}^*}{L_r})i_{qs}(s) - \Gamma_r(s) - K_f\Omega_m(s) \quad (III.5)$$

ψ_{dr}^* : L'étoile désigne que la valeur du flux s'est établie à sa valeur de référence du moment que la dynamique du flux est plus rapide que celle de la vitesse.

Le schéma suivant montre la structure de réglage de la vitesse :

:

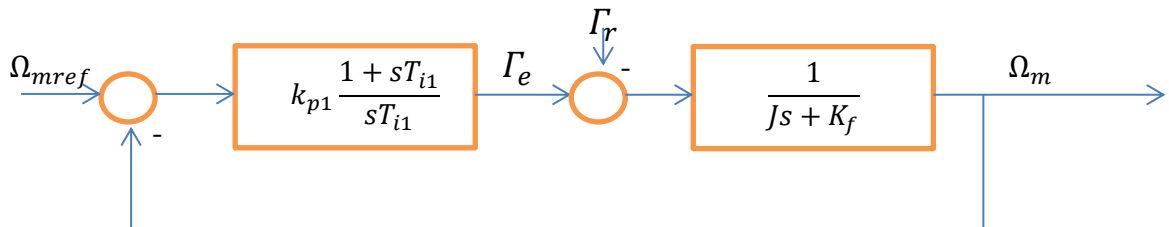


Fig.III.3.Schéma de commande de la vitesse.

III.2.2.2.Réglage du flux rotorique :

Le régulateur du flux est calculé à partir de l'équation III.2, où la composante i_{ds} est la commande :

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = -\frac{\psi_{dr}}{T_r} - \frac{M}{T_r}i_{ds} \quad (III.6)$$

D'après l'équation III.6, on peut écrire la relation suivante entre ψ_r et i_{ds} :

$$\psi_r = \frac{M}{T_r s + 1} i_{ds} \quad (III.7)$$

Le schéma de la commande est le suivant :

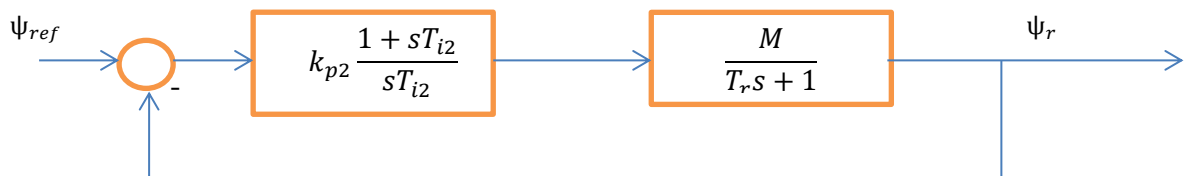
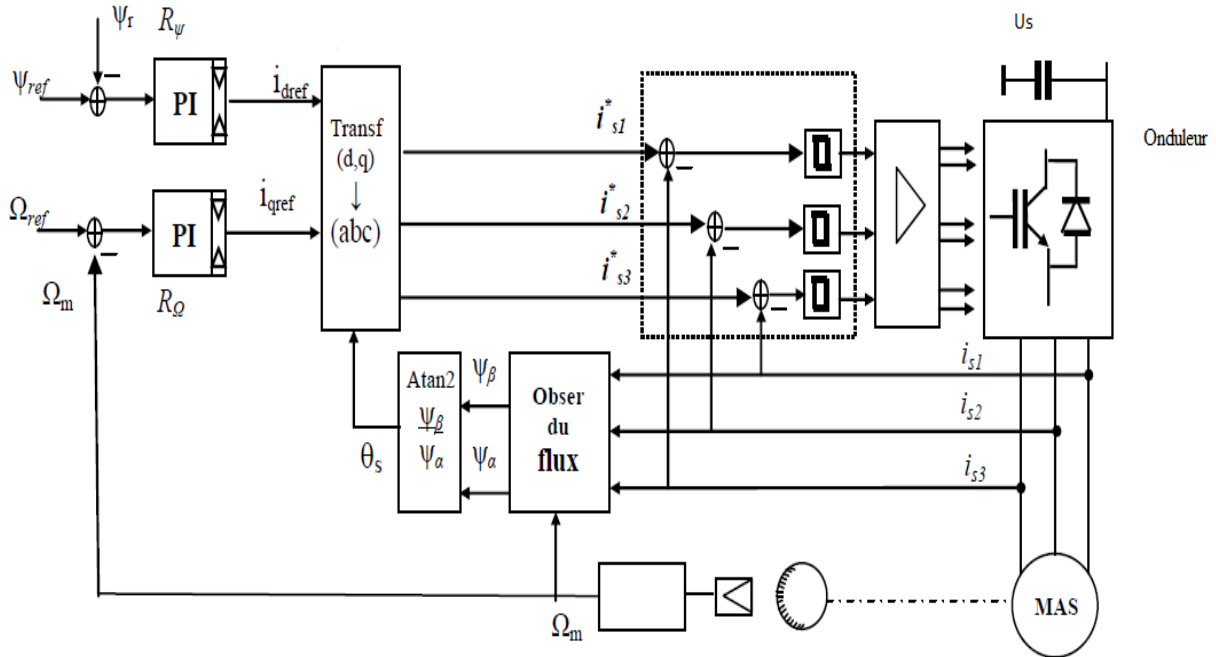


Fig.III.4.Schéma de commande du flux.

Les résultats de calcul des coefficients des deux régulateurs, vitesse et flux, sont données dans l'annexe.

III.2.2.3. Structure générale de commande :

Le schéma ci dessous montre la structure générale de commande de la machine asynchrone par la méthode vectorielle directe, la machine étant alimentée par un onduleur triphasé en tension commandé en courant par la technique d'hystérésis.

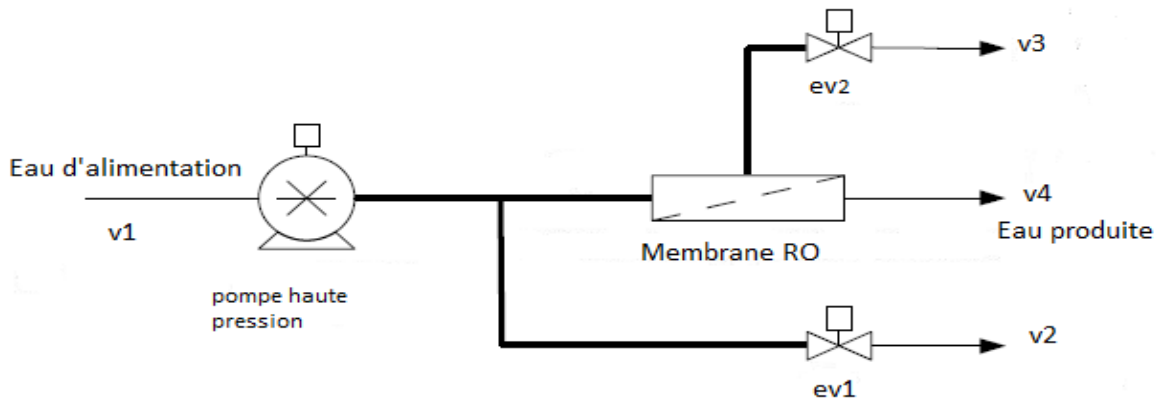


III.5. Structure de réglage de la vitesse de la MAS avec orientation directe du flux rotorique.

III.3. Commande du flux de l'eau produite :

Dans cette partie, nous allons nous focaliser sur la commande du flux de l'eau produite, la structure à commander est schématisée sur la figure FigIII.3. Pour pouvoir agir sur le flux à la sortie de la membrane représenté par la vitesse v_4 (la vitesse étant l'image du flux), on manipule les vitesses de l'eau de mer et l'eau saumâtre v_2 et v_3 respectivement à partir de la commande des deux électrovannes e_{v1} et e_{v2} .

e_{v1} et e_{v2} étant des résistance des vannes qui représentent le pourcentage d'ouverture ou de fermeture de ces dernières.



figIII.6.Schéma de commande de l'osmose inverse

III.3.1.Modélisation du système :

III.3.1.1.Hypothèses sur le système :

Ce modèle est basé sur certaines suppositions qui sont les suivantes [23]:

- Le fluide est incompressible.
- La masse et le volume interne sont constants.
- Le phénomène de friction de peau (skin friction) à travers les pipes et de la membrane sont négligés devant les pertes hydrauliques dans les valves et à travers la membrane.

III.3.1.2.Modèle mathématique :

Le premier principe de ce modèle est basé sur la balance macroscopique de l'énergie cinétique. Et Les deux équations différentielles qui régissent le système sont données par III.7 [23] :

$$\begin{cases} \dot{v}_2 = \frac{1}{\rho V} \left(\frac{W_p}{v_1(v_2, v_3)} - \frac{1}{2} e_{v_1} v_2 \right) \\ \dot{v}_3 = \frac{1}{\rho V} \left(\frac{W_p}{v_1(v_2, v_3)} - \frac{1}{2} e_{v_1} v_3 \right) \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} v_1 = -\frac{1}{2}b + \frac{1}{2}\sqrt{b^2 + 4c} \\ b = -(v_2 + v_3 - \frac{A_m K_m \Delta \pi}{\rho A_p}) \\ c = \frac{A_m K_m W_p}{\rho A_p^2} \\ P = \frac{W_p}{v_1 A_p} \\ v_4 = \frac{A_m K_m}{\rho A_p} (P - \Delta \pi) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Tel que :

v_1 : La vitesse de l'eau de l'alimentation.

v_2 : La vitesse de l'eau de mer.

v_3 : La vitesse de l'eau de saumâtre.

v_4 : La vitesse de l'eau de produite.

Le système de l'équation III.7 peut être réarrangé pour s'écrire sous la forme III.9 :

$$\dot{x} = f(x(t)) + g(x(t)) u \quad (\text{III.9})$$

En posant $x_1 = v_2 - v_{2s}$ et $x_2 = v_3 - v_{3s}$ nous aurons le système sous forme d'état III.10 :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{\rho V} \frac{W_p}{v_1(x_1, x_2)} - \frac{1}{2\rho V} (x_1 + v_{2s}) e_{v_1} \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{\rho V} \frac{W_p}{v_1(x_1, x_2)} - \frac{1}{2\rho V} (x_2 + v_{3s}) e_{v_2} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Tel que :

$$b = -(x_1 + x_2 + v_{2s} + v_{3s} - \frac{A_m K_m \Delta \pi}{\rho A_p}) \quad (\text{III.11})$$

Le vecteur d'état est :

$$x = [x_1 \ x_2]^T$$

Le vecteur de commande est :

$$u = [e_{v_1} \ e_{v_2}]^T$$

Le tableau III.1 montre les valeurs des paramètres du système.

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
P	1000 kg/m ³	K_m	9.218*10 ⁻⁹ s/m
V	10 L	Δπ	1378800 Pascal
A_m	5 m ²	v_{2s}	1.0547 m/s
A_p	0.00016129 m ²	v_{3s}	0.4625 m/s

TabIII.1.Paramètres du système.

III.3.1.3. Calcul du linéarisé :

L'application des commandes décentralisées nécessitent le calcul du linéarisé autour du point de fonctionnement du système.

Notre système étant sous forme $\dot{x} = f(x(t)) + g(x(t)) u$.

Tel que

$$f(x(t)) = \begin{bmatrix} \frac{\beta}{\frac{1}{2}(\alpha+x_1+x_2) + \frac{1}{2}(\sqrt{(x_1+x_2+\alpha)^2+4c}})} \\ \frac{\beta}{\frac{1}{2}(\alpha+x_1+x_2) + \frac{1}{2}(\sqrt{(x_1+x_2+\alpha)^2+4c}})} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

$$g(x(t)) = \begin{bmatrix} -\gamma(x_1 + v_{2s}) \\ -\gamma(x_2 + v_{3s}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Tel que :

$$\beta = \frac{W_p}{\rho V}, \quad \alpha = v_{2s} + v_{3s} - \frac{A_m K_m \Delta \pi}{\rho A_p}, \quad \gamma = \frac{1}{2\rho V}.$$

Le linéarisé de ce système est donné par la MFT suivante :

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-0.03546s - 0.7374}{s^2 + 35.09s + 210.9} & \frac{0.2149}{s^2 + 35.09s + 210.9} \\ \frac{0.3296}{s^2 + 35.09s + 210.9} & \frac{-0.02313s - 0.3306}{s^2 + 35.09s + 210.9} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{v1} \\ e_{v2} \end{pmatrix} \quad (\text{III.14})$$

III.4. Choix des parités commandes/sorties :

Etant donné que notre système est multivariables à deux entrées et deux sorties, et pour pouvoir déterminer la commande décentralisée qui revient à calculer un régulateur monovariante, BRISTOL propose de calculer la matrice des gains relatifs afin de déterminer quelle sortie soit commandée par quelle commande (choix des parités (x_i, e_{v_i})).

La matrice des gains relatifs est définie comme suit :

$$\Omega(s) = \begin{bmatrix} \lambda(s) & 1 - \lambda(s) \\ 1 - \lambda(s) & \lambda(s) \end{bmatrix}; \quad \text{tel que } \lambda(s) = \frac{G_{11}(s)G_{22}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{12}(s)G_{21}(s)}$$

Le calcul de cette matrice a donné le résultat suivant :

$$\Omega = \begin{pmatrix} 1.4 & -0.4 \\ -0.4 & 1.4 \end{pmatrix} \quad (\text{III.15})$$

D'après cette matrice, il vaut mieux commander la sortie x_1 par e_{v1} et commander la sortie x_2 par e_{v2} .

III.5.Application d'une commande robuste :

La commande robuste est un type de commande qui vise à garantir les performances et la stabilité d'un système face à des perturbations du milieu et les incertitudes du modèle. En effet, le modèle mathématique qui modélise un système réel est une représentation qui vise à approximer au mieux, avec des hypothèses simplificatrices, le système qu'on veut commander tel que (les dynamiques non modélisées, les non-linéarités négligées, variation des paramètres du système due à l'environnement tel que la température, le vieillissement...). Il existe donc un écart entre le comportement observé du système réel et son modèle nominal. La commande robuste vise à déterminer une loi de commande qui soit capable de garantir des critères de performance et stabilité pour un système dont le modèle varie autour du modèle théorique ou nominal. Par la même approche, on peut rendre le système robuste face aux perturbations extérieures. Il existe plusieurs commandes robustes, on citera :

- Commande par mode glissant.
- Commande adaptative.
- Commande LQG/LTR
- Commande par backstepping.
- Commande H_{∞} .

Le modèle mathématique de notre système RO est présenté avec des hypothèses simplificatrices, et il opère dans des conditions de pression, de température... en perpétuel changement, ce qui nous amène à appliquer une commande robuste qui fait face à ces divers problèmes.

III.5.1.Etat de l'art:

Dans ce qui suit, nous présenterons des généralités sur quelques commandes robustes afin de donner une idée générale sur les différentes approches dans le domaine.

III.5.1.1Commande par mode glissant (Sliding Mode Control, SMC):

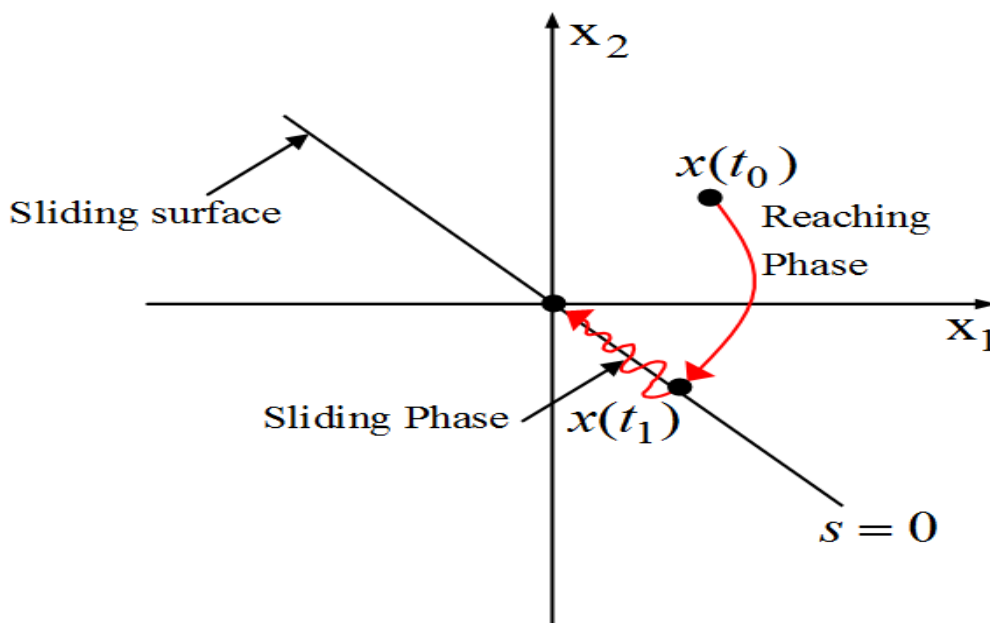
La commande par mode de glissement est l'une des techniques les plus utilisées dans la synthèse des régulateurs robustes pour une grande classe de systèmes non-linéaires, à retard et incertains. Elle reste, probablement, l'une des méthodes les plus réussies dans la robustesse vis-à-vis des incertitudes/bruits bornés et des dynamiques parasites [17].

Historiquement, le mode glissant a été découvert comme un mode spécial des systèmes à structure variables (Variable Structure Systems, VSS). Ces systèmes comprennent une variété de structures, avec des règles de commutation entre structures en temps réel pour obtenir les performances voulues, sinon utiliser une structure fixe pourrait être instable. Le résultat est VSS, qui peut être perçu comme combinaison de sous-systèmes où chaque sous-système a une structure de contrôle fixe et est valide pour une région spécifiée du fonctionnement du système. Il apparaît que le système en boucle fermée peut être conçu pour posséder de nouvelles propriétés qui ne sont pas présentes dans aucune des sous-structures isolés. De plus, dans un mode spécial nommé mode glissant, ces propriétés incluent l'insensibilité aux perturbations externes et aux incertitudes du modèle ainsi que la robustesse vis-à-vis des dynamiques parasites [17].

L'idée du SMC est basé sur l'introduction d'une fonction «custom-designed », nommée la variable glissante. Aussitôt qu'elle devienne nulle, elle définit une surface de glissement. Le design de la variable glissante implique de bonnes performances du système en boucle fermée tant que les trajectoires du système appartiennent à la surface de glissement. L'idée du SMC est de ramener la trajectoire du système à la surface de glissement choisie et la maintenir sur elle grâce aux lois de commandes, ainsi on exploite les avantages du mode glissant qui sont l'insensibilité aux perturbations externes et internes et la convergence en temps fini des variables glissantes à zéro [17]. La convergence des variables d'état vers la surface est soumise à condition d'attractivité et d'invariance suivante :

$$S\dot{S} < 0$$

, La figure suivante le montre:



figIII.7. Principe de commande par mode de glissement.

La commande par mode de glissement s'écrit comme suit :

Etant donné un système présenté sous la forme :

$$\dot{x} = f(x) + B(x)u(t)$$

$x(t), f(x) \in \mathbb{R}^n, u(t) \in \mathbb{R}^m, B(x) \in \mathbb{R}^{n \times m}$, alors :

$$u(t, x) = \begin{cases} u^+(t, x), & \text{si } S(x) > 0 \\ u^-(t, x), & \text{si } S(x) < 0 \end{cases}$$

Un des inconvénients de la commande par mode de glissement est la permutation à haute fréquence de l'action de commande qui produit un phénomène appelé chattering, qui est difficile à éviter ou à atténuer [17].

III.5.1.2. Commande LQG/LTR (Linear-Quadratic Gaussian with Loop Transfer Recovery):

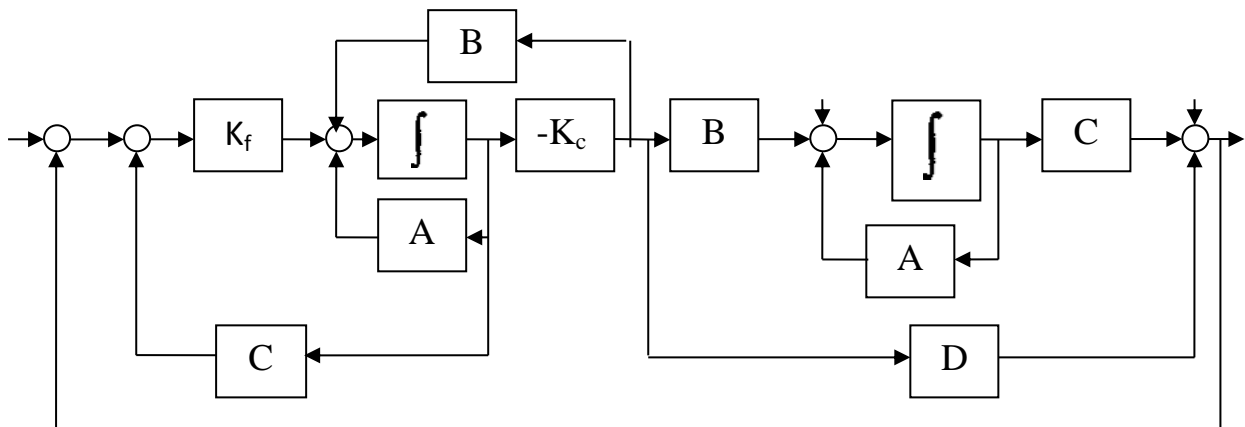
La commande (LQG/LTR) est une extension de la méthode bien connue Linear Quadratic Gaussian (LQG) pour la commande optimale des systèmes linéaires, multivariables avec des mesures et incertitudes du modèle. Quoique le filtre de Kalman et le régulateur state feedback dans le compensateur LQG sont individuellement garantis pour avoir de bonnes propriétés, la combinaison comme une commande LQG manque généralement de robustesse et peut donner arbitrairement de mauvaises marges de stabilité. Les modifications de la boucle de transfert (LTR) à la procédure de design LQG spécialement pose ce problème et tente d'améliorer les caractéristiques du compensateur pour que la robustesse en stabilité et les spécifications de performance employées dans la synthèse originale LQG soient complètement « récupérées » [18].

Dans le contexte LQG/LTR, sa représentation d'état est la suivante [19] :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + \xi \\ y = Cx + Du + \varepsilon \end{cases}$$

Où $\xi = \Gamma\Theta$ l'objet du bruit, où Γ est matrice réelle et Θ est un processus aléatoire de bruit ; ε : la mesure aléatoire du bruit ; Γ et Θ sont des bruits blancs stable et décorrés.

Le schéma de commande est donné par la figure suivante :



figIII.8. Schéma de commande de par LQG/LTR

III.5.1.3. Commande adaptative :

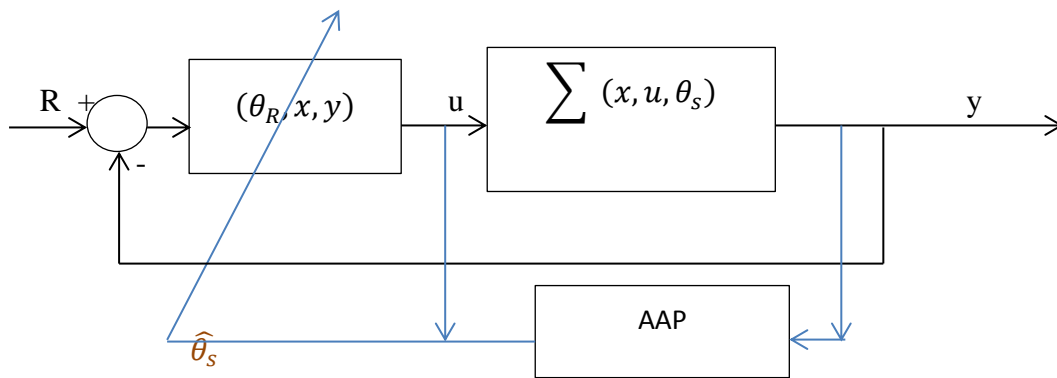
La commande adaptative est née dans les années 50 de l'insuffisance des commandes classiques [19]. La commande adaptative est un ensemble de techniques utilisées pour l'ajustement automatique en temps réel des régulateurs des boucles de commande dans le but de réaliser un certain niveau de performances quand les paramètres du procédé à commander soit inconnus soit/et variant dans le temps. Les techniques de commande adaptative ont été utilisées avec succès pour un grand nombre d'applications à savoir les réacteurs chimiques les colonnes à distiller, pilotage automatique des bateaux ...etc.[20]

Les deux approches de commande adaptative sont la commande adaptative directe et la commande adaptative indirecte.

III.5.1.3.1. Commande adaptative indirecte :

Dans un schéma de commande adaptative indirecte figIII.6 l'adaptation des paramètres se fait en deux étapes : estimation des paramètres du procédé puis calcul des paramètres du régulateur à partir des paramètres estimés.

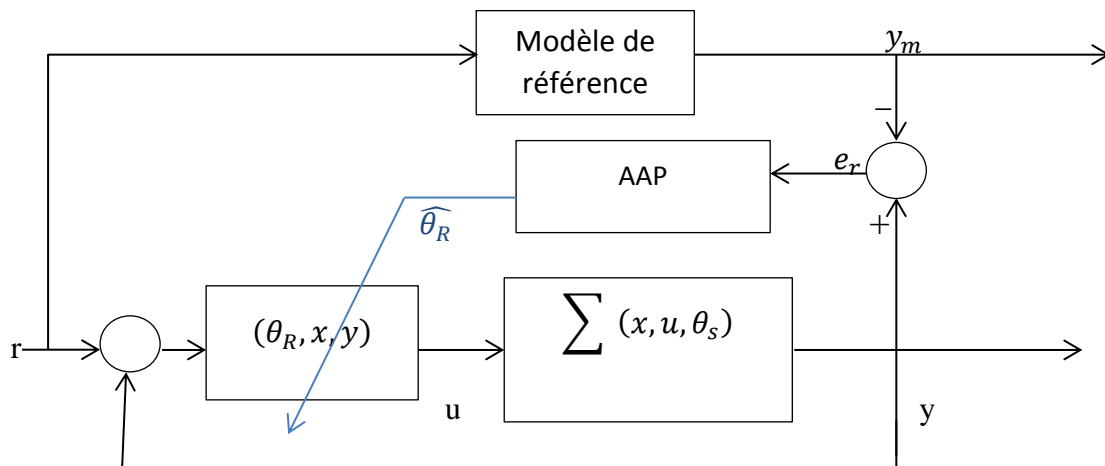
Etant donné un système bouclé $\Sigma(x, u, \theta_s)$, on calcul une commande u comme si les paramètres du système θ_s sont connus. Dans une deuxième étape on développe un algorithme d'adaptation paramétrique AAP qui est un observateur de paramètres pour retrouver $\hat{\theta}_s$ qui est l'estimé de θ_s . Et enfin on remplace dans la commande u θ_s par $\hat{\theta}_s$.



figIII.9. Schéma de la commande adaptative indirecte.

III.5.1.3.2. Commande adaptative directe :

La commande adaptative directe dont le schéma est donnée par FigIII.7 est une méthode adaptative pour laquelle l'algorithme AAP estime les paramètres du régulateur $\hat{\theta}_R$ mais pas les paramètres du système, ce AAP est calculé en général à partir de l'approche de Lyapunov.



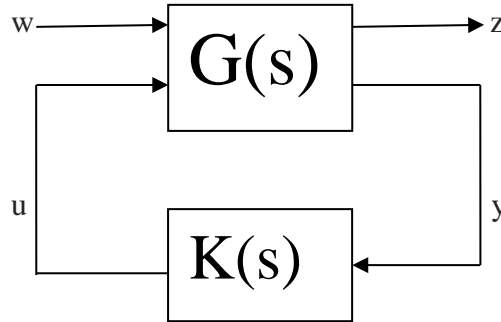
figIII.10. Schéma de la commande adaptative directe

On se donne un modèle de référence dont la sortie est y_m , le but est de rechercher que l'erreur de poursuite e_r tend asymptotiquement vers zéros.

III.5.2. Commande H_∞ :

III.5.2.1. Principe :

Le premier pas à faire dans une commande H_∞ est la mise du système sous forme standard. Cette configuration représentée ci-dessous est appelée en anglais « Lower Linear Fractional Transformation, LLTT » sur K [14].



figIII.11. Forme standard de la commande H_∞

Tel que :

w : perturbation, bruits de mesure, références...

u : l'entrée de commande.

z : quantificateur de performance.

y : signaux de mesure.

Ainsi le système s'écrit sous la forme suivante [14]:

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

De (III.16) on obtient :

$$z = [G_{11} + G_{12}K(I - G_{22}K)^{-1}G_{21}]w = T_{zw} w$$

Ainsi :

$$z = F_1 = (G, K)w = T_{zw} w \quad (\text{III.17})$$

A partir de l'équation III.17 on peut dire que, le problème d'optimisation H_∞ standard est de trouver un régulateur stabilisant K qui minimise la norme infinie de T_{zw} .

La formule mathématique qui le traduit est :

$$\min_{K \in H_\infty} \|T_{zw}\|_\infty \quad ; \quad \min_{K \in H_\infty} \{ \sup_{Re > 0} \bar{\sigma} [T_{zw}(s)] \} \quad (\text{III.18})$$

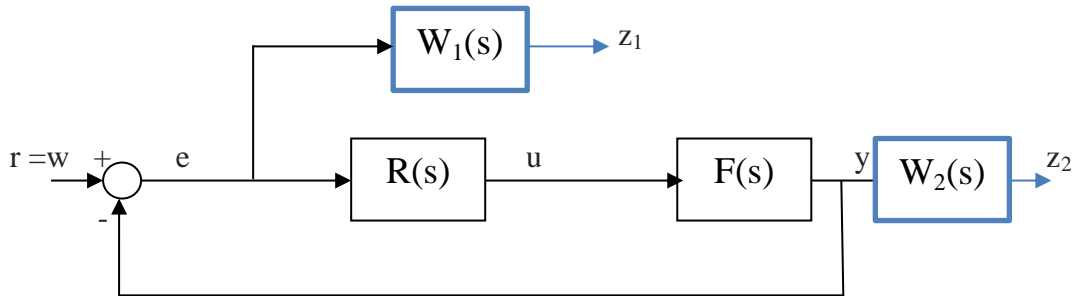
III.5.2.2. Problème à sensibilité mixte :

Généralement, T_{zw} est une combinaison d'objectifs de commande désirée de la boucle fermée qui doivent être optimisés sur une bande de fréquence spécifiée. Les deux mesures de performance utilisées sont la sensibilité (S) et la sensibilité complémentaire (T) [14]. Donc le problème H_∞ précédent est exprimé comme suit :

$$\|T_{zw}\|_\infty = \left\| \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 T \end{bmatrix} \right\|_\infty < \gamma. \quad (\text{III.19})$$

W_1 et W_2 sont des pondérations dépendantes de la fréquence qui représente les spécifications désirées pour la synthèse.

$\gamma > 0$ est le coefficient coût.



figIII.12.mise sous forme standard

Ce qui nous permet d'obtenir le système augmenté suivant :

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 & -W_1 F \\ 0 & W_2 F \\ I & -F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w = r \\ u \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

III.5.2.3. Choix des pondérations :

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la valeur des pondérations W_1 et W_2 , on choisit celle proposée dans [15] :

$$W_1(s) = \frac{s + \omega_0}{s + \omega_0 A} \quad \text{et qui a la forme d'état suivante } W_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}$$

$$W_2(s) = \frac{s + \frac{\omega_0}{M}}{As + \omega_0} \quad \text{et qui a la forme d'état suivante } W_2 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}$$

Tel que :

ω_0 : la bande passante désirée.

M : le pic de la sensibilité.

A : le maximum de l'offset toléré.

W_1 : est choisie de sorte à ce qu'elle soit un filtre passe-bas, ce qui va forcer la sensibilité S à basses fréquences à rejeter les perturbations et de réduire l'erreur de poursuite [14].

W_2 : est choisie de sorte à ce qu'elle soit un filtre passe-haut, ce qui va forcer la sensibilité complémentaire T à hautes fréquences à minimiser l'effet déstabilisant des bruits de mesure et des erreurs de modélisation multiplicatives [14].

III.5.2.4. Résolution des équations de RICCATI :

Beaucoup d'algorithmes ont été utilisé pour résoudre le problème de commande H_∞ standard, mais le plus utilisé c'est la méthode de Glover-Doyle (G-D) (1988) pour ça simplicité puisqu'il ne requiert que la résolution des deux équations de RICCATI pour obtenir le régulateur optimal K [14]. Ainsi on donne la forme d'état du système augmenté III.21 comme suit :

$$G = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (III.21)$$

Ce qui donne les équations de RICCATI suivantes [14] :

$$\begin{cases} A^T X_\infty + X_\infty A + C_1^T C_1 + X_\infty (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty = 0 \\ Y_\infty A^T + A Y_\infty + B_1 B_1^T + Y_\infty (\gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2) X_\infty = 0 \end{cases} \quad (III.22)$$

Le régulateur K existe si et seulement si la solution unique stabilisante des deux équations de RICCATI sont définies positive et le produit des deux solutions est inférieur au rayon spectral ($\lambda_{\max}(X_\infty Y_\infty)$) [16].

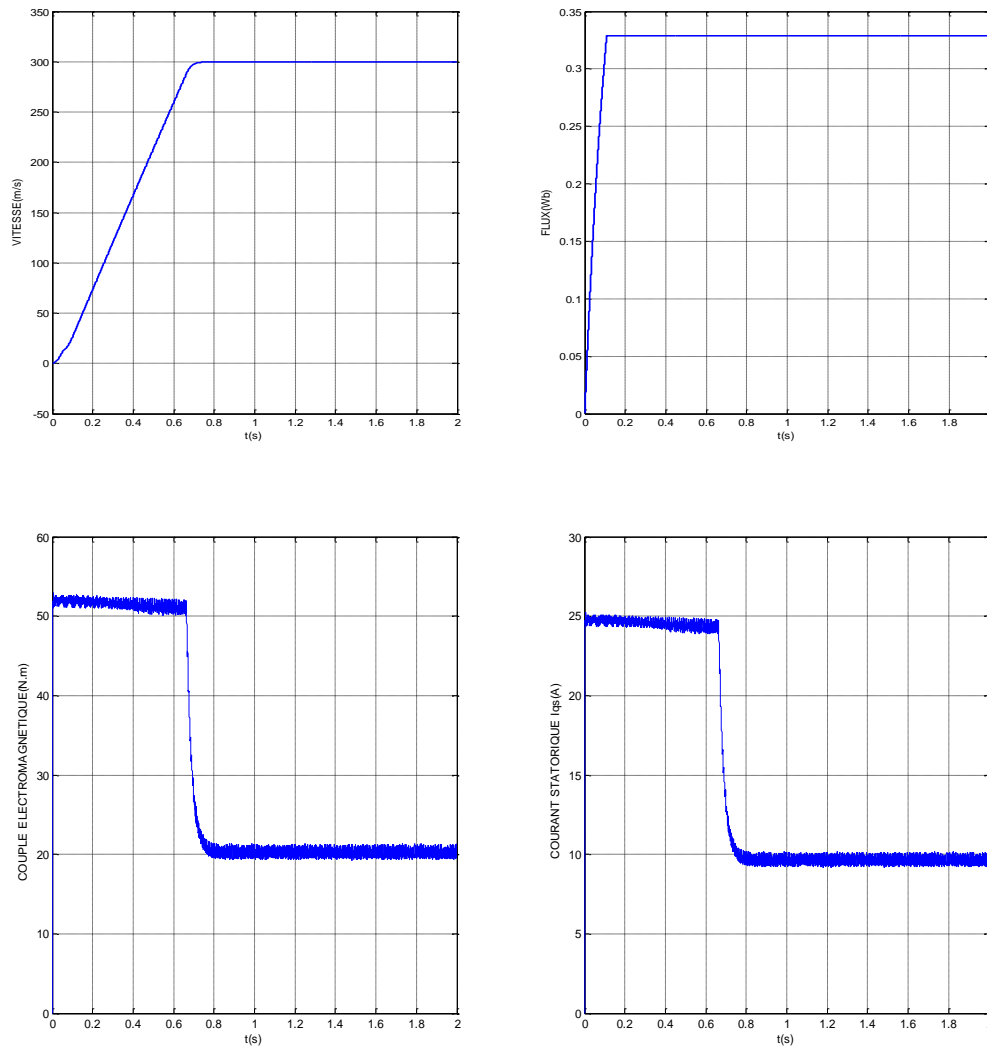
Ainsi les paramètres du régulateur s'il existe sont donné par :

$$\begin{cases} A_R = A + (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty - (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1} Y_\infty C_2^T C_2 \\ B_R = (I - \gamma^{-2} B_1 B_1^T)^{-1} Y_\infty C_2^T \\ C_R = B_2^T X_\infty \end{cases} \quad (III.23)$$

III.6. Simulations et analyses :

III.6.1. Résultats de simulation de la machine asynchrone :

La simulation de la machine asynchrone en présence d'un couple de charge de 20 N.m a donné les résultats suivant :



figIII.13.Résultats de simulation de la machine asynchrone avec un couple de charge de 20 N.m

L'objectif de la commande est atteint vu que nous avons pu garder la vitesse de la machine entraînant la pompe à sa vitesse de fonctionnement qui est de 300 rad/s, et cela en présence du couple due à la charge hydraulique qui est de 20 N.m.

III.6.2.Résultats de simulation de la commande du flux de l'eau produite :

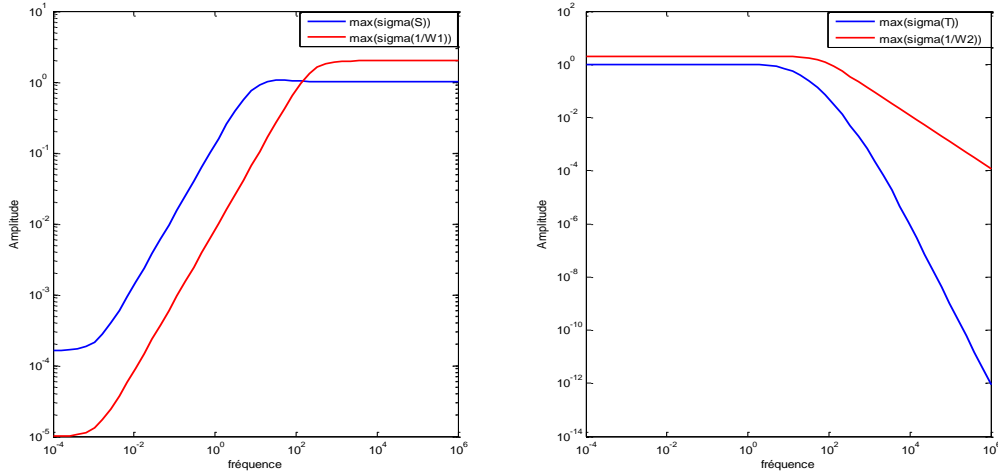
La commande H_∞ utilisée pour ajuster le flux de l'eau produite est calculée de manière décentralisée dans les soucis de respecter les deux critères de la sensibilité et la sensibilité complémentaire pour les deux fonctions G_{11} et G_{22} tel que :

$$\|S\|_\infty < \frac{1}{W_1} \quad \text{Et} \quad \|T\|_\infty < \frac{1}{W_2} \quad (\text{III.24})$$

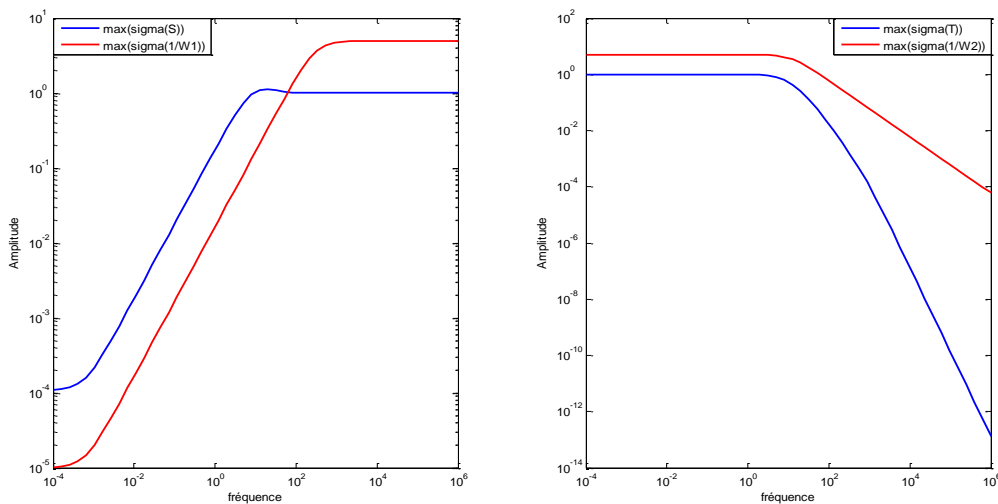
III.6.2.1.Performances :

Les performances d'un système qui consistent dans le rejet de perturbation à basses fréquences et la réduction de l'erreur de poursuite sont assurées par la sensibilité S et la fonction de sensibilité complémentaire T respectivement.

Les résultats obtenus sur ces deux fonctions sont représentés sur les figures ci-dessous.



figIII.14.la valeur singulière de la fonction de sensibilité S et 1/W1 et la sensibilité complémentaire T et 1/W2 pour le système G11

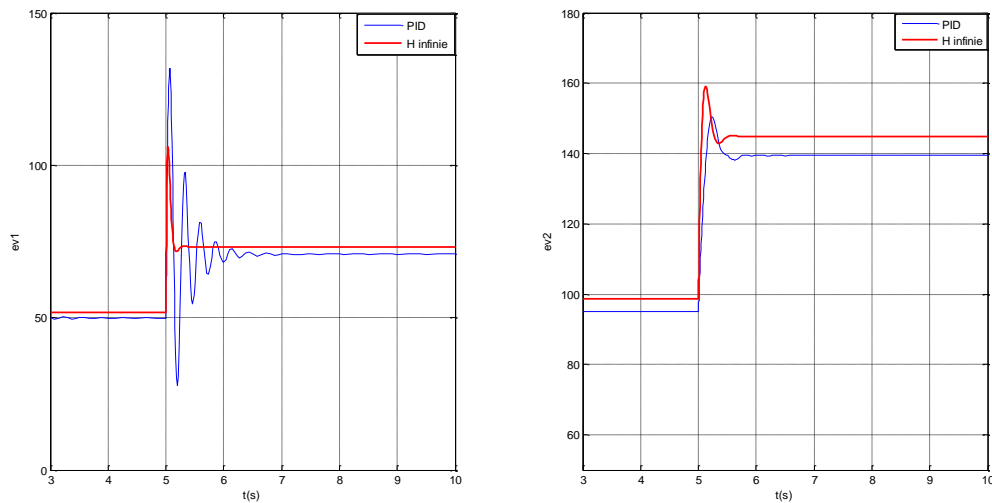


figIII.15.les valeurs singulières de la fonction de sensibilité S et 1/W1 et de la sensibilité complémentaire T et 1/W2 pour le système G22.

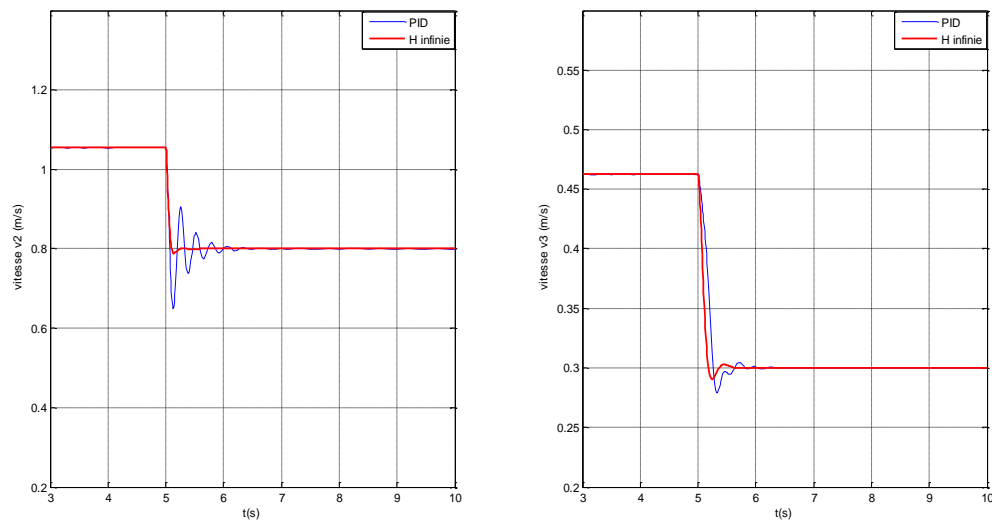
Comme le montre les figures, les fonctions de pondérations W_1 et W_2 ajustent la fonction de sensibilité S et la fonction de sensibilité complémentaire T respectivement pour permettre au système bouclé d'obtenir les performances exigées. Pour les deux systèmes G_{11} et G_{22} la plus grande valeur singulière de S et de T sont inférieures aux plus grandes valeurs singulières des deux pondérations comme définit dans III.24.

III.6.2.2. Résultats de simulation par la commande H_∞ et comparaison avec la commande PID :

Nous réalisons un changement de consigne de la valeur 1.0547 m/s à 0.8m/s pour la vitesse v2 et un changement de 0.462 m/s à 0.3 m/s pour la vitesse v3, le système simulé avec les deux commandes H_∞ et le PID est montré dans les figures.



figIII.16. variations de la commande ev1 et ev2.



figIII.17. Réponse des deux vitesses v2 et v3.

Les résultats obtenus montrent les bonnes réponses de la commande H_∞ tel que les références sont parfaitement atteintes avec une erreur statique nulle et un bon temps de réponse, par contre la commande PI présente des oscillations remarquables et réagit mal au

non linéarités du système lors du changement de la consigne pour la réponse de la vitesse v_2 , avec une erreur statique.

La commande ev_1 calculé par le PID présente de forte oscillation lors du changement de la consigne ce qui peut être nuisible à la vanne de régulation et pourrait l'endommager.

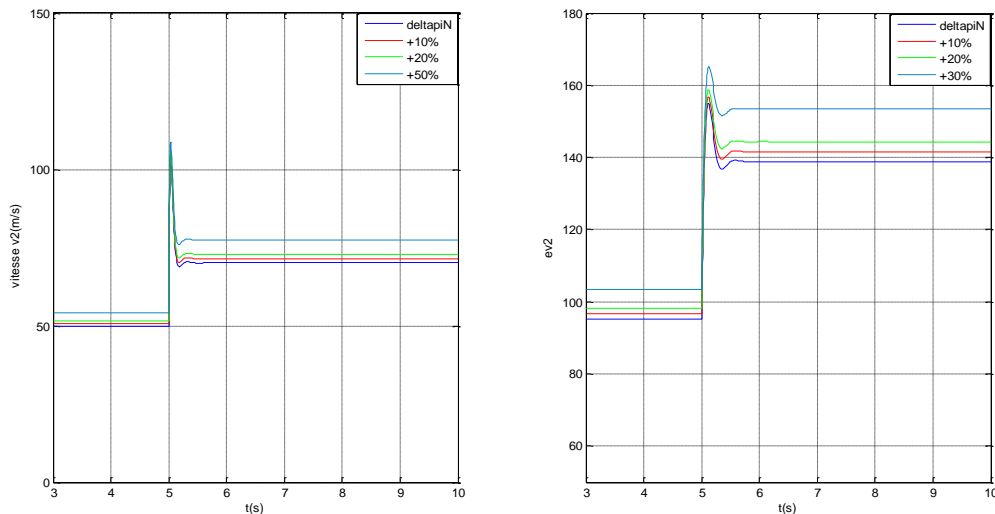
III.6.2.3. Evaluation de la Robustesse de la commande H_∞ :

III.6.2.3.1 Robustesse vis-à-vis des changements paramétriques :

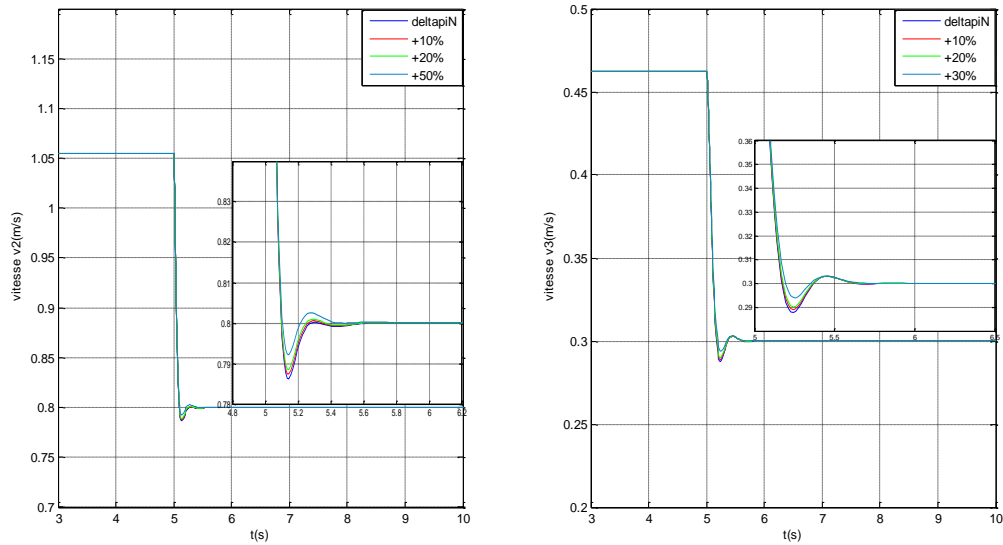
Le problème le plus fréquent dans le système de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse est l'encrassement des sels sur la surface des membranes et le colmatage de cette dernière, ce qui a comme conséquence l'augmentation de la pression osmotique et la perte des performances de la membrane vis-à-vis de sa perméabilité. Dans ce qui suit nous allons changer les paramètres $\Delta\pi$ et K_m qui sont la pression osmotique et le coefficient de perméabilité liés à la membrane pour pouvoir tester les performances de la commande H_∞ utilisée.

III.6.2.3.1.1. Changement de la pression osmotique :

Nous introduisons des changements sur la valeur du paramètre $\Delta\pi$ qui caractérise la pression osmotique du système RO, les résultats de simulations sont montrés sur la figure.



figIII.18.les commande ev_1 et ev_2 suite au changement de $\Delta\pi$.

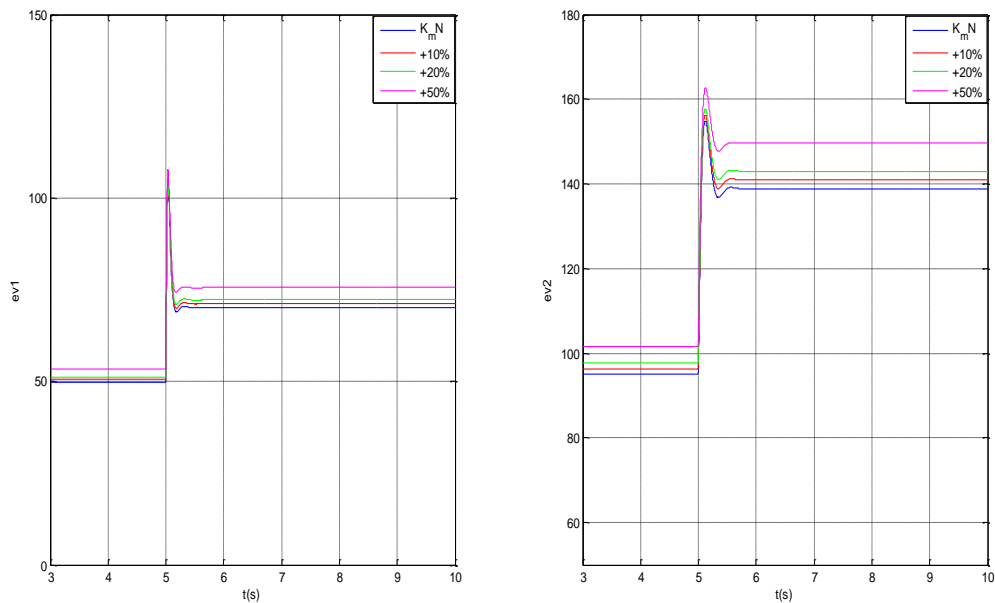


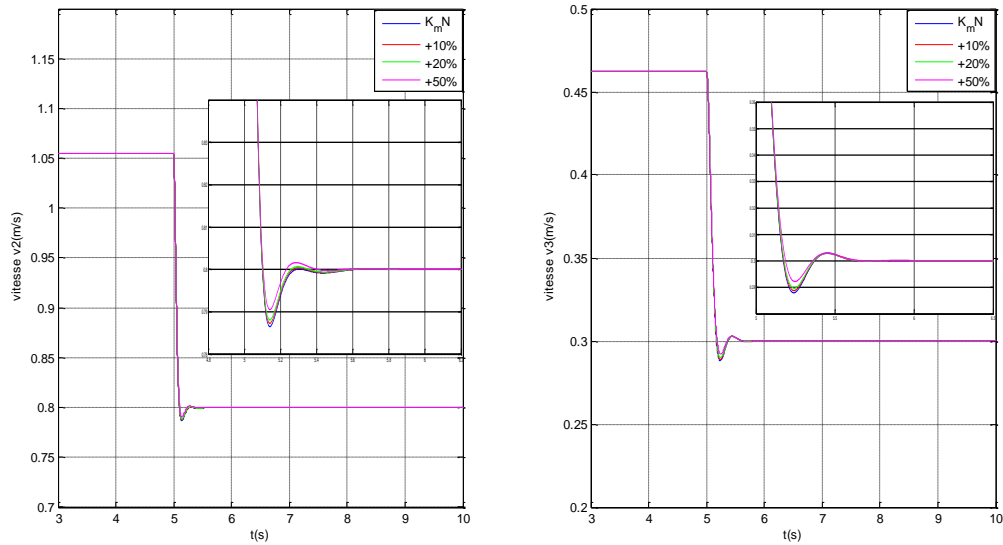
figIII.19.les réponse des deux vitesses v_2 et v_3 suite au changement du paramètre $\Delta\pi$.

Comme le montre les figures, les vitesses v_2 et v_3 suivent parfaitement les consignes désirées, la variation paramétrique de la pression osmotique a cependant introduit un retard très faible pour atteindre l'état statique qui reste toujours dans l'intervalle d'un bon temps de réponse.

III.6.2.3.1.2.changement du coefficient de transfert de masse de la membrane :

Nous faisons subir des changements paramétriques de 10%,30%,50% sur le coefficient de transfert de masse (coefficient de perméabilité), les résultats sont donnés sur les figures



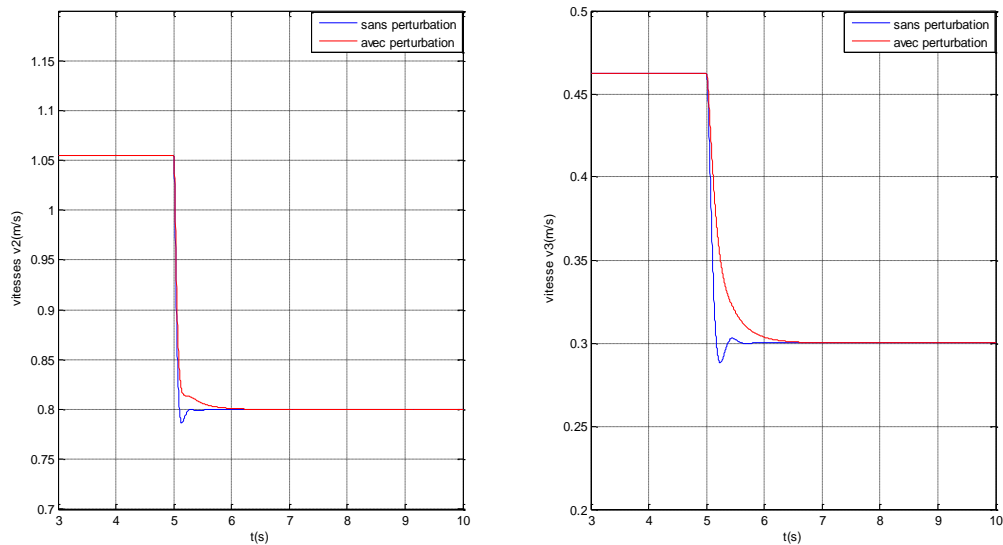


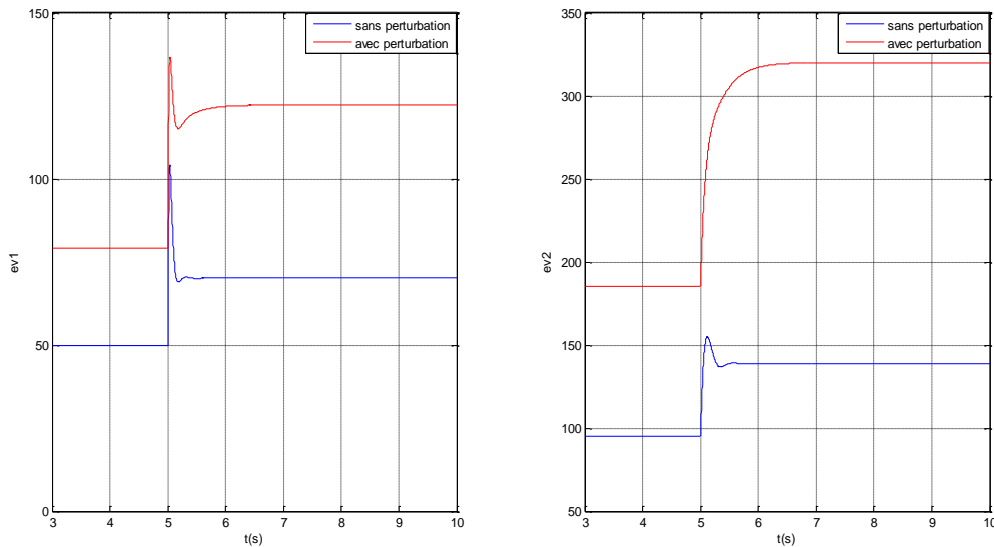
figIII.20. Commande ev_1 , ev_2 et les vitesses v_2 et v_3 suite au changement du paramètre K_m

Malgré le changement du paramètre de perméabilité de la membrane introduit, les figures montrent que le système bouclé suit parfaitement la référence avec un changement négligeable dans le temps de stabilisation, ce qui montre la robustesse de la commande utilisée.

III.6.2.3.2. Robustesse vis-à-vis des perturbations :

Pour évaluer la robustesse de la commande vis-à-vis des perturbations, nous avons introduit sur la mesure et sur la commande un signal de perturbation d'une amplitude de 0.1 (qui peut être vu comme un défaut du capteur), les résultats sont montrés dans les figures suivantes ;





figIII.21. Réponse de ev_1 , ev_2 et de v_2 , v_3 en présence des perturbations.

Il est clair d'après les figures que la consigne est parfaitement suivie malgré la présence de perturbation, néanmoins le temps pour atteindre la valeur désirée est augmenté de 0.8 seconde pour la vitesse v_2 et de 0.5 seconde jusqu'à 1.5 seconde pour la vitesse v_3 , ce qui reste toujours un bon temps de réponse.

Les commandes à leurs tours ont augmentés pour compenser l'effet de la perturbation sur la mesure de la vitesse à la sortie, cependant leurs valeurs restent toujours dans la limite tolérée.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons utilisé une commande robuste, la commande H_∞ , sur un système d'osmose inverse RO non linéaire avec une structure de commande différente de la première vue dans le chapitre II. La commande a été calculée d'une manière décentralisée sur la base du système linéarisé autour de l'origine, où nous avons minimisé la norme infinie des deux fonctions, la sensibilité et la sensibilité complémentaire, afin d'imposer les performances désirées pour le système non linéaire. Cette commande a prouvé sa robustesse vue les bonnes réponses qu'elle a données en présence des changements paramétriques qu'on lui a fait subir à savoir le changement de la pression osmotique et le coefficient de transfert de masse.

Une commande par PID a été aussi calculée dans le but de comparer les résultats qui sont apparus beaucoup plus performant dans la commande H_∞ .

Conclusion générale

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 de mer par d'osmose inverse afin de produire une eau potable.

Dans un premier temps, nous avons travaillé sur un système identifié par Al Atiqi et al. Où on effectue la régulation du flux pour un fonctionnement optimal de l'unité de dessalement et la régulation de la conductivité pour avoir une bonne qualité d'eau. Nous avons appliqué différentes commandes afin d'apporter des améliorations aux différentes grandeurs et on a comparé nos résultats avec ceux déjà obtenus dans la littérature à savoir [24] qui a trouvé le meilleur résultat concernant la conductivité en utilisant la commande MPC. La commande RST qu'on a synthétisé s'avère plus performante que cette dernière vu qu'elle n'a présenté aucun changement dans la conductivité de l'eau ce qui constitue un apport aux travaux déjà effectués.

Dans un second temps, on a travaillé sur une autre structure du système d'osmose inverse pour palier au problème du dépassement des valeurs du pH qui sortent des limites de linéarité. La régulation effectuée consiste à réguler la vitesse de la machine entraînant la pompe et à garder la valeur du flux dans la plage donnée par le constructeur. Vu que notre système est soumis à des perturbations et des changements paramétriques permanents dus au colmatage, tartrage et à l'encrassement alors on a choisi d'appliquer une commande robuste H_{∞} qui a donné des résultats satisfaisant aux exigences déjà citées.

Dans des travaux futurs on pourra envisager :

- L'utilisation d'une troisième vanne de régulation pour une commande tolérante aux défauts qui sert de vanne de secours dans le cas d'un blocage éventuel des deux autres vannes vu que c'est un problème récurrent en industrie.
- L'utilisation d'une source d'énergie renouvelable pour l'alimentation du système tel que les panneaux photovoltaïques, les éoliennes ou les systèmes hybrides.

Références Bibliographiques

- [1] <http://www.un.org/events/water/images/WaterYearGraph.jpg>
- [2] Mehdi METAICHE. *Optimisation Des Systèmes De Dessalement Par Osmose Inverse : Conception, Paramètres De Fonctionnement Et Simulation Numérique*. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique. (2006)
- [3] Andrea Cipollina, Giorgio Micale and Lucio Rizzuti. *Green Energy and Technology, Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes*. Edition Springer, (2009).
- [4] H.T. El-Dessouky and H.M. Ettouney. *Fundamentals of Salt Water Desalination*. Edition ELSEVIER, (2002).
- [5] Isabel C. Escobar and Andrea I. Schäfer. *Sustainability Science and Engineering: Water Recycling versus Desalination*. Edition ELSEVIER, (2002)
- [6] Mohamed Khayet and Takeshi Matsuura. *Membrane distillation Principales and applications* : Edition ELSEVIER.
- [7] K.Billal. *Modélisation et commande d'un système solaire thermique-dessalement eau de mer* :Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, juin 2013.
- [8] A.Abderrahim. *Model predictive control of a reverse osmosis desalination unit*. Desalination 194 (2006) 268-280.
- [9] Imad Alatiqi*, Hisham Ettouney, Hisham El-Dessouky. *Process control in water desalination industry: an overview*. Desalination 126 (1999) 15-32.
- [10] M.W. Robertson 1, J.C. Watters 1. P.B. Desphande 1, J.Z. Assef 1, and I.M. Alatiqi 2. *Model based control for reverse osmosis desalination processes*. Desalination 104 (1996) 59-68. ELSEVIER.
- [11] Alex R. Bartman, Aihua Zhu, Panagiotis D. Christofides and Yoram Cohen. *Minimizing energy consumption in reverse osmosis membrane desalination using optimization-based control* . 2010 American control conference.
- [12] I.M. Alatiqi, A.H. Ghabris, and S. Ebrahim, "Measurement and control in reverse osmosis desalination" Desalination 75, 119-140, (1989).
- [13] Farid TATA-DUCRU. *Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes*. Agence Française de Développement, Paristech (2009).
- [14] Amin S. Meghani. Haniph A. Latchman. *H_∞ vs. Classical Methods In The Design Of Feedback Control Systems*. Department of Electrical Engineering, University of Florida, Gainesville. January 16. 1992
- [15] Frank Allgöwer. *H_∞ -control in Matlab*. Universität Stuttgart Institut für Systemtheorie und regelungstechnik.
- [16] John C. DOYLE, Keith GLOVER, Pramod P.KHARGONEKAR. *State-Space Solutions to Standard H_2 and H_∞ Control Problems*. IEEE Transaction on automatic control, VOL. 34, NO. 8, August 1989.
- [17] Yuri Shtessel, Christopher Edwards, Leonid Fridman, Arie Levant. *Sliding Mode Control and Observation*. Birkhäuser 2010.
- [18] J.R. Whiteley, E.A. Misawa, C. Zhou, and K.A.M. Gasem. *Process Control Using Uniform Singular Value LQGLTR*. IEEE . June 1995.
- [19] Jean batiste POMET, these de doctorat.
- [20] « commande adaptative aspect pratique et théorique ». I.D.LANDAU et L.DUGARD

- [21] M.Khanchoul, M.Hilaret “ *Design and comparison of different RST controllers for PMSM control*”
- [22] *Commande des systèmes, performance et robustesse, régulateurs monovariables et multivariables,application.* Henri BOURLES.
- [23] Charles W.McFall, Panagiotis D. Christofides, Yoram Cohen, and James F. Davis. “*Fault tolerant control of a reverse osmosis desalination process*”.University of California, Los Angeles (2007).
- [24]Aderrahim.Abbas. « *model predictive control of a reverse osmosis desalination unit* »Desalination 194(2006)268-280
- [25] cours de H.CHKIREB. Ecole Nationale Polytechnique
- [26]cours de M.MAHMOUDI. Ecole Nationale Polytechnique
- [27] L.BAGHLI, « *Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques.* » Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy, 14 janvier 1999.
- [28] H.TAMRABET, «*Robustesse d’un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d’une Machine Asynchrone.* » Thèse de magister, université de Batna 2006.
- [29]http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1996/smalley-bio.html.
- [30] www2.ademe.fr/servlet/getBin?name...pdf (2006). *Les techniques membranaires à gradients de pression* ADEME/DABEE/Département Industrie et Agriculture.