

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DELA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département automatique



*Projet de fin d'études*

*Pour l'obtention du diplôme  
De Master en Automatique*

**THÈME**

**Modélisation et commande d'un système solaire  
thermique-dessalement eau de mer**

*Proposé et dirigé par :*

*Pr. M.Tadjine*

*Pr.M.S.Boucherit*

*Etudié par :*

*Khouchi Billal*

*Soutenu le 25 juin 2013 devant un jury composé de :*

*Dr B. Hemici.....Président*

*Mr M. Chakir..... Examineur*

*Pr. M.Tadjine .....Rapporteur*

*Pr. M.S.Boucherit.....Rapporteur*

*Juin 2013*

# Remerciements

---

*Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein du laboratoire de Commande des Processus de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, sous la direction de Monsieur M.Tadjine, et de Monsieur M.S.Bouchrit, professeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique.*

*Mes remerciements vont tout d'abord à Monsieur M.S.Bouchrit et à Monsieur M.Tadjine pour la confiance qu'ils m'ont faite. Leurs conseils précieux, leur compréhension, leurs encouragements et leur disponibilité m'ont beaucoup aidé.*

*Un grand merci à Monsieur F.Boudjema, chef du Département automatique. Je remercie tous les professeurs du département automatique ainsi que tous mes professeurs, depuis l'enseignement fondamental jusqu'à l'enseignement supérieur.*

# Dédicaces

---

*Je dédie ce travail à mes chers parents, mes sœurs, ma famille, et tous mes amis...*

---

# ملخص-Abstract-Résumé

---

## Résumé

A la raréfaction annoncée de l'énergie fossile et des sources d'eau potable s'ajoute désormais le constat d'état d'urgence écologique. Cette étude a pour objectif de répondre à un besoin industriel spécifique : celui de répondre à la demande croissante en électricité et en eau potable dans notre pays. Ce travail porte tout d'abord sur la simulation et la commande d'un système solaire thermique dans le but principal est la production d'électricité à grande échelle; puis une simulation d'un nouveau procédé de dessalement membranaire a été faite. Ensuite un solution pour réunir les deux procédés en un seul a été proposée et simulée. Enfin au terme de cette étude nous avons eu l'idée de faire une étude économique afin d'évaluer le potentiel algérien pour accueillir ces technologies.

**Mots clés :** solaire thermique, commande prédictive, dessalement eau de mer, collecteurs cylindro paraboliques.

## Abstract

At the announced shortage of fossil energy sources is now crucially added the observed state of ecological emergency. This study aims to meet a specific industrial need that meet the growing demand for electricity and pure water in our country. This work focuses first on the simulation and control of a solar thermal system which the main goal is the production of electricity on a large scale. Then a simulation of a new process of desalination membrane was made. Then a solution to combine the two processes into one has been proposed and simulated. Finally at the end of this study we had the idea to do an economic study to assess the potential of Algeria to accommodate those two technologies.

**Key words:** solar thermal, predictive control, water desalination, parabolic troughs.

## ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تلبية حاجة صناعية محددة تلبى الطلب المتزايد على الكهرباء والمياه الصالحة للشرب في بلادنا. هذا العمل يركز أولاً على المحاكاة و السيطرة على نظام الطاقة الشمسية الحرارية التي هدفها الرئيسي هو إنتاج الكهرباء على نطاق واسع. بعد ذلك تم إجراء محاكاة لعملية جديدة لتحلية المياه. ثم تم اقتراح حل على الجمع بين العمليتين. وأخيراً في نهاية هذه الدراسة كان لدينا فكرة القيام بدراسة اقتصادية لتقييم إمكانات الجزائر لاستيعاب هذه التقنيات

**كلمات البحث:** التحكم التنبؤي، الطاقة الشمسية الحرارية، تحلية المياه، تجميع الطاقة الشمسية.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Centrale solaire thermique – dessalement membranaire</b>	
I.1. Descriptif d'une centrale solaire thermique-dessalement membranaire par contact directe (DCMD).....	2
I.2. Modélisation des éléments de la centrale .....	5
I.2.1. L'échangeur de chaleur.....	5
I.2.2. capteur de température.....	7
I.2.3. Capteur de débit.....	7
I.2.4. Pompes.....	7
I.3. Modélisation de l'irradiation solaire.....	8
I.4. Simulation de la centrale.....	10
<b>Chapitre II : Etude économique et écologique</b>	
II. 1 Définition des éléments de calculs économiques.....	13
II. 1.1 Les investissements.....	13
II. 1.2 Les charges fixes.....	13
II. 1.3 Les charges variables.....	13
II. 1.4 Le temps de remboursement.....	14
II. 2 Evaluations des couts de productions de l'énergie électrique .....	14
II.3 Cout environnemental.....	16
II.4 Evaluation du potentiel de développement des collecteurs cylindro-paraboliques en Algérie.....	16
II. 4.1 Evaluation du potentiel solaire.....	16
II. 4.2 Evaluation potentiel territorial.....	17
II. 4.3 Evaluation du potentiel hydrique.....	17
II. 4.4 Evaluation du potentiel du réseau électrique.....	17
II. 5 Perspectives de développements en Algérie.....	18
II. 6 Evaluation du cout du dessalement de l'eau.....	19
II. 7 Comparaison du cout de la DCMD avec les techniques actuelles.....	20
II. 8 Evaluation du potentiel de développement du dessalement en Algérie.....	21

II. 8.1 Potentiel hydrique.....	21
II. 8.2 Historique et expérience algérienne.....	22
II. 9 Une solution durable: solaire thermique – dessalement de l’eau de mer.....	23
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>25</b>

---

# Liste des figures

---

## Chapitre I

Figure I.1. Diagramme schématique d'une centrale solaire thermique dessalement membranaire	4
Figure I.2. Schéma de l'échangeur utilisé.....	5
Figure I.3. Simulation en boucle fermée de l'échangeur utilisé.....	6
Figure I.4. Simulation de l'irradiation solaire.....	10
Figure I.5. La centrale complète sous Simulink.....	10
Figure I.6. Simulation de la centrale complète .....	11

## Chapitre II

Figure II.1. Levelized electricity cost .....	14
Figure II.2. LEC pour les différentes technologies en Californie.....	15
Figure II.3. LEC en fonction de la puissance installée.....	15
Figure II.4. Emissions de CO2 pour 6 technologies de production d'électricité.....	16
Figure II.5. Potentiel solaire dans le bassin méditerranéen .....	17
Figure II.6. Réseaux électrique en Algérien.....	18
Figure II.7. Comparaison des couts entre RO et DCMD.....	21
Figure II.8. Etendue de la cote Algérienne.....	22

---

# Liste des tableaux

---

## Chapitre I

Tableau I.1 Paramètres pour le calcul de la radiation	8
Tableau I.2. Données climatique et géographique de la région d'Ouergla	9

## Chapitre II

Tableau II.1. Les facteurs affectant les différents couts.	19
Table II.2. Historique des Installations de dessalement en Algérie.	23

# Nomenclature

<b>symboles</b>	<b>Descriptions</b>	<b>unités</b>
$t$	Temps	(s)
$x$	Espace	(m)
$\rho$	Densité	(Kg m <sup>3</sup> )
$C$	chaleur spécifique	(J/K kg)
$S$	Une section transversale	(m <sup>2</sup> )
$T(x, y)$	Température	(° C)
$q(t)$	Débit d'huile	(m <sup>3</sup> /s)
$I(t)$	Rayonnement solaire	(W /m <sup>2</sup> )
$Kopt$	efficacité optique	Sans unité
$G$	Collector ouverture	(m)
$Ta(t)$	Température ambiante	°C
$Hl$	coefficient global de perte thermique	(W /m <sup>2</sup> °C)
$Ht$	Coefficient de transmission thermique du métal liquide	(W /m <sup>2</sup> °C)
$L$	Longueur des tubes de canalisation	(m)
$Ck$	coefficient de la membrane sur la base du modèle de diffusion de Knudsen	(kg / (m <sup>2</sup> Pa s))
$Cm$	coefficient de membrane	(kg / (m <sup>2</sup> Pa s))
$Cp$	coefficient de la membrane en fonction du débit de Poiseuille modèle	(kg / (m <sup>2</sup> Pa s))
$Cp$	un la capacité thermique de la solution d'alimentation	chaud (J / (kg K))
$Cp, b$	la capacité thermique de la solution d'alimentation à froid	(J / (kg K))
$da$	hauteur du canal a	(m)
$db$	hauteur du canal b	(m)
$kfa$	conductivité thermique de la solution d'alimentation chaud	(J / (s m K))
$Kfb$	conductivité thermique de la solution d'alimentation à froid	(J / (s m K))
$Kg$	proportion de gaz conductivité thermique pore	(J / (m K s))
$Km$	conductivité thermique de la membrane poreuse	(J / (m K s))
$Ks$	conductivité thermique de la membrane solide	(J / (m K s))
$L$	longueur de canal	(m)
$Mw$	poids moléculaire de l'eau	(kg / mole)
$J$	La productivité de l'eau pure surfacique	(kg / m <sup>2</sup> s)
$Q$	le débit volumétrique de l'alimentation à la fois à chaud et à froid cours d'eau	(m / s)
$R$	Constante de gaz	(J / (mol K))
$r$	rayon de pores membrane	(m)
$Xa$	coordonnée transversale du canal a	(m)
$xb$	coordonnées transversales du canal B	(m)
$x$	Fraction molaire de NaCl dans une solution saline	Sans unité
$z$	coordonnée axiale le long de la direction de l'écoulement	(m)
$d_m$	épaisseur de membrane	(m)
$\varepsilon$	porosité de membrane	Sans unité
$\zeta$	rapport de polarisation de la température	Sans unité
$\rho$	une densité du fluide de la solution d'alimentation chaude	(kg/m <sup>3</sup> )
$\zeta$	Facteur de tortuosité de membrane	Sans unité
$Af$	Section du canal du collecteur	(m <sup>2</sup> )

$no$	Efficacité géométrique	Sans unité
$D$	Diamètre du collecteur	(m)
$\eta_V$	Viscosité gazeuse	(N s/m <sup>2</sup> )

# Introduction générale

---

La maîtrise de l'Energie est un des facteurs clés qui ont conduit le développement de l'humanité. Celle-ci deviendra dans un avenir proche un défi majeur non seulement pour le confort mais, aussi, pour la survie de l'homme. L'électricité et l'eau sont deux éléments indispensables dans la vie de tous, le problème étant que ces deux derniers deviennent - et de plus en plus - difficiles à produire. En effet, l'énergie fossile, qui reste la principale source de production d'électricité, risque de disparaître dans les années à venir, et les sources d'eau douce avec le réchauffement climatique se raréfient de jour en jour: il est donc impératif de trouver une alternative à ces deux moyens.

C'est dans ce contexte que l'on nous a confié le sujet intitulé : Modélisation et commande d'un système solaire thermique dessalement eau de mer. Dans le cadre de notre étude nous allons nous intéresser à un moyen de produire de l'électricité et de dessaler de l'eau à partir d'une énergie gratuite et inépuisable: le soleil.

Notre mémoire présente dans un premier temps, une comparaison entre les deux technologies basées sur l'énergie solaire : le solaire photovoltaïque et le solaire thermique, puis nous nous sommes focalisé sur la production d'électricité à partir de l'énergie solaire thermique. Nous avons modélisé un système solaire thermique basé sur des collecteurs cylindro paraboliques, puis nous avons appliqué à ce système une toute nouvelle commande prédictive appelée commande prédictive non linéaire et continue (non linear continuous Time generalized predictive control NCGPC). Cette commande n'ayant jamais été appliquée à ce type de systèmes constitue un apport à l'amélioration de ses performances.

Par la suite, nous nous sommes intéressés à un tout nouveau procédé de dessalement appelé dessalement par contact membranaire directe, nous avons proposé un modèle dynamique bidimensionnel pour simuler ce système ainsi qu'une solution pour optimiser la production d'eau douce. Les résultats obtenus, lors de cette étude, apportent une importante contribution à la modélisation de ce genre de systèmes ainsi qu'à l'étude de leurs performances.

Dans le chapitre qui a suivi, nous avons réuni les deux systèmes afin de produire dans la même centrale et à partir de l'énergie solaire thermique, de l'électricité et de l'eau douce. Ceci a été possible en introduisant un échangeur de chaleur que nous avons dimensionné, et commandé. L'idée de réunir les deux procédés dans une même centrale constitue en elle-même une nouvelle vision de ce que peuvent devenir les centrales électriques de demain.

Pour finir, nous avons mené une étude économique afin d'évaluer le potentiel de notre pays à accueillir ces deux technologies, ainsi que leurs perspectives de développement.

# Chapitre I

---

*Centrale solaire thermique- dessalement  
membranaire*

## **Introduction**

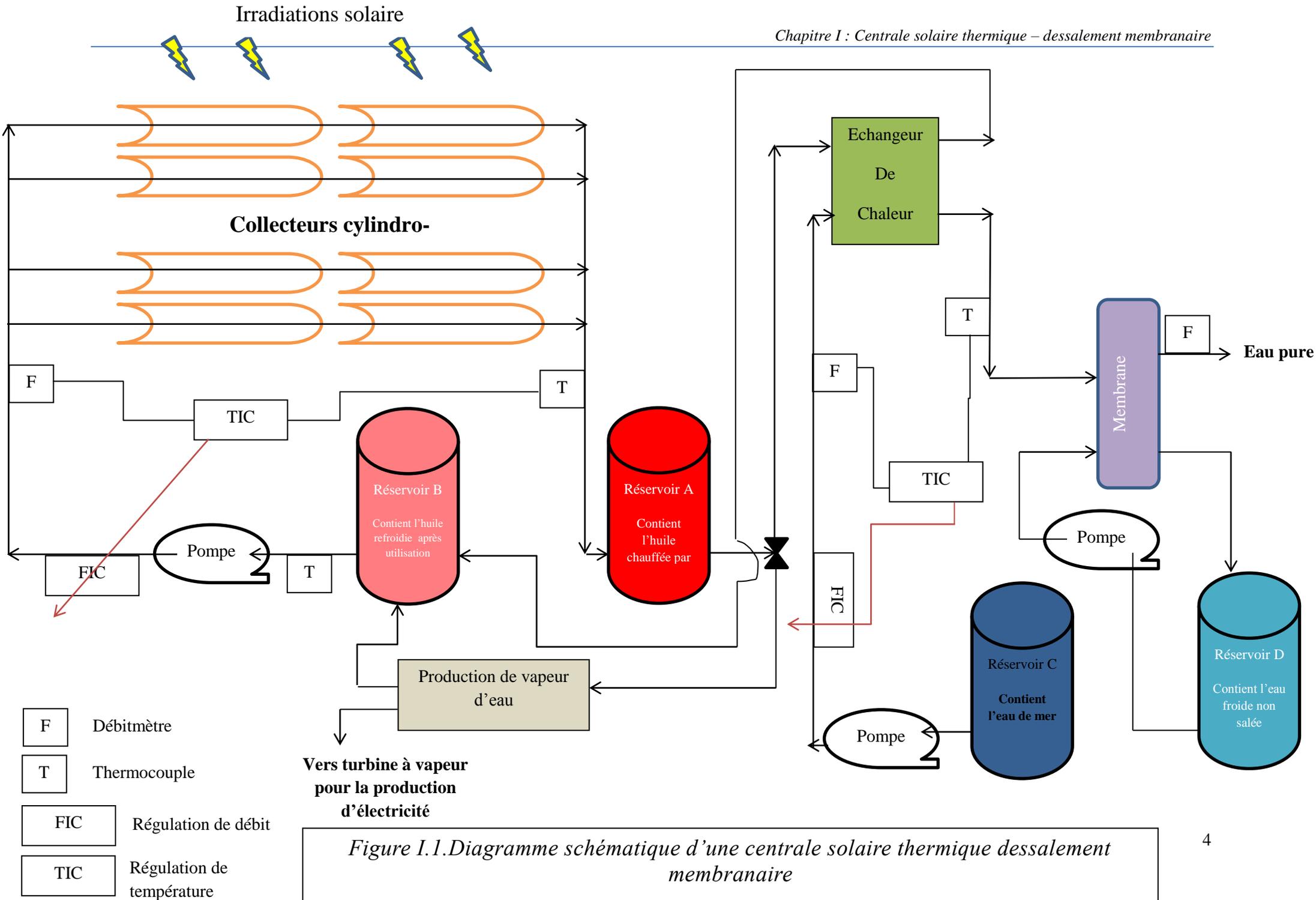
Nous avons vu dans les chapitres précédents qu'il est nécessaire de chauffer de l'eau salée avant que celle-ci n'intègre le processus DCMD. Nous avons vu, aussi, qu'il est nécessaire, pour le bon fonctionnement d'un système solaire thermique de refroidir les éléments de celui-ci et, aussi, de bien nettoyer les collecteurs afin de maintenir une grande efficacité optique. De là il est évident de proposer un lien entre les deux systèmes qui se complètent. Plusieurs auteurs [140-144] ont proposés des schémas de commandes de dessalement basés sur des systèmes solaires thermiques aussi appelés solution compacte, sauf que notre objectif est de produire, non seulement de l'eau pure, mais aussi de l'électricité, ce qui n'est pas l'objectif principal de la solution compacte. La solution à deux boucles permet de construire une vaste centrale d'électricité solaire thermique mais aussi une centrale de dessalement dans la même installation. Dans ce chapitre nous allons présenter et modéliser les éléments de cette centrale, puis pour finir nous allons simuler le système complet et conclure avec quelques résultats.

### **I.1. Descriptif d'une centrale solaire thermique-dessalement membranaire par contact directe (DCMD)**

Dans la centrale proposée l'objectif est double, produire de l'électricité à partir du système solaire thermique, et produire de l'eau pure à partir de l'eau salée tout cela sans utiliser d'énergie fossile. D'une autre manière, la centrale doit être autonome, l'énergie nécessaire pour le dessalement membranaire est fournie par les collecteurs cylindro paraboliques, et l'eau nécessaire au refroidissement et à la maintenance des panneaux est fournie à partir de l'eau dessalée.

Pour commencer le fluide caloporteur, (huile synthétique) stocké dans un le réservoir B, parcourt toute la centrale à un débit fixé par la loi de commande prédictive développée dans le chapitre II, sous l'effet des radiations solaires, ce fluide est chauffée à une température avoisinant les 250°C, une partie de ce fluide sera utilisée pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne une turbine afin de produire de l'électricité , une fois la vapeur d'eau produite l'huile ayant perdu de la chaleur revient dans le réservoir B où elle refera le même cycle, l'autre partie

du fluide chauffé rentrera dans un échangeur de chaleur qui permettra de chauffer de l'eau salée stockée dans un réservoir C. l'eau salée chauffée à une température bien précise grâce à la commande de l'échangeur, rentrera dans la membrane pour être dessalée. En même temps et de l'autre côté de la membrane, de l'eau à température ambiante stockée dans un réservoir D rentre, aussi, dans la membrane pour que le processus DCMD, expliqué dans le chapitre III soit effectué. L'huile qui a perdu sa chaleur lors de l'échange avec l'eau salée réintègrera le réservoir A et l'eau en partie salée refroidie après son dessalement réintègrera le réservoir B (qui lui est aussi couramment alimenté avec de l'eau salée extérieure), l'excédent de l'huile chaude qui n'est utilisé ni par l'échangeur, ni par la turbine sera stocké dans un réservoir A et gardé pour la nuit. Ainsi le cycle est répété indéfiniment. La présence d'un réservoir D permet de stocker de la chaleur. Cette chaleur peut être utilisée la nuit pour continuer la production de l'eau et d'électricité même en l'absence du soleil. La figure représente un diagramme schématique de la centrale avec tous les éléments qu'on va modéliser.



## I.2. Modélisation des éléments de la centrale

### I.2.1. L'échangeur de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont des composants fréquemment utilisés dans les systèmes de refroidissement. Ils représentent des éléments clé de la maîtrise de l'énergie des procédés et des systèmes industriels. Ce dispositif permet de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides. Les différents types d'échangeurs sont donnés en Annexe.

- **Mode de transfert de chaleur dans un échangeur.**

- À courant co-courant : les deux fluides sont disposés parallèlement et vont dans le même sens.
- À contre-courant : les courants sont disposés parallèlement, mais ils vont dans des sens opposés.
- À courant croisé : les deux fluides sont positionnés perpendiculairement.
- À tête d'épingle : un des deux fluides fait un demi-tour dans un conduit plus large, que le deuxième fluide traverse. Cette configuration est comparable à un échangeur à courant parallèle sur la moitié de la longueur, et pour l'autre moitié à un échangeur à contre-courant.
- A contact direct ou à mélange : les deux fluides peuvent être mis en contact comme c'est le cas dans les tours de refroidissement, des buses projetant de l'eau chaude sont disposées sur les parois intérieures de la tour, l'air extérieur admis par le bas s'échauffe et du fait de son changement de densité monte de bas en haut, permettant ainsi de refroidir l'eau.

#### I.2.1.1 Modèle mathématique de l'échangeur utilisé

L'échangeur utilisé est un échangeur à tubes et peut être modélisé comme suit [143]:

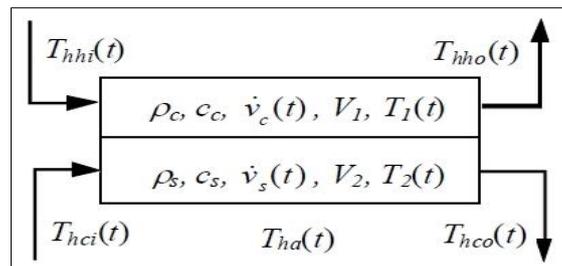


Figure I.2. Schéma de l'échangeur utilisé.

$$\frac{dT_{hho}}{dt} = \frac{\rho_c c_c \dot{v}_c(t)}{c_{h1} + \rho_c c_c V} (T_{hhi} - T_{hho}) - \frac{Ak}{c_{h1} + \rho_c c_c V} (T_{hho} - T_{hco}) - \frac{Ak/2}{c_{h1} + \rho_c c_c V} (T_{hav} - T_{ha}) \quad (I.1)$$

$$\frac{dT_{hco}}{dt} = \frac{\rho_s c_s \dot{v}_s(t)}{c_{h2} + \rho_s c_s V} (T_{hci} - T_{hco}) + \frac{Ak}{c_{h2} + \rho_s c_s V} (T_{hho} - T_{hco}) - \frac{Ak/2}{c_{h2} + \rho_s c_s V} (T_{hav} - T_{ha}) \quad (I.2)$$

Soit  $x_1 = T_{hho}$ ,  $x_2 = T_{hco}$ ,  $T_{hhi} = u_2$ ,  $T_{hci} = u_3$ , le débit  $\dot{v}_s$  est considéré constant et égale au débit  $Q$  qui rentre dans la membrane nous aurons :

$$\dot{x}_1 = \frac{\rho_c c_c u_1}{c_{h1} + \rho_c c_c V} (u_2 - x_1) - \frac{Ak}{c_{h1} + \rho_c c_c V} (x_1 - x_2) - \frac{Ak/2}{c_{h1} + \rho_c c_c V} \left( \frac{x_1 + x_2}{2} - T_{ha} \right) \quad (I.3)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\rho_s c_s U}{c_{h2} + \rho_s c_s V} (u_3 - x_2) + \frac{Ak}{c_{h2} + \rho_s c_s V} (x_1 - x_2) - \frac{Ak/2}{c_{h2} + \rho_s c_s V} \left( \frac{x_1 + x_2}{2} - T_{ha} \right) \quad (I.4)$$

### I.2.1.2 Commande de l'échangeur de chaleur

Le but de commande de l'échangeur est de maintenir la température  $x_1$  à une température bien précise pour que celle-ci soit exploitée par la membrane. Nous avons simulé l'échangeur de chaleur et introduit à  $t=50$  une variation de la température d'entrée chaude, qui correspondrait en pratique à une baisse de production de la centrale solaire thermique nous avons obtenu les résultats de simulations suivantes :

$T_{hci}(t) = 25^\circ\text{C}$ ,  $k = 295$ ;  $A = 40$ ;  $V = 0.05$ ;  $c_h = 400$ ;  $m_h = 10$ ;

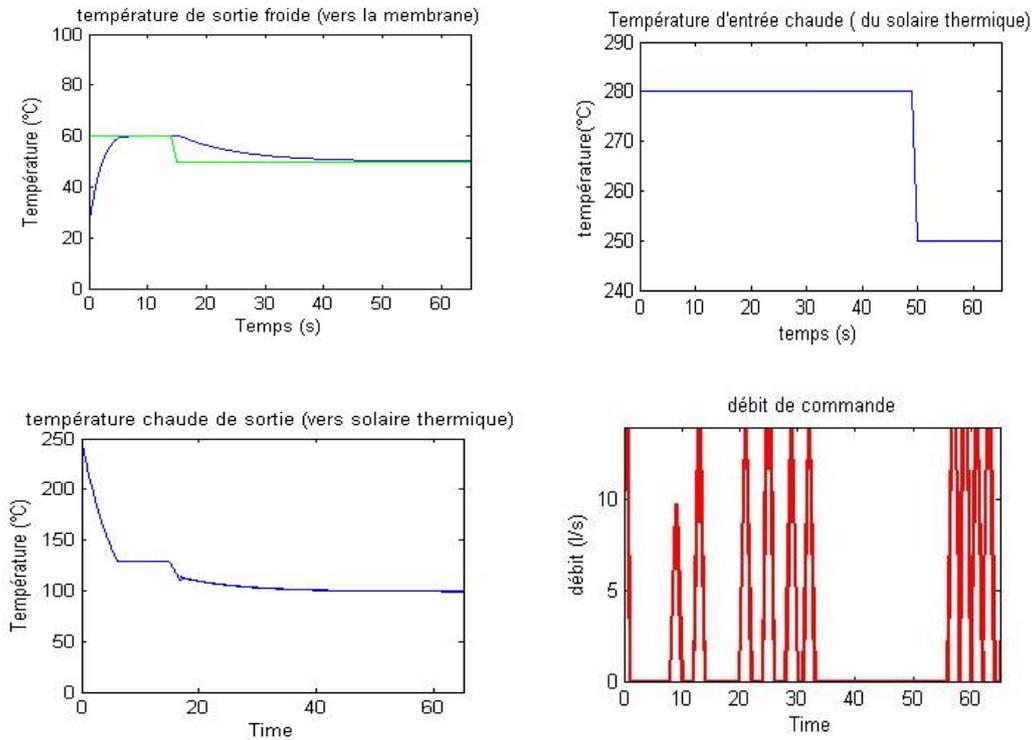


Figure I.3. Simulation en boucle fermée de l'échangeur utilisé

Nous pouvons remarquer que l'échange de chaleur entre l'eau et l'huile synthétique s'effectue correctement, l'huile synthétique possède des propriétés thermiques bien spécifiques ; en effet, pour

chauffer de l'eau de 25°C à 60°C il a fallu un échange important avec l'huile, car celle-ci perd rapidement sa chaleur en contact d'un fluide froid (de 280°C à 130°C). La commande utilisée répond avec un temps de réponse acceptable, vue la dynamique lente du solaire thermique et donc des perturbations bien plus lentes que ce temps de réponse, par conséquent la commande PID est largement suffisante dans ce cas de figure.

## I.2.2. Capteur de température

Dans les équipements thermiques, le capteur de température est le plus répandu. Pour les basses températures (− 200 à + 800°C environ, valeurs extrêmes à moduler en fonction de la tenue en température du support), la sonde platine 100 Ω à 0°C est la plus utilisée (ex : enceinte climatique, étuve, réchauffeur). Pour les cas simples, le thermostat basé sur le principe du bilame est également très répandu (ex : chaudière domestique).

Dans les autres procédés industrielles, on utilise en général soit :

- **des lunettes infrarouges** (mono ou bi chromatiques) utilisées pour les mesures sans contact ; elles restent une solution chère et pas toujours utilisable ; leur domaine d'utilisation est généralement supérieur à 600°C.
- **des thermocouples** ; il en existe plusieurs types selon la gamme de température balayée par le processus. Les thermocouples nécessitent une jonction de référence ou soudure froide qui permet à la f.é.m. mesurée d'être uniquement fonction de la température de la soudure chaude du capteur. De plus la mesure délivrée par le thermocouple doit être linéarisée, dans le transmetteur, ou dans le régulateur.

Le thermocouple utilisé peut être représenté par une fonction de transfert du premier ordre avec une constante de temps de 2 secondes et un gain statique de 1 [136].

## I.2.3. Capteur de débit

Le débitmètre utilisé est un débitmètre à turbine, et peut être modélisé par la fonction de transfert du second ordre suivante [141]:

$$D = \frac{K_d}{1 + 2\zeta\tau_d s + \tau_d^2 s^2} \quad (I.5)$$

Avec:

$$K_d = 3V/l/s, \zeta = \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ et } \tau_d = 0.033s.$$

Les différents familles de débitmètres sont présentées dans [142] et sont données en Annexe.

## I.2.4. Pompes

Les pompes peuvent être classées comme suit :

- Pompe hydraulique: appareils qui convertissent l'énergie mécanique en énergie hydraulique en aspirant avec une très faible dépression l'huile contenue dans un réservoir.

- Pompe hydrodynamique: pompe qui entraîne les fluides à grands débits et faibles pressions (absence d'étanchéité entre l'entrée et la sortie de la pompe). Ex.: compresseur centrifuge
- Pompe volumétrique: pompe dans laquelle l'écoulement est réalisé grâce à l'augmentation (aspiration) et la diminution (refoulement) successives du volume d'une cellule (similaire à l'action d'une seringue). Permet la mise en œuvre de grandes pressions à de faibles débits.

Les différents types de pompes sont donnés en Annexe.

La pompe utilisée est une pompe à engrenage et peut être modélisée par un gain entre sa tension d'alimentation et le débit fournie  $K_p=0.05l/V/s$ .

### I.3. Modélisation de l'irradiation solaire

L'arrivée de radiation solaire à la surface de la terre est soumise à beaucoup d'effets non linéaires, complexes et partiellement incertains dans l'atmosphère. Après la pénétration de l'irradiation solaire dans la troposphère, plusieurs pertes apparaissent qui peuvent être dues à l'absorption, réflexion ou effets du filtrage. Ces phénomènes locaux se produisent à cause de l'existence de poussière, humidité, les nuages et l'épaisseur de ses couches, aérosols et le gradient de température dans l'atmosphère. Plusieurs recherches ont été effectuées afin de pouvoir modéliser mais aussi d'estimer celle-ci. L'un des modèles les plus utilisés en engineering est le modèle donné dans [137]. La radiation solaire normale est donnée par :

$$\dot{I}_n = C_n A e^{-\frac{B}{\cos\theta_z} \left(\frac{p}{p_0}\right)} \quad (I.6)$$

Avec  $A$  représente l'irradiation extraterrestre apparente,  $p_0$  est la pression au niveau de la mer et  $p$  est la pression atmosphérique de la région. Tous les paramètres sont calculés à partir de la table qui prend en compte la distance soleil- terre [137].

**Tableau I.1.** Table des paramètres de l'irradiation [137]

Date	$A$ (W m <sup>-2</sup> )	$B$ (W m <sup>-2</sup> )	$C$ (W m <sup>-2</sup> )
21 Jan	1230	0.142	0.058
21 Feb	1215	0.144	0.060
21 Mar	1186	0.156	0.071
21 Apr	1136	0.180	0.097
21 May	1104	0.196	0.121
21 Jun	1088	0.205	0.134
21 Jul	1085	0.207	0.136
21 Aug	1107	0.201	0.122
21 Sep	1152	0.177	0.092
21 Oct	1193	0.160	0.073
21 Nov	1221	0.149	0.063
21 Dec	1234	0.142	0.057

Le paramètre C étant un paramètre locale de la région, nous avons pris dans notre cas C= 0.42. La radiation totale arrivant à la surface de la terre est donnée par la somme de la composante directe qui arrive avec un angle d'incidence, de l'irradiation diffuse et de l'irradiation réfléchié :

$$\dot{I}_t = \dot{I}_n \cos \theta + \dot{I}_d + \dot{I}_r \quad (I.7)$$

Avec

$$\dot{I}_d = C \dot{I}_n F_{ss}, F_{ss} = \frac{1 + \cos \zeta}{2}$$

Et

$$\dot{I}_r = \dot{I}_{r;\theta=0} \kappa_g F_{sg}, F_{sg} = \frac{1 - \cos \zeta}{2}$$

Avec  $F_{ss}$  et  $F_{sg}$  représentent le facteur d'angle entre la surface et le ciel et entre la surface et la terre respectivement, où  $\zeta$  représente la pente de la surface mesurée à partir de l'horizontale,  $\kappa_g$  représente la réflectance. Comme il a été expliqué dans le chapitre I, le mécanisme de poursuite du panneau solaire permet de toujours avoir l'angle entre le collecteur et la radiation solaire égale à 90°. En supposant que le terrain sur lequel le quel est construite la centrale est de pente nulle, nous aurons le profil d'une journée claire dans la région de Adrar :

Données de la région.

**Tableau I.2.** Données climatique et géographique de la région de Ouargla.

Date	04 mai 2013
latitude	31.96298° N
longitude	5.342011° E
Levé du jour (LDJ)	05 :50 :01
Coucher du soleil(CDS)	19 :21 :16
Azimut L.D.J.	70.47°
Azimut C.D.S.	289.72°
Pression moyenne	1008 hPa
Température moyenne	30°C
Humidité	27%

Nous avons insérer ces données dans un logiciel disponible dans [140], qui a permis de récolter, la position du soleil tous au long de la journée. Le tableau des résultats et la méthode de calcul sont donnés en annexe. Nous avons utilisé les résultats obtenus pour calculer avec notre modèle la radiation de la journée nous avons obtenus les résultats de simulations suivantes :

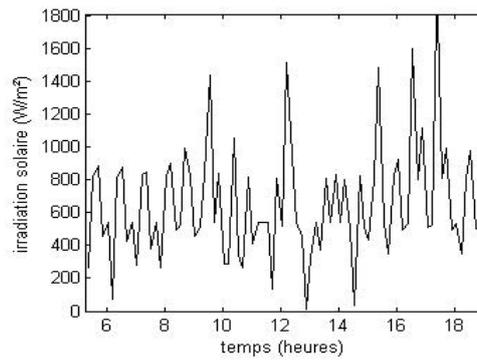


Figure I.4. Simulation de l'irradiation solaire

Nous pouvons remarquer la grande fréquence de variation de l'irradiation solaire ce qui rend la tâche de commande plus compliquée, aussi ce qui caractérise la journée du 04 mai 2013 est ce léger passage nuageux qui se manifeste par une diminution subite la radiation solaire et ceci entre 10h et 12h locale. Cette simulation est très intéressante pour simuler le comportement de la centrale, car la fréquence de changement de l'irradiation englobe un large spectre de fréquences.

## I.4. Simulation de la centrale

Nous avons simulé la centrale complète pendant toute la journée du 04 mai 2013 avec tous les éléments décrits dans ce chapitre, le schéma suivant montre la représentation du modèle de la centrale sous Simulink.

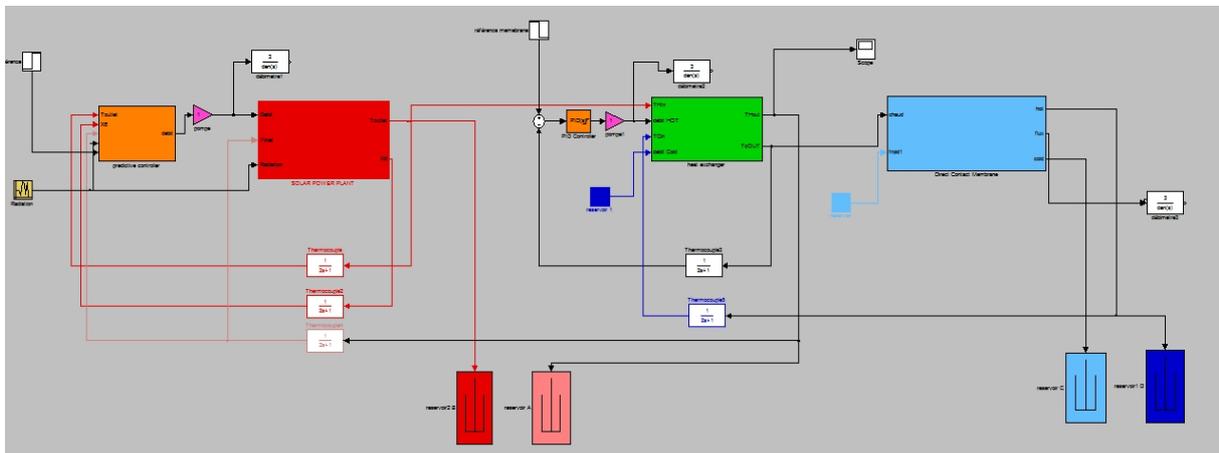
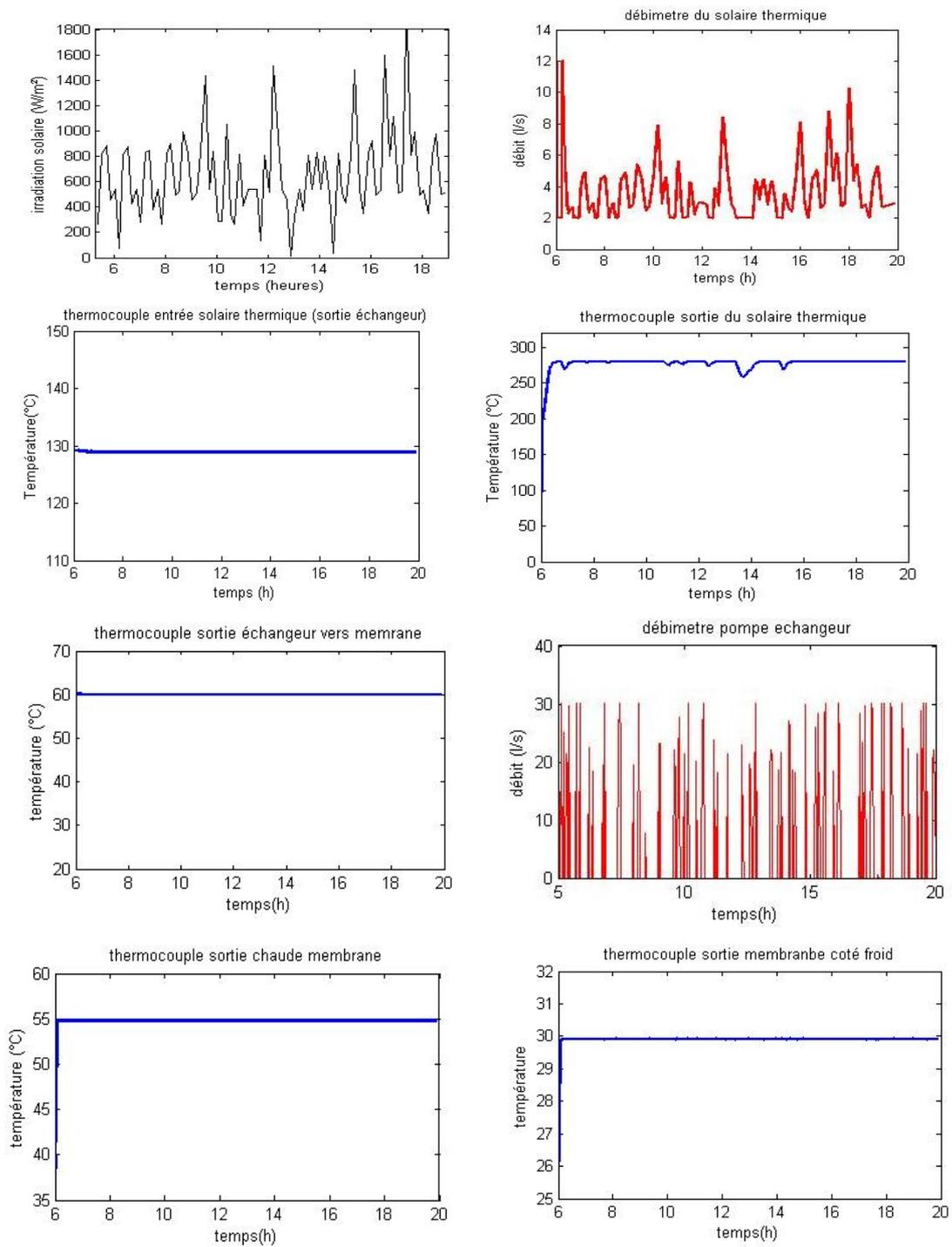
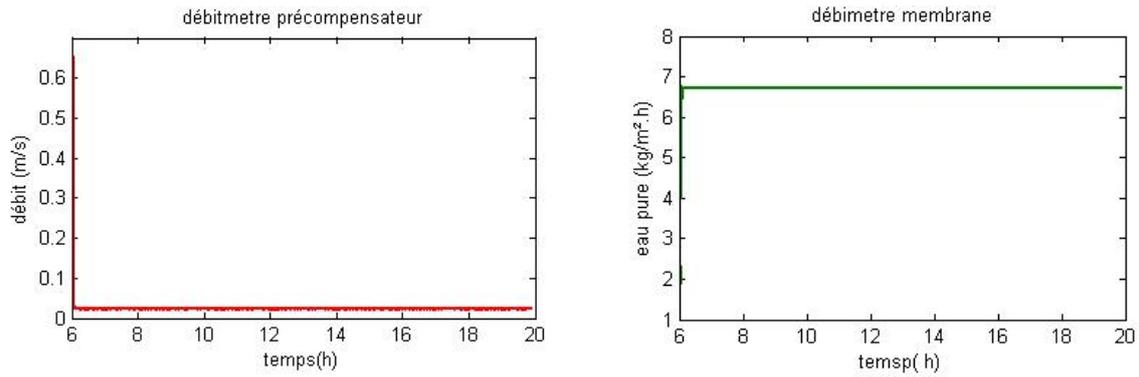


Figure I.5. La centrale complète sous Simulink

Les résultats de simulations sont donnés dans les figures suivantes:





**Figure I.6.** Simulation de la centrale complète

Nous pouvons remarquer que la simulation de la centrale complète répond bien au cahier de charge qui été de produire dans le même endroit, de l'électricité et de l'eau. En effet, la robustesse de la commande prédictive permet de maintenir la température de sortie du solaire thermique dans une plage de +/- 5°C en présence de très grandes variations de la radiation solaire (entre 13H et 14H).

La commande de l'échangeur de chaleur joue le rôle d'un filtre, qui réduit encore plus la variation de la température qui rentre dans la membrane à +/- 0.5°C, puis le pré compensateur corrige les dernières variations en injectant des débits variables à la membrane pour maintenir le flux d'eau pure constant. Tout de même, nous pouvons remarquer que lors de la phase démarrage, la charge sur les différentes pompes est maximale, en effet le solaire thermique fournit une basse température (après une nuit sans soleil), et ce phénomène est accentué par la présence de faible radiation (levée du jour), c'est pour cela que nous conseillant les recommandations suivantes :

- La phase démarrage de la centrale solaire thermique doit s'effectuer en manuel jusqu'à atteindre la température de 190°C [1].
- Le branchement de la membrane avec le reste du réseau doit s'effectuer qu'en régime permanent au risque d'endommager celle-ci.
- La présence d'un superviseur qui doit veillez à la diminution des performances exigées à la centrale en présence de forte couverture nuageuse, afin de garantir la durée de vie des éléments de la centrale.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter le principe de fonctionnement de la centrale, puis nous avons modélisé chaque élément de cette dernière, puis nous avons présenté le modèle de radiation sur lequel on s'est basé pour simuler la centrale. Au final, une simulation de la centrale complète a été faite. Nous avons pu confirmer que les commandes synthétisées précédemment remplissent bien leurs tâches, et que la centrale donne de bons résultats même en présence des perturbations. Nous avons pu, aussi, déterminer quelques recommandations pour le bon fonctionnement de cette centrale.

# Chapitre II

---

*Etude économique et écologique*

## **Introduction**

La dernière partie de l'étude porte sur le potentiel de notre pays à accueillir les solutions techniques préconisées. Il ne s'agit pas ici de faire une étude économique détaillée mais juste de donner un ordre de grandeur de son coût et sa rentabilité ainsi que les différents facteurs à prendre en compte avant de se lancer dans un tel projet. Cette étude permet aussi de montrer que les solutions proposées précédemment ont, non seulement, un avantage technique, mais, aussi, économique et environnemental par rapport aux technologies actuelles.

## **II. 1 Définition des éléments de calculs économiques**

### **II. 1.1 Les investissements**

Le montant des investissements correspond à la somme totale dépensée par la société pour réaliser un projet industriel afin d'effectuer les diverses opérations qui s'y rapportent, depuis les études technico-économiques préliminaires jusqu'à la mise effective des installations [68].

### **II. 1.2 Les charges fixes**

Ce sont des dépenses annuelles dont le calcul s'effectue à partir des investissements de l'unité. Elles sont appelées fixes, parce qu'elles sont constantes pour une capacité de traitement donnée, quelle que soit la quantité effectivement produite. Ces frais pourront être différents d'une société à l'autre, parfois même d'une usine à l'autre au sein d'une même société, selon la politique qu'elle pratique. Ils comprennent, par exemple, les loyers, les primes d'assurance, les provisions pour amortissement, les frais financiers [68].

### **II. 1.3 Les charges variables**

Ces charges sont appelées variables, parce que, à l'inverse des charges fixes, elles sont proportionnelles à la production réelle de l'unité et non à sa capacité nominale. Elles sont, aussi, appelées charges d'activité, et comprennent dans notre cas la source d'électricité issue de l'énergie solaire photovoltaïque [68].

## II. 1.4 Le temps de remboursement

On l'appelle, aussi, temps de récupération du capital. Il est défini comme étant la durée au bout de laquelle les recettes totales liées au fonctionnement d'une unité, déductions faite de toutes les sorties y compris les taxes, sont égales au montant global des investissements [68].

## II. 2 Evaluations des coûts de productions de l'énergie électrique

Afin de comparer les coûts de génération de l'électricité pour chaque technique de production, plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

- Le coût d'investissement
- Le coût d'opération et de maintenance
- Les coûts liés à l'utilisation de l'énergie primaire
- L'indicateur le plus utilisé pour les centrales solaires et dans beaucoup d'autres systèmes est le Levelized electricity cost (LEC). Il est calculé de la manière suivante :

Definition of "Levelized Electricity Costs" (LEC)

$$LEC = \frac{crf \cdot K_{invest} + K_{O\&M} + K_{fuel}}{E_{net}}$$

with

$$crf = \frac{k_d(1+k_d)^n}{(1+k_d)^n - 1} + k_{insurance} = 9,88\%$$

$k_d$  real debt interest rate = 8%

$k_{insurance}$  annual insurance rate = 1%

$n$  depreciation period in years = 30 years

$K_{invest}$  total investment of the plant

$K_{O\&M}$  annual operation and maintenance costs

$K_{Fuel}$  annual fuel costs

$E_{net}$  annual net electricity

**Figure II.1.** Levelize de lectricitycost [66].

Le taux d'intérêt utilisé prend en compte l'inflation. Les valeurs indiquées sont celle utilisées par la banque mondiale dans son rapport : *Strategy for the Market Development of Concentrating Solar Thermal Power*. Le graphique suivant donne, à titre indicatif, le LEC en \$cts/kWh calculé pour différentes technologies de production d'électricité en Californie :

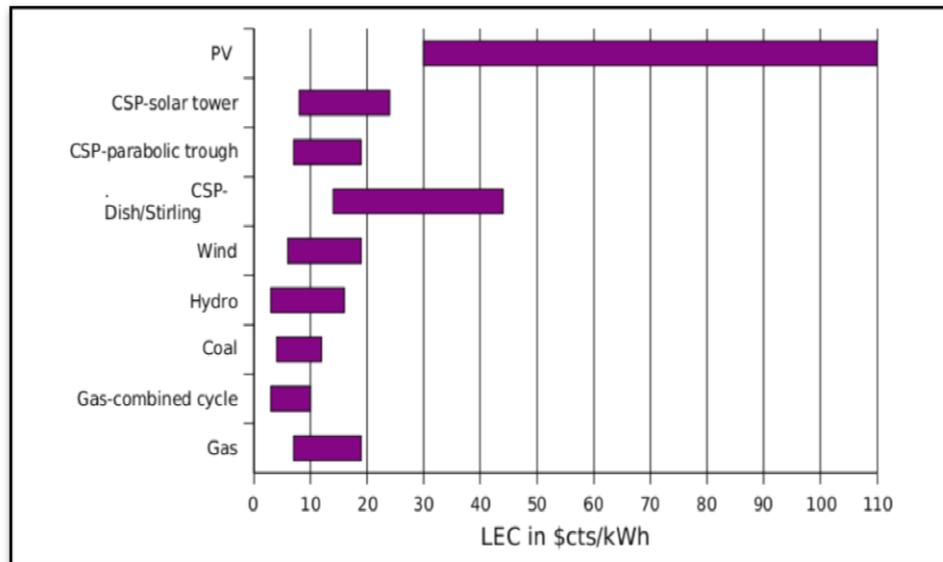


Figure II.2. LEC pour les différentes technologies en Californie.

On constate que l'électricité provenant des centrales solaires est bien moins coûteuse que celle produite par les panneaux photovoltaïques. Parmi les différentes technologies de concentration solaire, on remarque que les capteurs paraboliques produisent l'électricité à un coût supérieur par rapport aux deux autres techniques. Les coûts peuvent être réduits drastiquement par la production à grande échelle. L'exemple des 9 centrales SEGS en Californie est représentatif : plus la puissance installée était importante, plus le LEC a diminué, comme le montre le graphique ci-dessous. :

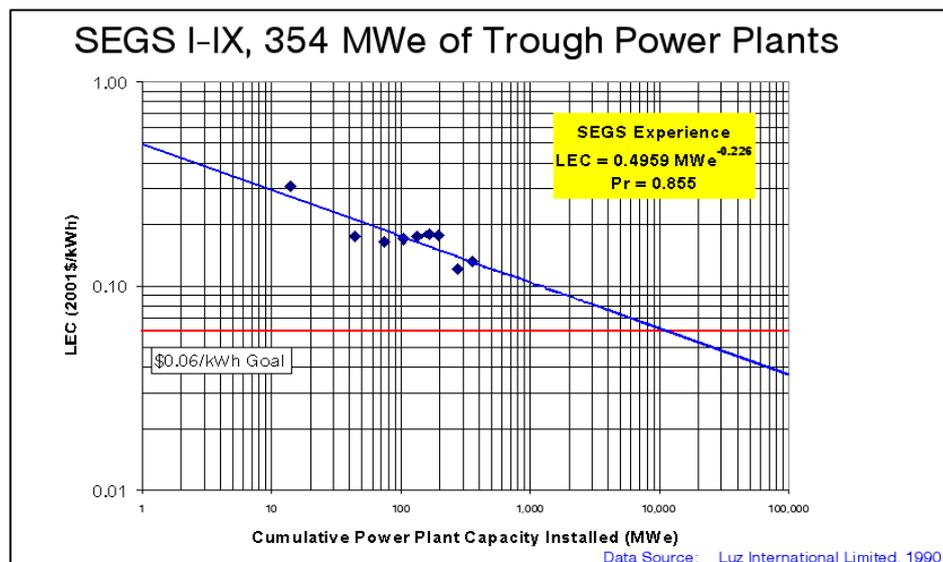


Figure II.3. LEC en fonction de la puissance installée.

## II.3 Coût environnemental

La figure V.4 montre une comparaison entre les émissions de CO<sub>2</sub> basée sur l'étude du cycle de vie pour plusieurs technologies de centrale. On voit que les performances des centrales solaires cylindro-paraboliques sont excellentes, dépassant même celles des éoliennes et des centrales hydroélectriques.

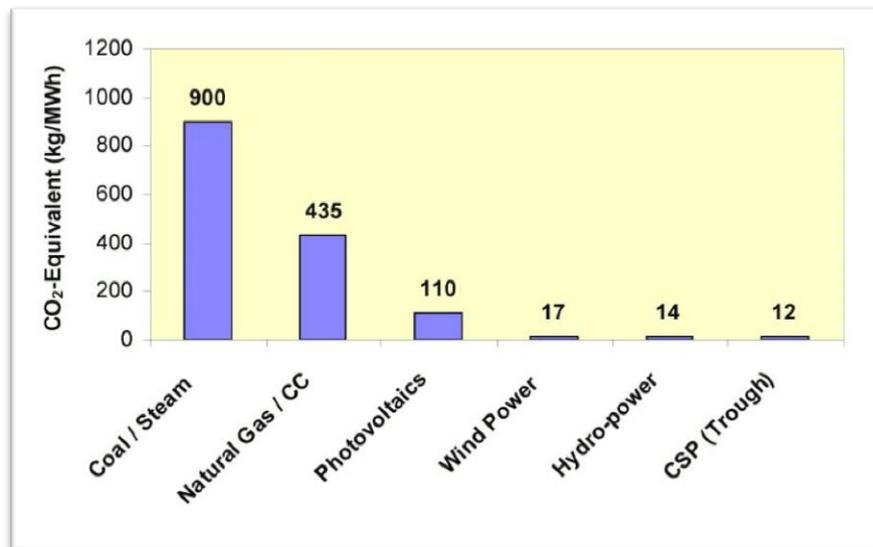


Figure II.4. Emissions de CO<sub>2</sub> pour 6 technologies de production d'électricité

## II.4 Evaluation du potentiel de développement des collecteurs cylindro-paraboliques en Algérie

Nous avons vu dans le chapitre I et dans ce chapitre, qu'il faut que l'installation solaire thermique soit grande et centralisée pour qu'elle soit rentabilisée le plus rapidement, c'est pour cela qu'une étude de potentiel de développement doit être faite avant de se lancer dans un tel projet. Nous allons dans ce qui suit donner les différentes ressources que possède l'Algérie pour accueillir cette technologie.

### II. 4.1 Evaluation du potentiel solaire

Il a été prouvé que les collecteurs solaires thermiques sont économiques dans les régions où la radiation solaire directe dépasse les 1800kWh/m<sup>2</sup>/an [111]. En tenant compte des études faites par l'Agence Aérospatiale Allemande (DLR), basée sur des images satellites (figure V.5), l'Algérie a le plus grand potentiel solaire dans tout le bassin méditerranéen. La radiation solaire annuel est estimée à 1700kWh/m<sup>2</sup>/an dans le nord et 2650kWh/m<sup>2</sup>/an dans le sud. La durée d'ensoleillement annuel est de 3000 heures et peut dépasser 3500 heures/an dans le Sahara, avec ces données l'Algérie possède l'un des plus grands potentiels énergétiques solaires dans le monde avec plus de 6 milliards de GWh/an [113]. Le thermo solaire quant à lui peut produire en Algérie jusqu'à 169440 TWh/an [112].

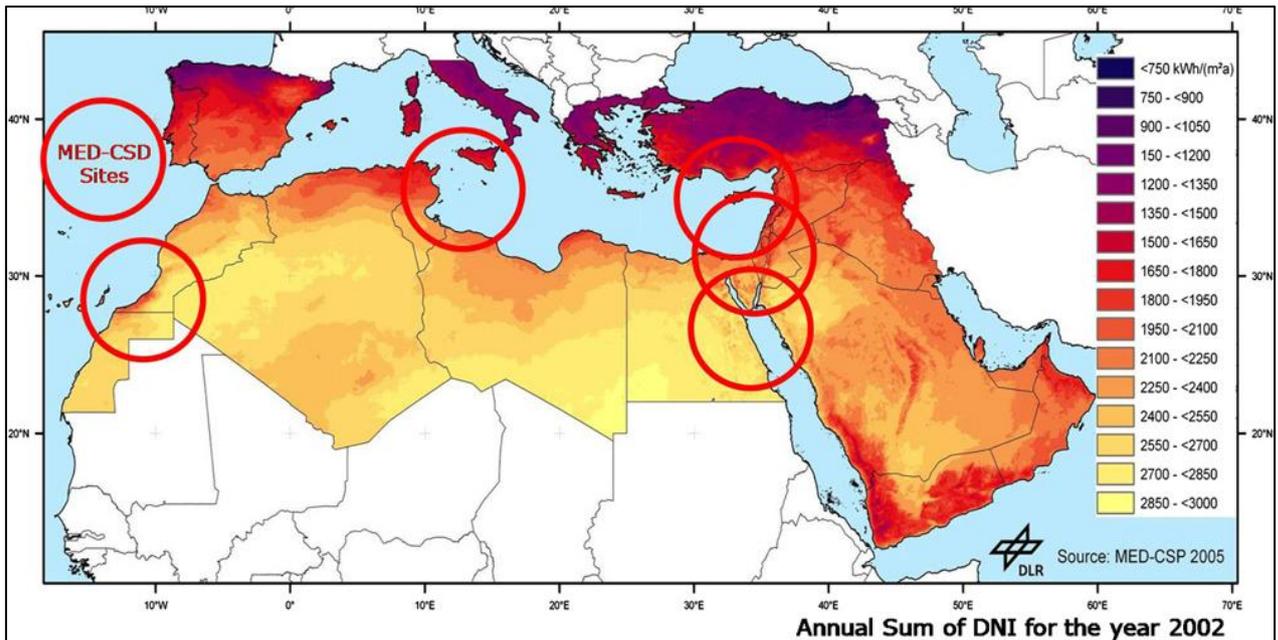


Figure II.5. Potentiel solaire dans le bassin méditerranéen [114].

## II. 4.2 Evaluation potentiel territorial

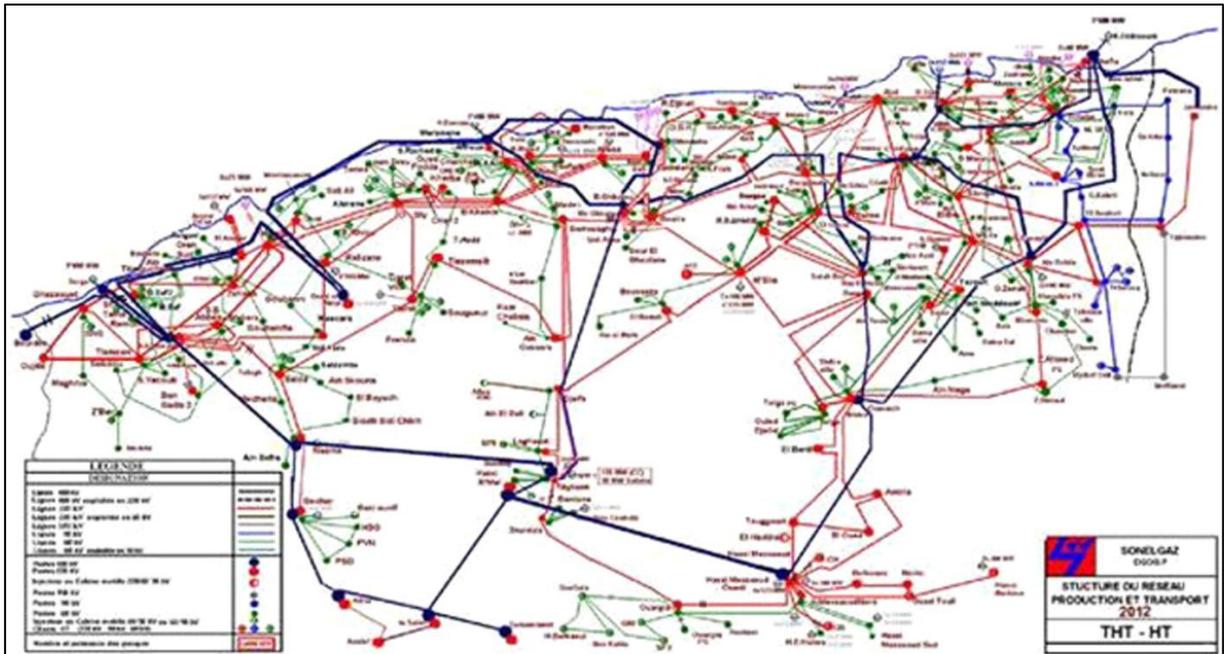
Les collecteurs solaires thermiques ont besoin d'un grand espace pour pouvoir être construits, ils ont besoin approximativement de 20234 m<sup>2</sup>/MW d'électricité. Les installations qui contiennent un réservoir de stockage ont généralement besoin de plus de surface. De plus une terre plate (pente de moins de 1%) est plus économique à développer. L'Algérie forte de son désert avec 2048297 km<sup>2</sup> n'aura pas de problème d'espace de construction dans le futur, mais les données topographiques, sismique et géologiques restent à prendre en considération.

## II. 4.3 Evaluation du potentiel hydrique

L'utilité principale de l'eau pour le système solaire thermique est de refroidir le cycle énergétique, l'eau est aussi utilisé pour nettoyer les collecteurs, généralement il faudrait 3 à 3.5m<sup>3</sup>/kWh avec 95% de cette eau seulement pour le refroidissement [114]. La région désertique considéré contient de l'eau salé ou autre type d'eau non potable, ce qui peut constituer un obstacle cependant des méthodes de refroidissement dites à sec (climatisation) peuvent être envisagé mais leur prix de revient est 3 fois plus chère qu'un refroidissement à eau [114]. Des solutions durables peuvent être considérées comme installer des stations de dessalement de l'eau à proximité de l'installation solaire thermique, ainsi l'excédent de chaleur peut être utilisé pour le dessalement, et l'eau produite peut être utilisée ainsi pour le refroidissement. La solution proposée est celle ayant le plus grand potentiel de développement.

## V. 4.4 Evaluation du potentiel du réseau électrique

La proximité d'une centrale solaire thermique d'un réseau électrique est fondamentale. L'Algérie a un réseau étendu de courant alternatif, qui certes ne couvre pas la totalité de la surface du pays, mais arrive à des régions vraiment éloignées du territoire et cela grâce à la présence de l'industrie du pétrole et du gaz naturel. La figure V.6 montre le réseau électrique Algérien.



*Figure II.6. Réseaux électrique en Algérien.*

Les lignes de 400kV s'étendent à 1300km, les projets en cours de développement incluent une ligne de 400kV est-ouest, et une autre atteignant les régions les plus éloignées du désert. En plus des lignes terrestres, d'autres projets de constructions de lignes sous-marines sont en cours. En plus de toutes ces considérations d'autres facteurs comme le vent doivent être pris en considération avant de construire chaque centrale.

## II. 5 Perspectives de développements en Algérie

L'Algérie -ne faisant pas exception-, a pour principale source d'énergie : l'énergie fossile, les hydrocarbures et spécialement le gaz naturel. En 2011, l'Algérie s'est engagée avec détermination sur la voie des énergies renouvelables. Ce choix stratégique est motivé par la disponibilité d'un immense potentiel solaire. En effet, la durée d'ensoleillement est égale respectivement 2650 heures par an au Nord et 3500 heures par an au Sud. L'irradiation solaire journalière reçue sur une surface horizontale est environ 5 kWh/m<sup>2</sup> au Nord et supérieure à 7 kWh/m<sup>2</sup> au le Sud. Ainsi, les énergies solaires thermique et photovoltaïque constituent l'axe majeur du programme des énergies renouvelables. D'ici 2030, la part de la filière énergie renouvelable sera 40% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale [67]. L'énergie solaire thermique est présente dans ce programme national des énergies renouvelables dans les domaines de la concentration solaire et l'efficacité énergétique. La concentration solaire représente à elle seule deux tiers (2/3) de la puissance à installer. En 2030, pour les centrales à concentration solaires, la capacité cumulée à installer prévue est de 7200 MW, soit environ 32% par rapport à la production nationale d'électricité. Par contre, pour le photovoltaïque et l'éolien le cumule de puissance prévu est de 4800 MW, ce qui correspond à environ 8% par rapport à la production nationale d'électricité [67].

## II. 6 Evaluation du coût du dessalement de l'eau

Le coût total de dessalement de l'eau comprend le coût en capital, le fonctionnement annuel et les coûts de maintenance. Le coût en capital est représenté par le total de la construction et de non-construction (ingénierie, la mise en service, l'acquisition de terrains et les frais juridiques et administratifs) des coûts du projet et les intérêts sur le capital au cours de la période de remboursement du prêt. Le cout de fonctionnement et d'entretien annuel incluent les produits chimiques, l'électricité, le remplacement du matériel et les coûts de main-d'œuvre [121]. Plusieurs facteurs influent sur les coûts d'investissement, d'exploitation et d'entretien des installations de dessalement. Certains d'eux sont inclus dans le tableau. La capacité des installations influe également sur le coût du capital; les grandes usines sont généralement plus économiques [122].

*Tableau II.1. Les facteurs affectant les différents couts [123].*

Coûts	Facteurs
<p style="text-align: center;">capitale</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacité de l'usine</li> <li>- Emplacement du projet</li> <li>- La qualité de l'eau de source.</li> <li>- Co-localisation avec des installations de production d'électricité existante.</li> <li>- Les coûts associés à la consommation plan de gestion.</li> <li>- atténuation de l'environnement.</li> <li>- qualité de l'eau requise.</li> </ul>
<p style="text-align: center;">Opération et maintenance</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La consommation d'énergie et les coûts.</li> <li>- Puissance / prix du carburant.</li> <li>- Qualité de l'eau.</li> <li>- l'utilisation des produits chimiques pour le prétraitement.</li> <li>- Les exigences post-traitement.</li> <li>- Le remplacement des équipements et la fréquence de remplacement.</li> <li>- Remplacement de la membrane..</li> <li>- Remplacement du filtre.</li> </ul>

Autres	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Type de post-traitement requis</li> <li>- L'équipement auxiliaire sélectionné</li> <li>- Le coût des terrains</li> <li>- le moyen de transport de l'eau vers la centrale</li> </ul>
--------	--

## II. 7 Comparaison du cout de la DCMD avec les techniques actuelles

Il y a différents types de technologies de dessalement. RO et ED sont les plus couramment utilisés pour le traitement de l'eau saumâtre [123]. RO est considéré comme le plus économique des technologies de dessalement à grande échelle, suivie par MSF et MED [124]. Mais quand on associe le dessalement avec une source d'énergie renouvelable comme le solaire thermique par exemple, les choses sont complètement différentes ; Le Coût en capital et celui d'exploitation pour DCMD peut être inférieure par rapport aux coûts de RO comme il a été démontré dans [125]. Les expériences ont été menées avec 10% de saumure comme alimentation. Le coût de la RO a été estimée en supposant une pression de service de 1000 psi, la récupération de 30%, l'alimentation débit de  $0,15 \text{ m}^3 / \text{s}$ , et la récupération d'énergie de 30%. Pour DCMD une pression de fonctionnement de la coquille de 10 psi, Récupération de 12%, et se nourrissent débit de  $0,36 \text{ m}^3 / \text{s}$  était supposé. Le coût de certains éléments du fonds, tels que l'aménagement du site, l'eau, les services publics, les frais généraux de construction et d'urgence, ainsi que certains exploitation coûts, comme le remplacement de la membrane, le travail, les pièces de rechange et des filtres à osmose inverse sont les mêmes que ceux DCMD. Les chercheurs ont conclu que le flux de perméation de DCMD est de 1,5 fois plus élevé que RO [125]. La figure V.7 montre un comparatif entre les couts d'installation et d'exploitation de la distillation par RO et par DCMD.

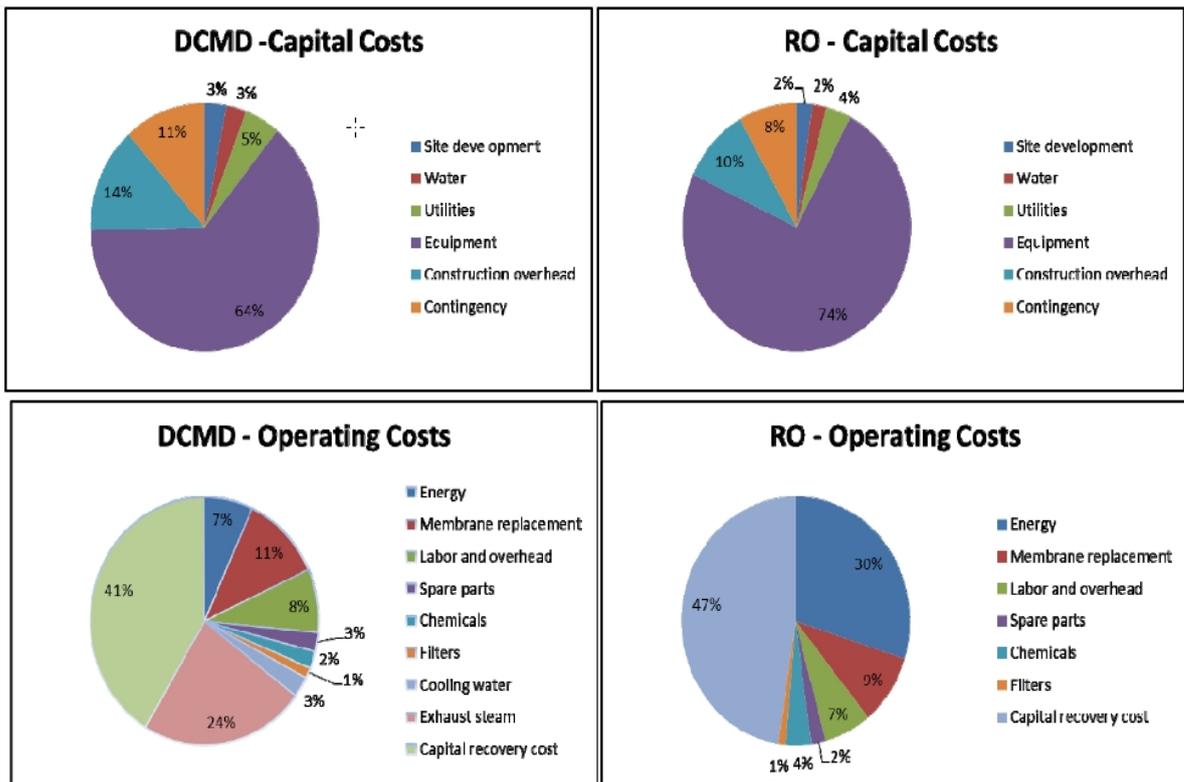


Figure II.7. Comparaison des coûts entre RO et DCMD.

Comme l'a montré l'étude dans [125], le coût estimé de l'eau par DCMD était beaucoup plus faible que par RO due à un fonctionnement à basse pression, et de bonnes propriétés anti-encrassement de la membrane et du processus DCMD. Le coût total en capital pour DCMD était de 0,85 \$ / L par jour par rapport à 1,19\$/L jour pour RO. Le coût total de production pour DCMD était 0.96/m<sup>3</sup> \$, comparativement à 1.18/m<sup>3</sup> \$ pour RO. La comparaison a été faite en supposant que les deux usines de dessalement DCMD et RO ont un taux de production de 3,7 MLD. La teneur en sel de l'eau fabriqué à partir de l' Système DCMD était inférieure à 20 mg / L. La teneur en sel dans l'eau obtenu à partir d'une seule étape RO système est supérieure à 200 mg / L. L'effet de la concentration en sel de la performance de la DCMD système est faible car la pression de vapeur de l'eau est affectée dans une faible mesure par la concentration en sel [125]. La haute pureté de l'eau obtenue à partir de DCMD le rend approprié pour une utilisation dans une grande chaudière à basse pression [126].

## II. 8 Evaluation du potentiel de développement du dessalement en Algérie

Nous avons vu dans les chapitres précédents qu'il est souvent rentable de combiner la production d'eau douce avec une autre activité (notamment la production d'énergie à partir du solaire thermique, car la vapeur disponible à la sortie des turbines, et perdue dans une usine classique, est réutilisable dans une station de dessalement dite thermique ou fonctionnant sur le principe de l'évaporation). Nous allons dans ce qui suit donner les différentes ressources que possède l'Algérie pour accueillir ce type de technologie.

### II. 8.1 Potentiel hydrique

A l'instar des autres pays méditerranéens, l'Algérie, est et le sera davantage confronté à d'énormes problèmes en matière de politique de l'eau. La surcharge du littoral, les disparités entre zones rurales et urbaines, les périodes de sécheresse et l'accroissement de la pollution sont autant de facteurs qui déstabilisent l'équilibre déjà précaire de l'environnement. L'Algérie dispose de ressources en eau très limitées. Tout au moins au nord ou vivent les trois quarts de la population.



**Tableau II.2. Historique des Installations de dessalement en Algérie [115].**

Site	Nombre d'unités	Débit m <sup>3</sup> /J	Procédé	Mise en service
Skikda	1	1440	Flash	1971
Skikda	2	720	Flash	1971
Skikda	—	1440	Echangeurs d'ions	1971
Annaba	2	960	Echangeurs d'ions	1971
Annaba	2	3600	Echangeurs d'ions	1973
Ghazaouat	1	840	Echangeurs d'ions	1974
Arzew	6	3888	Electrodialyse	1975
Arzew	—	960	Echangeurs d'ions	1975
Hassi Messaoud	6	1000	Electrodialyse	1975
Hassi Messaoud	2	110	Electrodialyse	1976
Gassi Touil	1	55	Electrodialyse	1977
Arzew	1	350	Thermo-compression	1978
Annaba	3	14180	Multiflash	1978
Hassi Messaoud	2	350	Electrodialyse	1978
Bel Abbes	—	1500	Echangeurs d'ions	1978
Haoud Berkaoui	1	55	Electrodialyse	1979
Hassi Messaoud	2	300	Electrodialyse	1979
Rhourd El Baguel	1	25	Electrodialyse	1979
Arzew	1	960	Multiflash (5 étages)	1979
Annaba	2	144	Echangeurs d'ions	1979
Annaba	2	576	Echangeurs d'ions	1979
Bassi-Rmel	3	792	Osmose d'inverse	1979
Annaba	2	6240	Echangeurs d'ions	1980
Ghardaia	—	960	Osmose d'inverse	1980
Arzew	1	960	Multiflash (6 étages)	1980
Mostaganem	—	57600	Osmose d'inverse (6 lignes)	1980
Rhourd El Baguel	2	300	Electrodialyse	1981
Biskra	—	864	Osmose d'inverse	1981
Annaba	1	1800	Echangeurs d'ions	1981
Reghaia	—	160	Echangeurs d'ions	1982

Sur les 13 stations prévues par le programme de l'Etat, huit unités sont opérationnelles, à savoir celles de Kahrama à Oran en 2005 (90.000 m<sup>3</sup>/j), Bousfer en 2005 (12.480 m<sup>3</sup>/j), El Hamma à Alger en 2008 (200.000 m<sup>3</sup>/j), Skikda début 2009 (100.000 m<sup>3</sup>/j), Beni Saf à Ain Temouchent en 2010 (200.000 m<sup>3</sup>/jour), Souk Tleta à Tlemcen début 2011 (200.000 m<sup>3</sup>/j), Fouka à Tipaza fin 2011 (120.000 m<sup>3</sup>/j) et Mostaganem début 2012 (200.000 m<sup>3</sup>/j).

## II. 9 Une solution durable: solaire thermique – dessalement de l'eau de mer

Nous avons montré dans les chapitres précédents que la chaleur disponible à partir des panneaux solaires thermiques peut être utilisée pour des besoins industriels notamment le dessalement membranaire. Les calculs théoriques, indiquent que la technique étudiée dans le chapitre VI n'est compétitive relativement à la technique par osmose inverse que seulement si une énergie de chaleur à bas cout est disponible, ou bien les propriétés chimiques de l'eau à traiter rend le procédé par osmose inverse difficile à mettre en œuvre [110].

Le plus grand problème que peut rencontrer cette solutions des deux boucles solaire thermique – dessalement directe par membrane, est que la principale source d'eau salé est disponible où la radiation solaire thermique est la plus faible ; c'est-à-dire au nord du pays. Il existe néanmoins un certain nombre de chott dans le sud Algérien, comme celui de Sidi Slimane qui fait partie des zones humides de la wilaya d'Ouargla. Une autre solution peut être envisagée qui est celle de l'installation de dessalement autonome. Dans cette dernière, l'installation solaire thermique n'a pas un objectif de production d'énergie électrique

afin alimenter le réseau mais uniquement d'alimenter l'installation de dessalement en chaleur, et ainsi sa rentabilité en production électrique ne sera pas une priorité. Il est important de signaler que pour ce genre de projets, l'objectif économique doit certes être pris en compte mais ne doit en aucun cas constituer un frein majeur, car l'enjeu de ce genre de projet est aussi social. En effet, alimenter les régions les plus éloignées en électricité et en eau constitue un enjeu politique et social majeur et la rentabilité du projet est un objectif secondaire.

## Conclusion

L'énergie solaire et le dessalement de l'eau sont des solutions capitales au devenir de notre pays, notre étude a montré que l'Algérie possède un énorme potentiel de production de l'énergie électrique à partir des collecteurs cylindro-paraboliques et qu'elle a aussi un fort potentiel dans le dessalement de l'eau de mer, sauf que ces deux potentiels ne se trouvent pas géographiquement au mêmes endroits, et la possibilité d'optimiser les deux procédés dans une même centrale compacte est réduite. La solution optimale étant de construire des centrales solaires thermiques dans le sud du pays et d'utiliser l'unité de dessalement seulement pour les besoins d'entretien de cette centrale, et d'installer des unités de dessalement de l'eau de mer en utilisant le contact membranaire directe dans le nord du pays, en utilisant des panneaux solaires thermiques que pour les besoins de cette unité, et ainsi optimiser chaque technologie. Cette étude a démontré, aussi, que les deux procédés présentés possèdent un avantage tant sur le plan économique que sur le plan environnemental.

# Conclusion générale

---

Nous avons abordé cette étude dans l'objectif de répondre à un besoin industriel spécifique : produire dans une même centrale de l'électricité et dessaler de l'eau de mer.

Nous avons tout d'abord commencé par simuler un système solaire thermique basé sur des collecteurs cylindro-paraboliques, puis nous avons synthétisé une nouvelle commande prédictive continue et nous l'avons appliqué sur ce système. La commande a montré de bonnes performances et une grande robustesse vis-à-vis des perturbations. Cette dernière trouve sa place parmi l'ensemble des commandes synthétisées pour ce système.

Nous nous sommes intéressés par la suite à la modélisation d'un procédé de dessalement par contact membranaire direct, le modèle dynamique proposé simule dans un plan la dynamique de la température à l'intérieur de la membrane. Ainsi nous avons pu élaborer une stratégie de commande pour optimiser la production d'eau douce. Cette technologie étant très récente, et par conséquent peu de travaux ont été effectués dans ce sens. Cette modélisation constitue, donc, un apport aux travaux récents effectués.

Nous avons réuni les deux procédés et ainsi produit de l'électricité à partir de l'énergie solaire thermique. Nous avons, également, utilisé l'excédent de chaleur pour le dessalement de l'eau. Cette nouvelle vision des centrales solaires thermiques permet l'amélioration du rendement de ce type de centrales et ainsi promouvoir leurs expansions.

Nous avons pu, par la présente étude, déterminer non seulement le potentiel de l'Algérie à accueillir ces deux technologies, mais aussi démontré l'intérêt qu'elle a à investir dans un tel projet eu égale à son couts compétitifs et au caractère renouvelable de l'énergie utilisée.

De même, on pourrait maintenant envisager plusieurs prolongements à cette étude, notamment les possibilités suivantes:

- D'utiliser directement de la vapeur d'eau dans tout le circuit du système solaire thermique dans un procédé appelé (Direct Steam Generation).
- D'étudier la solution compacte qui consiste à utiliser directement le système solaire thermique sans produire de l'électricité et donc sans passer par un échangeur de chaleur.

# Référence bibliographique

---

- [1] E.F. Camacho et al., *Control of Solar Energy Systems, Advances in Industrial Control*, DOI 10.1007/978-0-85729-916-1\_1, Springer Verlag London Limited. (2012)
- [2] Camacho, E.F., Berenguel, M., Alvarado, I., Limón, D.: *Control of solar power systems: a survey*. In: Proc. of the 9th Int. Symp. On Dynamics and Control of Process Systems, DYCOPS, Leuven, Belgium, (2010).
- [3] D. Mill: *Advances in solar thermal electricity technology*. Solar Energy 76 19–31. (2004)
- [4] A.J. Gallego , E.F. Camacho : *Estimation of effective solar irradiation using an unscented Kalman filter in a parabolic-trough field*. Solar Energy 86 3512–3518.(2012)
- [5] Camacho, E., Rubio, F., Hughes, F., *Self-tuning control of a solar power plant with a distributed collector field..* E Control Systems 0272-1708/92/, 72–78. (1992)
- [6] Rato, L., Silva, R., Lemos, J., Coito, F., *Multirate musmar cascade control of a distributed solar field*. In Proceedings of the European control conference (1997).
- [7] Camacho, E., Berenguel, M., & Rubio, F. *Advanced control of solar plants*. Berlin: Springer. (1997)
- [8] Silva, R., Rato, L., & Lemos, J. *Time scaling internal state predictive control of a solar plant*. Control Engineering Practice, 11(12), 1459–1467. (2003).
- [9] Berenguel, M., & Camacho, E. *Frequency-based adaptive control of systems with antiresonance modes*. Control Engineering Practice, 4(5), 677–684.(1996)
- [10] Camacho, E., Berenguel, M., & Bordons, C. *Adaptive generalized predictive control of a distributed collector field*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2, 462–467. (1994).
- [11] Camacho, E., Berenguel, M. & Rubio, F. *Application of a gain scheduling generalized predictive controller to a solar power plant*. Control Engineering Practice, 2(2), 227–238. (1994).
- [12] Henriques, J., Cardoso, A., & Dourado, A. *Supervision and cmeans clustering of pid controllers for a solar power plant*. International Journal of Approximate Reasoning, 22(1–2), 73–91. (1999).
- [13] Johansen, T., Hunt, K., & Petersen, I. *Gain-scheduled control of a solar power plant*. Control Engineering Practice, 8(9), 1011–1022. (2000).
- [14] Meaburn, A., & Hughes, F. *Prescheduled adaptive control scheme for resonance cancellation of a distributed solar collector field*. Solar Energy, 52(2), 155–166. (1994).
- [15] Pickhardt, R. *Adaptive control of a solar power plant using a multimodel control*. IEE Proceedings Theory and Applications, 147(5), 493–500. (2000a).
- [16] Barao, M., Lemos, J., & Silva, R. *Reduced complexity adaptative nonlinear control of a distributed collector solar field*. Journal of Process Control, 12, 131–141. (2002).
- [17] Cirre, C., Valenzuela, L., Berenguel, M., & Camacho, E. *Feedback linearization control for a distributed solar collector field*. In Proceedings of the 16th IFAC world congress. (2005)
- [18] Igreja, J., Lemos, J., Barao, M., & Silva, R.. *Adaptive nonlinear control of a distributed collector solar field*. In Proceedings of the European control conference. (2003)
- [19] Igreja, J., Lemos, J., Barao, M., & Silva, R. *Adaptive receding horizon control of a distributed collector solar field*. In Proceedings of the 44th IEEE conference on decision and control, and the European control conference (pp. 1282–1287). (2005).
- [20] Johansen, T., & Storaas, C. *Energy-based control of a distributed solar collector field*. Automatica, 38(7), 1191–1199. (2002).

# Référence bibliographique

---

- [21] Pickhardt, R.. *Nonlinear modelling and adaptive predictive control of a solar power plant*. Control Engineering Practice, 8(8), 937–947. (2000b)
- [22] Silva, R., Lemos, J., & Rato, L. *Variable sampling adaptive control of a distributed collector solar field*. IEEE Control Systems Technology, 11(5), 765–772. (2003).
- [23] Silva, R., Rato, L., & Lemos, J. *Observer based non uniform sampling predictive controller for a solar plant*. In Proceedings of the 15th IFAC world congress. (2002)
- [24] Cirre, C., Moreno, J., & Berenguel, M. *Robust QFT Controller of a Solar Collector Field*. CIEMAT Ed., pp. 27–35. (2003).
- [25] Ortega, M., Rubio, F., & Berenguel, M. *An hinf controller for a solar power plant*. In Proceedings of the IASTED international conference on control. (1997).
- [26] Cardoso, A., Henriques, J., & Dourado, A. *Fuzzy supervisor and feedforward control of a solar power plant using accessible disturbances*. In Proceedings of the European Control Conference ECC99. (1999).
- [27] Flores, A., Saez, D., Araya, J., Berenguel, M., & Cipriano, A. *Fuzzy predictive control of a solar power plant*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 13(1), 58–68. (2005).
- [28] Juuso, E., Balsa, P., & Valenzuela, L. *Multilevel linguistic equation controller applied to a 1mwh solar power plant*. In Proceedings of the 1998 American control conference (ACC'98) (Vol. 6, pp. 3891–3895). (1998).
- [29] Rubio, F., Berenguel, M., & Camacho, E. *Fuzzy logic control of a solar power plant*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 3(4), 459–468. (1995).
- [30] Sweet, B.: Renewables ranked. IEEE Spectrum. <http://spectrum.ieee.org/energywise/energy/renewables/renewables-ranked> (2011)
- [31] A.J. Gallego n, E.F.Camacho : *Adaptive state-space model predictive control of a parabolic-trough field* . Engineering Practice 20 904–911. (2012)
- [32] Arahal, M., Berenguel, M., & Camacho, E.. *Neural identification applied to predictive control of a solar plant*. Control Engineering Practice, 6, 333–344. (1998)
- [33] Gil, P., Henriques, J., Carvalho, P., Duarte-Ramos, H., & Dourado, A. . *Adaptive neural model-based predictive controller of a solar power plant*. In Proceedings of the IEEE international join conference on neural networks (IJCNN02). (2002)
- [34] Pereira, C., & Dourado, A. *Application of a neuro-fuzzy network with support vector learning to a solar power plant*. In Proceedings of the 15th IFAC world congress. (2002)
- [35] Zambrano, D., Bordóns, C., Garcia-Gabin, W., Camacho, E.F.: *Model development and validation of a solar cooling plant*. Int. J. Refrig. 31, 315–327 (2008)
- [36] Blanco, J., Malato, S.: *Solar Detoxification*. UNESCO, Paris (2004)
- [37] El-Nashar, A.: *The economic feasibility of small solar med seawater desalination plants for remote arid areas*. Desalination 134, 173–186 (2001)
- [38] Zarza, E., Ajona, J.I., León, J., Gregorzew, A., Genthner, K.: *Solar thermal desalination project at the Plataforma Solar de Almeria*. Sol. Energy Mater. 24, 608–622 (1991)
- [39] Kalogirou, S.A.: *Solar thermal collectors and applications*. Prog. Energy Combust. Sci. 30, 231–295 (2004)
- [40] Kalogirou S. *The potential of solar industrial process heat applications*. Appl Energy;76:337–61. (2003)
- [41] Publié par ELYOTHERM . <http://blog.elyotherm.fr/2010/06/solaire-captur-plan-tube-sous-vide.html> (2010)
- [42] [http://www.projetsolaire.com/energie\\_solaire\\_thermique.html](http://www.projetsolaire.com/energie_solaire_thermique.html)

# Référence bibliographique

---

- [43] Zarza, E., Valenzuela, L., León, J., Hennecke, K., Eck, M., Weyers, H.D., Eickhoff, M.: The DISS project: direct steam generation in parabolic troughs. Operation and maintenance experience & update on project status. In: Proc. of ASME Int. Solar Energy Conf.: Forum 2001, Washington, DC, USA, (2001)
- [44] Roth, P., Georgiev, A., Boudinov, H.: Cheap two axis Sun following device. *Energy Convers. Manag.* 46, 1179–1192 (2005)
- [45] Rubio, F.R., Ortega, M.G., Gordillo, F., López-Martínez, M.: Application of a new control strategy for Sun tracking. *Energy Convers. Manag.* 48, 2174–2184 (2007)
- [46] Tor A. Johansen, Kenneth J. Hunt", Idar Petersen : Gain-scheduled control of a solar power plant .*Control Engineering Practice* 8 1011-1022. (2000)
- [47] Brosilow, C., Joseph, B.: *Techniques of Model-Based Control*. Prentice Hall, New York (2002)
- [48] Carmona, R.. Ana´ lisis, modelado y control de un campo de colectores solares distribuidos con sistema de seguimiento en un eje. Ph.D. thesis, Universidad de Sevilla. (1985)
- [49] Ljung, L.: *System Identification, Theory for the User*, 2nd edn. Prentice Hall, Englewood Cliffs (1999)
- [50] Álvarez, J.D., Yebra, L.J., Berenguel, M.: Repetitive control of tubular heat exchangers. *J. Process Control* 17(9), 689–701 (2007)
- [51] Álvarez, J.D., Yebra, L.J., Berenguel, M.: Adaptive repetitive control for resonance cancellation of a distributed solar collector field. *Int. J. Adapt. Control Signal Process.* 23, 331–352 (2009)
- [52] Johansen, T.A., Storaa, C.: An internal energy controller for distributed solar collector fields. In: Martínez, D. (ed.) Proc. of the 2nd Users Workshop IHP Programme, CIEMAT. CIEMAT, Madrid (2002)
- [53] Johansen, T.A., Storaa, C.: Energy-based control of a distributed solar collector field. *Automatica* 38(7), 1191–1199 (2002)
- [54] Silva, R.N., Lemos, J.M., Rato, L.M.: Variable sampling adaptive control of a distributed collector solar field. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 11(5), 765–772 (2003)
- [55] van Willigenburg, L.G., Bontsema, J., Koning, W.L.D., Valenzuela, L., Cirre, C.M.: Direct reduced-order digital control of a solar collector field. In: Martínez, D. (ed.) Proc. of the IHP Programme. Research Results at PSA Within the Year 2003 Access Campaign. CIEMAT. CIEMAT, Madrid (2004)
- [56] van Willigenburg, L.G., Bontsema, J., Koning, W.L.D., Valenzuela, L., Cirre, C.M.: *Digital optimal reduced-order control of a solar power plant*. In: Proc. of UKACC-IEE CONTROL 2004, University of Bath, UK, (2004)
- [57] Camacho, E.F., Rubio, F.R., Berenguel, M., Valenzuela, L.: *A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part I: Modeling and basic control approaches*. *Sol. Energy* 81, 1240–1251 (2007)
- [58] Pereira, C., Dourado, A.: *Application of a neuro-fuzzy network with support vector learning to a solar power plant*. In: Martínez, D. (ed.) Proc. of the 2nd Users Workshop IHP Programme, CIEMAT. CIEMAT, Madrid (2002)
- [59] Pereira, C., Dourado, A.: *Application of a neuro-fuzzy network with support vector learning to a solar power plant*. In: Proc. of the 15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain, (2002)
- [60] Arahall, M.R., Berenguel, M., Camacho, E.F.: *Comparison of RBF algorithms for output temperature prediction of a solar plant*. In: Proc. of CONTROLO'98, Coimbra, Portugal, (1998)
- [61] Berenguel, M., Arahall, M.R., Camacho, E.F.: *Modeling free response of a solar plant for predictive control*. *Control Eng. Pract.* 6, 1257–1266 (1998)
- [62] Camacho, E.F., Berenguel, M., Rubio, F.R.: *Application of a gain scheduling generalized predictive controller to a solar power plant*. *Control Eng. Pract.* 2(2), 227–238 (1994)
- [63] Fabrice Sorin, Lionel Broussard, Pierre Roblin : *Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones*. Techniques de l'ingénieur (2001)
- [64] Michel.hubin : l'énergie solaire. <http://michel.hubin.pagesperso-orange.fr/ecologie/solaire.htm> (2011)
- [65] Alain Hubert. Thermique ou voltaïque ? <http://grandeur-nature.skynetblogs.be/archive/2007/03/11/thermique-ou-voltaïque.html> (2007)

# Référence bibliographique

---

- [66] Quoilin Sylvain : *Les Centrales Solaires à Concentration*. Université de Liège Faculté des sciences appliquées (2007)
- [67] Abderrahmane Hamidat. *Le solaire thermique en Algérie, histoire et perspectives*. Extrait du Portail Algérien des ENERGIES RENOUVELABLES <http://portail.cder.dz/spip.php?article2128> (2012)
- [68] Chauvel A., Leprince P., Barthel. Y. *Manuel d'évaluation économique des procédés*. Paris : Technip, , 565 p. (1976)
- [69] A. Isidori. *Nonlinear control systems*. Springer Verlag, Englewood Cliffs, New York, 3rd edn. Ed., (1995).
- [70] M. Marcelin Dabo. *Commande prédictive généralisée non linéaire à temps continu des systèmes complexes*.these de doctorat. Université de Rouen.(2010)
- [71] F. Ibrahim. *Commande prédictive non linéaire d'un lit mobile simulé*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, (2006).
- [72] L. A. Zadeh & B. H. Whalen. "On optimal control and linear programming". IRE Trans. Aut. Control, Vol. 7, No. 4, pp. 45–46, (1962).
- [73] A. I. Propoi. "Use of LP methods for synthesizing sampled-data automatic systems". Automn Remote Control, Vol. 24, No. 7, pp. 837–844, (1963).
- [74] C. E. García, D. M. Pretz & M. Morari. "Model predictive control : theory and practice – a survey". Automatica, Vol. 25, No. 3, pp. 335–348, (1989).
- [75] E. B. Lee & L. Markus. *Foundations of optimal control theory*. Wiley, (1967).
- [76] S. J. Qin & T. A. Badgwell. "A survey of industrial model predictive control technology". Control Engineering Practice, Vol. 11, pp. 733–764, (2003).
- [77] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud & J. Papon. "Algorithmic control of industrial processes". Proceedings of the Fourth IFAC symposium on identification and system parameter estimation, pp. 1119–1167, (1976).
- [78] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud & J. Papon. "Model predictive heuristic control : Application to industrial processes". Automatica, Vol. 14, pp. 413–428, (1978).
- [79] C. R. Cutler & B. L. Ramaker. "Dynamic Matrix Control – A computer control algorithm". Proceedings joint Automatic Control Conference, (1980).
- [80] D. M. Pretz & R. D. Gillette. "Optimization and constrained multivariable control of a catalytic cracking unit". AIChE National meeting, Houston, Texas ; also Proceedings joint Automatic Control Conference, San Francisco, California, (1979).
- [81] R. E. Kalman. "Contributions to the theory of optimal control". Bulletin de la Société Mathématique de Mexicana, Vol. 5, pp. 102–119, (1960).
- [82] R. E. Kalman. "A new approach to linear filtering and prediction problems". Transactions of ASME Journal of Basic Engineering, Vol. 87, pp. 35–45, (1960).
- [83] C. E. García & A.M. Morshedi. "Quadratic programming solution of dynamic matrix control (QDMC)". Chemical Engineering Communications, Vol. 46, pp. 73–87, (1986).
- [84] P. Grosdidier, B. Froisy & M. Hammann. "The IDCOM-M controller". Proceedings of the 1988 IFAC workshop on model based process control, pp. 31–36, (1988).
- [85] J. B. Froisy & T. Matsko. "IDCOM-M application to the Shell fundamental control problem". AIChE annual meeting, (1990).
- [86] P. Marquis & J. P. Broustail. "SMOC, a bridge between state space and model predictive controllers : application to the automation of a hydrotreating unit". Proceedings of the 1988 IFAC workshop on model based process control, pp. 37–43,(1998).
- [87] C. Yousfi & R. Tournier. "Steady-state optimization inside model predictive control". Proceedings of American Control Conference, pp. 1866–1870, (1991).
- [88] D. C. [DMC]. "Technology overview". Product literature from DMC Corp., (1994).

# Référence bibliographique

---

- [89] Setpoint & I. SMC-IDCOM. "A state-of-the-art multivariable predictive controller". Product literature from Setpoint, Inc., October (1993).
- [90] H. Inc. "RMPCT concepts reference". Product literature from Honeywell, Inc., (1995).
- [91] V. Peterka. "Predictor-based self-tuning control". Automatica, Vol. 20, pp. 39–50,(1984).
- [92] D. W. Clarke, C. Mohtadi & P. S. Tuffs. "Generalized predictive control-part I : the basic algorithm". Automatica, Vol. 23, No. 2, pp. 137–148, (1987).
- [93] H. Demircioglu. *Continuous-time Self-tuning Algorithms*. Thèse de doctorat, Glasgow University, Department of Mechanical Engineering, (1989).
- [94] H. Demircioglu & P. J. Gawthrop. "Continuous-time Generalized Predictive Control". Automatica, Vol. 27, No. 1, pp. 55–74,(1991).
- [95] H. Demircioglu & E. Karasu. "Generalized predictive control. A practical application and comparison of discrete- and continuous-time versions". IEEE Control Systems Magazine, Vol. 20, No. 5, pp. 36–47, (2000).
- [96] Z. Wang, Z. Chen, Q. Sun & Z. Yuan. "Robust Stability Analysis of CGPC". Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, China, pp. 324–328, (2006).
- [97] D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao & P. O. M. Scokaert. "Constrained model predictive control : stability and optimality". Automatica, Vol. 26, No. 6, pp. 789–814,(2000).
- [98] S. Lall & K. Glover. *A game theoretic approach to moving horizon control*. Oxford University Press,(1994).
- [99] R. Blauwkamp & T. Basar. "A receding-horizon approach to robust output feedback control for nonlinear systems". Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 5, pp. 4879–4884, (1999).
- [100] F. Allgöwer, R. Findeisen & Z. K. Nagy. "Nonlinear Model Predictive Control : From Theory to Application". J. Chin. Inst. Chem. Engrs., Vol. 35, No. 3, pp. 299–315, (2004).
- [101] J. P. Corriou. *Commande prédictive des procédés*. Lavoisier Tec & Doc, Paris,(2003).
- [102] W. H. Chen, D. J. Ballance & J. O'Reilly. "Model predictive control of nonlinear systems : computational burden and stability". IEE Proceedings - Control Theory and Applications, Vol. 147, No. 4, (2000).
- [103] D. Q. Mayne & H. Michalska. "Receding horizon control of nonlinear systems". IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 35, No. 7, pp. 814–824, (1990).
- [104] E. Gyurkovics. "Receding horizon control via Bolza-type optimization". Systems and Control Letters, Vol. 35, No. 3, pp. 195–200, (1998).
- [105] I. I. Siller-Alcalá. *Nonlinear Continuous Time Generalized Predictive Control*. Thèse de doctorat, Glasgow University, Faculty of Engineering,. (Supervised by P.J. Gawthrop). 1998
- [106] W. H. Chen. "Predictive control of general nonlinear systems using approximation". IEE Proceedings - Control Theory and Applications, Vol. 151, No. 2, pp. 137–144, (2004).
- [107] M. Mrabet, F. Fnaiech & K. Al-Haddad. "Nonlinear predictive adaptive controllers for nonlinear systems". IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 1, pp. 453–458, (2004).
- [108] W. H. Chen. "Optimal control of nonlinear systems : a predictive control approach". Automatica, Vol. 39, No. 1, pp. 633–641, (2003).
- [109] W. H. Chen, D. J. Ballance & P. J. Gawthrop. "Analytic approach to generalised predictive control of nonlinear systems". IEE Two Day Workshop on Model Predictive Control : Techniques and Applications - Day 1 (Ref. No. 1999/095), pp. 9/1–9/3, (1999)
- [110] L. Rizzuti *Solar Desalination for the 21st Century*, 271–291. Springer. (2007)
- [111] Cohen G, Skowronski M,Cable R, Morse F, Jaehne CH, Kearney D, et al. Solar thermal parabolic trough electric power plants for electricity utilities in California PIER final project report. California Energy Commission. Available on-line at: <http://www.energy.ca.gov/2005publications/CEC-500-2005-175/CEC-500-2005-175.PDFS>

# Référence bibliographique

---

- [112] Boudghene Stambouli A, Khiat Z, Flazi S, Kitamura Y. *A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues*. Renewable and Sustainable Energy Reviews ; 16:4445–60. (2012)
- [113] T.e. Boukeliia, M.-S. Mecibah Renewable and Sustainable Energy Reviews 21.288–297. (2013)
- [114] Jones W. How much water does it take to make electricity? Available from: [/http://spectrum.ieee.org/energy/environment/how-much-water-does-it-take-to-make-electricity](http://spectrum.ieee.org/energy/environment/how-much-water-does-it-take-to-make-electricity)
- [115] Danis P. *Dessalement de l'eau de mer*. Techniques de l'Ingénieur, J 2700, p15 . (2003)
- [116] TATA-DUCRU.F. *Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes*. Disponible en ligne sur : [www.vacuum-guide.com/process.../dessalement-eau-de-mer.pdf](http://www.vacuum-guide.com/process.../dessalement-eau-de-mer.pdf) (2009).
- [117] L. Rizzuti .Banat.F, Qiblawey.H. *Solar Desalination for the 21st Century*, 271–291. Springer. (2007)
- [118] *Les techniques membranaires à gradient de pression* ADEME/DABEE/Département Industrie et Agriculture .Disponible en ligne sur : [www2.ademe.fr/servlet/getBin?name...pdf](http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name...pdf) (2006)
- [119] C.H. Lee, W.H. Hong, *Effect of operating variables on flux and selectivity in sweeping gas membrane distillation for dilute aqueous isopropanol*, Journal of Membrane Science 188, 79–86, Elsevier, Amsterdam (2001).
- [120] M. Qtaishat, T. Matsuura, B. Kruczek, M. Khayet, *Heat and mass transfer analysis in direct contact membrane distillation*, Desalination.219 272-292. (2008)
- [121] Saffarini, R.B.; Summers, E.K.; Arafat, H.A.; Lienhard, V.J.H. *Economic evaluation of stand-alone solar powered membrane distillation systems*. Desalination, 299, 55–62. (2012)
- [122] American Membrane Technology Association (AMTA). Membrane desalination costs. In *Fact Sheets*; AMTA: Stuart, FL, USA, (2007).
- [123] Younos, T. The economics of desalination. *J. Contemp. Water Res. Educ.*, 132, 39–45. (2005)
- [124] Schofield, R.W.; Fane, A.G.; Fell, C.J.D. *Heat and mass transfer in membrane distillation*. J. Membr. Sci., 33, 299–313. (1987).
- [125] Sirkar, K.K.; Li, B. *Novel Membrane and Device for Direct Contact Membrane Distillation-Based Desalination Process: Phase III*; Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No. 99; Bureau of Reclamation: Denver, CO, USA.162. (2008).
- [126] Lucy Mar Camacho , Ludovic Dumée , Jianhua Zhang , Jun-de Li , Mikel Duke , Juan Gomez and Stephen Gray. *Advances in Membrane Distillation for Water Desalination and Purification Applications*. Water, 5, 94-196 , (2013)
- [127] Z. Lei, B. Chen, Z. Ding, *Membrane distillation*, in: Z. Lei, B. Chen, Z. Ding (Z. Lei, B. Chen, Z. Dings), *Special Distillation Processes*, Elsevier Science, Amsterdam, , pp. 241-319. (2005)
- [128] L. Martinez-Diez, F. J. Florido-Diaz, M. I. Vazquez-Gonzalez, *Study of evaporation efficiency in membrane distillation*, Desalination. 126 193-198. (1999)
- [129] M. Qtaishat, T. Matsuura, B. Kruczek, M. Khayet, *Heat and mass transfer analysis in direct contact membrane distillation*, Desalination. 219272-292. (2008)
- [130] L. Martinez-Diez, M. I. Vazquez-Gonzalez, F. J. Florido-Diaz, *Study of membrane distillation using channel spacers*, Journal of Membrane Science. 144.45-56 (1998)
- [131] Y. Yao, ed. *Principle of Chemical Engineering*. 1st ed., Tianjin Science Technology Press: Tianjin. 225. (1992)
- [132] J. Zhang, N. Dow, M. Duke, E. Ostarcevic, J.-D. Li, S. Gray, *Identification of material and physical features of membrane distillation membranes for high performance desalination*, Journal of Membrane Science. 349 295-303. (2010)
- [133] H. Kuhn, H.-D. Forstering, *Principles of Physical Chemistry*, Wiley, New York, (2000).
- [134] J. Phattaranawik, R. Jiraratananon, A. G. Fane, *Effect of pore size distribution and air flux on mass transport in direct contact membrane distillation*, Journal of Membrane Science. 215 75-85. (2003)
- [135] K. Schneider, T. J. van Gassel, *Membran destillation*, Chemie Ingenieur Technik. 56514-521. (1984)

# Référence bibliographique

---

- [136] Popescu D. Contribuții la conducerea ierarhizată a instalațiilor din clădiri . Teză de doctorat, U.T.C.B. (1998)
- [137] ASHRAE handbook: *HVAC applications*. Atlanta (GA): ASHRAE, (1999).
- [138] Z. Song, et al., *DCMD flux curve characteristics of cross-flow hollow fiber membrane*, Desalination doi: 10.1016/j.desal.2012.05.005. (2012),
- [139] M. Khayet, C. Cojocaru. *Artificial neural network model for desalination by sweeping gas membrane distillation*. Desalination 308 p102 110 (2013)
- [140] [http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=fr](http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=fr)
- [141] Élisabeth Boillot. *Asservissements et régulations continus.*, Volume 2. Editions TECHNIP, (2002)
- [142] Patrick SIGONNEZ. *Choix d'un débitmètre*. Technique de l'ingénieur. Revue 220. (2006)
- [143] Janos Buzas. Istvan Farkas *Solar domestic hot water system simulation using block oriented software*. Disponible en ligne [http://ptp.irb.hr/upload/mape/kuca/11\\_Janos\\_Buzas\\_SOLAR\\_DOMESTIC\\_HOT\\_WATER\\_SYSTEM\\_SIMULATION\\_USI.pdf](http://ptp.irb.hr/upload/mape/kuca/11_Janos_Buzas_SOLAR_DOMESTIC_HOT_WATER_SYSTEM_SIMULATION_USI.pdf) (2009)
- [144] Tsung-Ching Chen, Chii-Dong Ho, Ho-Ming Yeh. *Theoretical modeling and experimental analysis of direct contact membrane distillation*. Journal of Membrane Science 330 279–287 (2009).
- [145] Badr Bin Ashoora,b, Hassan Fathb, Wolfgang Marquardt , Adel Mhamdi. *Dynamic modeling of direct contact membrane distillation processes*. I.A. Karimi and Rajagopalan Srinivasan (Editors), Proceedings of the 11th International Symposium on Process Systems Engineering, Singapore. 15-19 July (2012)

# Annexes

---

## Annexe A : les différents types d'échangeurs de chaleurs.

---

## Technologies des échangeurs existantes

- **Tube simple.** C'est tout simplement un tuyau (ou une gaine) dans lequel circule un fluide, ce tuyau étant situé dans un autre fluide supposé immobile et à une température uniforme .deux objectifs très différents peuvent être fixés pour l'étude de ce tube :
  - diminuer les échanges, la solution est alors l'isolation
  - augmenter les échanges, c'est-à-dire assurer la fonction échangeur plusieurs solutions sont alors envisageables.
- **Echangeur plan.** Il s'agit du radiateur (refroidissement du moteur d'un véhicule figure I.2) dans lequel un fluide circule généralement à l'aide d'une pompe. Ce radiateur échange avec de l'air supposé constant une température uniforme.



Figure A.1. Échangeur plan

- **Tubes coaxiaux.** Ce système (figure I.3) est constitué de deux tubes concentriques dans lesquels circulent deux fluides dans le même sens ou en sens inverse .les puissances mises en jeu ne sont pas très importantes mais peuvent suffire pour certaines applications.

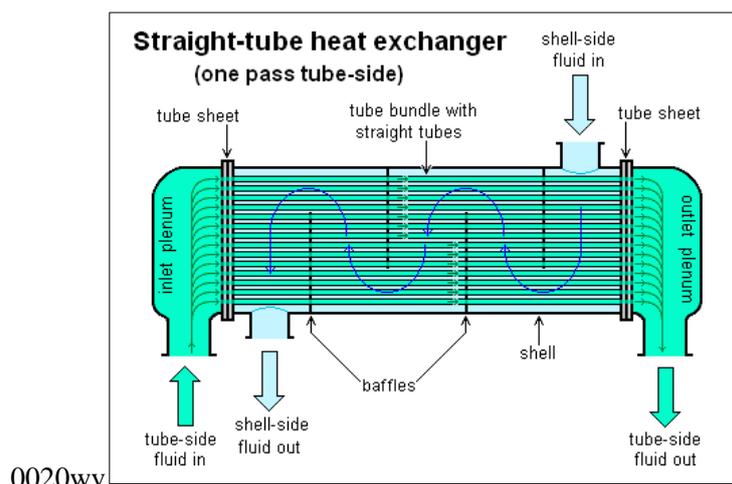
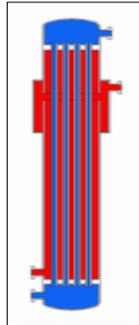


Figure A.2. Échangeur à tubes coaxiaux.

- **Modèle à fiscaux à tubes.** Pour assurer des échanges importants il faut et il suffit que la longueur de tubes soit importante. L'appareil (figure I.4) est constitué d'un faisceau de tubes, disposés à l'intérieur d'une enveloppe dénommée calandre. L'un des fluides circule à l'intérieur

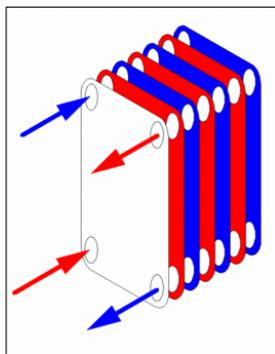
des tubes et l'autre à l'intérieur de la calandre, autour des tubes. On ajoute en général des chicanes dans la calandre, qui jouent le rôle de promoteurs de turbulence et améliorent le transfert à l'extérieur des tubes.



*Figure A.3. Modèle à faisceaux tubes*

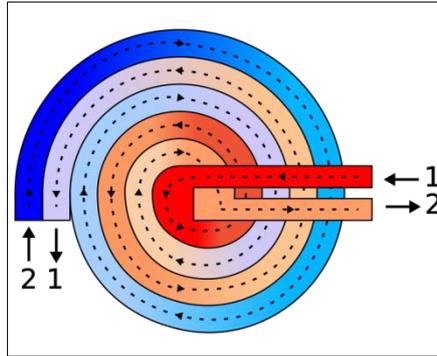
À chaque extrémité du faisceau sont fixées des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en une ou plusieurs passes. La calandre est elle aussi munie de tubulures d'entrée et de sortie pour le second fluide (qui circule à l'extérieur des tubes) suivant le chemin imposé par les chicanes (voir figure).

- **Module à plaques.** Ce système (figure I.5) est couramment rencontré dans le domaine du bâtiment en raison de sa performance et de son faible encombrement. Des plaques métalliques sont empilées entre chaque plaque circule alternativement les deux fluides qui s'échangent par l'intermédiaire de la plaque de la chaleur. On peut ainsi assurer une grande surface d'échange dans un faible volume. Le problème majeur est naturellement d'assurer une bonne étanchéité mais aussi éviter l'encrassement.



*Figure A.4. Échangeur à plaques*

- **Échangeur à spirales.** Un échangeur à spirales (figure I.6) consiste en deux plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale pour former une paire de canaux en spirale. Il est utilisable pour les liquides visqueux ou pour les mélanges liquide-solide et possède une capacité autonettoyante garantissant un encrassement réduit par rapport à l'échangeur à faisceau tubulaire. Il ne peut travailler qu'avec des différences de températures et de pression limitées.



*Figure A.5. Échangeur à spirales.*

## Annexe B : les différents types de débitmètres.

---

## Technologies des débitmètres existantes :

Parmi les débitmètres en conduite fermée :

- les débitmètres plein diamètre (full bore en anglais), qui donnent une mesure globale de l'écoulement, correspondant à l'intégrale de la distribution des vitesses sur une section droite ;
- les débitmètres à insertion, qui mesure la vitesse de l'écoulement en un point, ou en plusieurs points repartis suivant une transversale.
  
- **Débitmètres de type déprimogène.** Il convient en outre de présenter un regroupement des débitmètres exploitant directement une mesure de pression différentielle selon la loi de Bernoulli ; leur indication de débit est en effet liée à la racine carrée de cette pression différentielle.
  
- **Débitmètre à flotteur ou à section variable.** Communément appelé Rotamètre (de la société Rota), c'est un tube de section croissante qui renferme un flotteur (ou ludion) dont la hauteur d'ascension s'accroît avec le débit, sous l'effet de la pression différentielle générée autour de ce flotteur. Le débitmètre à flotteur étant étalonné par type et avec le fluide, sa dynamique de mesure atteint 10:1. C'est le plus souvent un indicateur de débit.
  
- **Débitmètre à turbine.** Il consiste en une hélice qui tourne sous l'effet du courant du fluide. Le débit est mesuré par un capteur d'impulsions générées au passage de l'hélice devant une bobine.
  
- **Compteur volumétrique.** Le compteur volumétrique existe en de nombreuses variantes, consistant toutes à scinder l'écoulement en éléments discrets de volume et à compter le nombre d'éléments engendré par unité de temps. Le compteur à roue ovale en est une variante bien connue. Il existe aussi des modèles à roues dentées, à membrane, à piston alternatif ou rotatif. Notons également la possibilité de comptage avec des compteurs à turbine, essentiellement dans le domaine du comptage transactionnel, et avec des compteurs à ultrasons.
  
- **Débitmètre électromagnétique.** Le débitmètre électromagnétique est fondé sur le principe de Faraday : un champ magnétique est appliqué à l'écoulement et le fluide est l'équivalent d'un conducteur en mouvement ; il en résulte l'apparition d'une force électromotrice qui est collectée sur deux (ou quatre : on a alors deux canaux de mesure) électrodes. Il va de soi que le liquide doit être un minimum conducteur.
  
- **Débitmètre à effet vortex.** Le débitmètre à effet vortex est fondé sur l'effet Karman, par lequel un obstacle placé dans un fluide en écoulement turbulent, génère en aval un régime oscillatoire (comme un drapeau qui flotte au vent) dont la fréquence de détachement des tourbillons (vortex) est liée à la vitesse de l'écoulement. Le capteur est constitué soit d'un détecteur à cristaux piézoélectriques soit d'un détecteur capacitif différentiel.
  
- **Débitmètres à ultrasons.** Deux principes existent. Le débitmètre à ultrasons à temps de transit est fondé sur la différence des temps de parcours aller-retour d'un faisceau d'ultrasons

de trajet oblique par rapport à l'axe de la conduite, selon que la vitesse de l'écoulement s'ajoute ou se retranche de la vitesse de propagation du son dans le fluide au repos. Le fluide doit être propre. Le débitmètre à ultrasons à effet Doppler est fondé sur la variation de la fréquence de l'onde sonore réfléchi sur les particules en mouvement dans le fluide par rapport à la fréquence de l'émetteur.

- **Débitmètre massique.** On distingue les types suivants.
  - **Les débitmètres thermiques** à capacité thermique ou à convection thermique :
    - ✓ le débitmètre à capacité thermique chauffe son tube de mesure. La température en amont et en aval du chauffage est mesurée : la différence de température est proportionnelle au débit massique ;
    - ✓ le débitmètre à convection thermique est constitué d'un élément chauffé et d'un élément de mesure de température. Par convection forcée, le fluide prélève la puissance thermique de l'élément chauffé. Le débit massique est proportionnel à la puissance thermique fournie à l'élément chauffé pour le maintenir à température constante.
  - **Le débitmètre à effet Coriolis**, utilisable sur liquides, gaz sous certaines conditions et pour des solides, est fondé sur la mesure de la force de Coriolis. Dans le cas de fluides, un ou deux tubes vibrent à une fréquence connue. Deux capteurs mesurent la déformation du ou des tubes provoquée par le fluide soumis à la force de Coriolis.

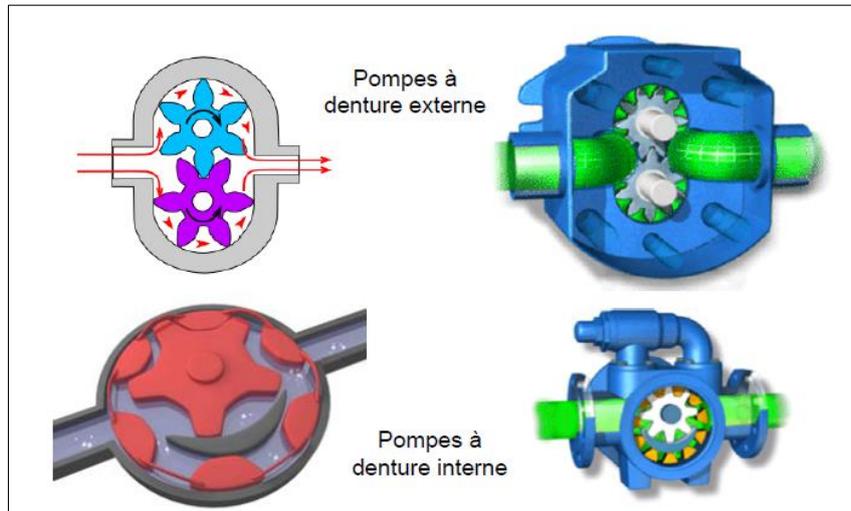
**Le débitmètre laminaire** utilise la loi de Poiseuille qui détermine, à partir de la mesure de la pression différentielle et de la viscosité du fluide, le débit massique.

## Annexe C : les différents types de pompes.

---

## Types de pompes

- **Pompes à engrenages.** Les pompes à engrenages utilisent le profil combiné de deux roues dentées pour transvaser et augmenter la pression d'un fluide. Elles sont exclusivement utilisées avec des liquides. On distingue deux types de pompes à engrenages : "simples" et "internes".



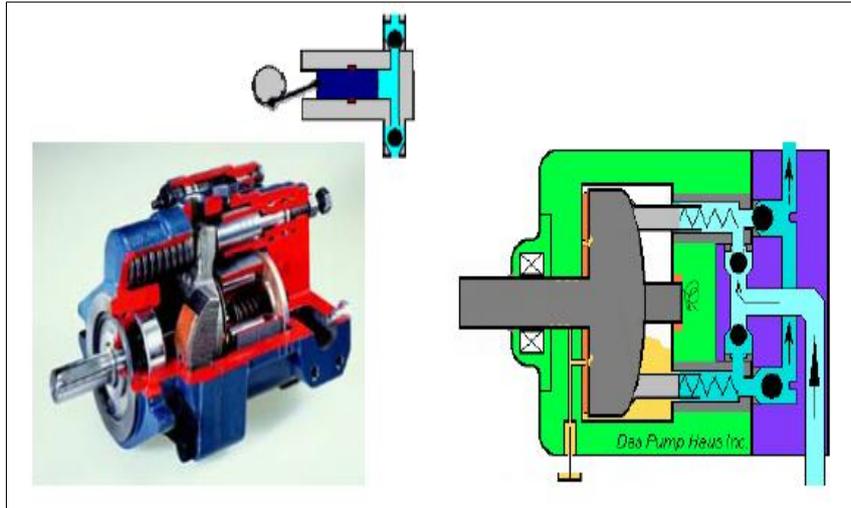
*Figure C.1. Pompes à engrenages.*

- **Pompe à palettes.** Basée sur l'utilisation de palettes (aubes) qui, sous l'action des forces centrifuges, coulisent radialement dans des rainures portées par le rotor. Le fluide est entraîné dans les cellules formées par l'excentricité entre le rotor et la couronne.



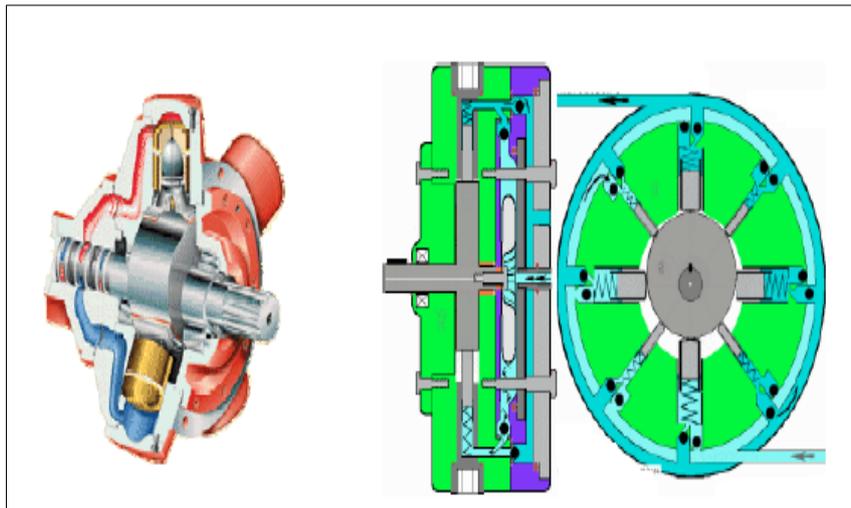
*Figure C.2. Pompe à palettes.*

- **Pompe à pistons axiaux.** Ce type de pompe basée sur des pistons dont la course est parallèle à l'axe de rotation. Le sens du débit est maintenu par des clapets anti-retour.



*Figure C.3. Pompes à pistons axiaux.*

- **Pompe à pistons radiaux.** Pompe basée sur des pistons dont la course est perpendiculaire à l'axe de rotation. La course des pistons est provoquée par une came excentrique ou un vilebrequin.



*Figure C.4. Pompes à pistons radiaux.*