

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE DE TISSEMSILT  
INSTITUT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Visa du chef de département des  
Sciences et de la Technologie  
Signature:.....  
Date :.....

## **Étude et analyse technico-économique d'une centrale hybride (solaire-gaz) à tour de type Brayton éventuellement localisée à Tissemsilt**

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de master académique en «*Installations Energétiques*»

Encadreur: ZEBBAR Djallel,  
Professeur  
Signature: .....  
Date: .....

Réalisé par : AMANI Nourreddine  
Signature: .....  
Date: .....

### Membres du jury

KHERRIS Sahraoui, (Président)  
MCA  
ODRANE Abdellatif, (Examineur)  
MCB  
ZEBBAR Djallel, Prof. (Encadreur)

## **DEDICACE**

*Avec l'aide de dieu tout puissant, j'ai achevé ce  
modeste travail que je dédie :*

*À mes très chers parents*

*À mes frères*

*À tous mes amies : Mohamed, Ilyas, Moussa  
et Zakaria*

*À mes collègues de la promotion de génie  
mécanique.*

.

## **REMERCIEMENTS**

*Je remercie en premier lieu Dieu le tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour terminer ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur ZEBBAR Djallel professeur au centre universitaire de Tissemsilt, pour avoir dirigé ce mémoire, pour son suivi permanent, ses lectures attentives, ses conseils judicieux et le soutien constant qu'il nous a prodigué au cours de l'élaboration de ce travail.*

*Aux membres de jury mes plus vifs remerciements d'avoir accepté et examiner mon travail.*

*Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à mes enseignants de centre universitaire de Tissemsilt.*

*En fin je tiens à remercier tous ceux qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce modeste travail*

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	10
<b>Chapitre 01: Généralité sur les centrales solaires et recherche bibliographique</b>	
Introduction.....	14
1 .1 Aperçu sur les centrales thermiques.....	14
1.1.1 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz.....	14
1.1.2 Les éléments d'une turbine à gaz.....	14
1.2 Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur.....	15
1.3 Les systèmes de concentration.....	15
1.4 Les centrales à tour.....	16
1.5 Fluide caloporteur et récepteur solaire.....	17
1.6 Systèmes.....	18
1.7 Cycles combinés.....	19
1.8 Recherché bibliographique.....	20
<b>Chapitre 02: Les centrales à tour et les projets pilotes. Rappel sur le principe des liaisons graphiques</b>	
Introduction.....	24
2.1Technologie à tour (héliostat).....	24
2.2 Fluides caloporteurs et fluides de travail.....	25
2.2.1 Les fluides organiques.....	25
2.2.2 L'eau liquide.....	25
2.2.3 Les gaz.....	25
2.2.4 L'air.....	25
2.3 La réception du rayonnement.....	25
2.3. 1 Le récepteur à eau-vapeur.....	25
2.3. 2 Le récepteur à sel fondu.....	26
2.3. 3 Le récepteur à métal fondu.....	27
2.3. 4 Le récepteur à air.....	27
2.4 Aperçu sur les projets pilotes et ambitieux.....	28
2.4.1 Les projets pilotes.....	28
2.4.2 Les projets ambitieux.....	29
2.4.2.1 Plan solaire méditerranéen (PSM).....	29
2.4.2.2 Medgrid.....	29
2.4.2.3 Desertec.....	29
2.4.2.4 L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE).....	29
2.5 Rappel sur les liaisons graphiques.....	30

2.5.1 Histoire sur liaisons graphiques .....	30
2.5.2 Modélisation en liaisons graphiques ‘bond graph’ .....	30
2.5.3 Construction du modèle.....	30
2.5.4 Le langage des bonds graphiques .....	30
2.5.5 Les éléments de base du langage.....	31
2.5.6 Schématisation d’une centrale à tour suivant le principe de liaisons graphiques .....	31
Conclusion : .....	31
<b>Chapitre 3: L'étude technico-économique</b>	
Introduction .....	34
3.1 Calcul de la puissance en MW en fonction du taux d’hybridation pour une centrale de concentration à tour éventuellement localisée à Tissemsilt.....	34
3.2 Estimation du montant global de l’investissement (MGI) .....	36
3.3 Calcul de total des ventes annuelles d’électricité et Le total de la consommation annuelle de carburant .	37
3.4 Calcul de la fonction d’amortissement .....	38
3.5 Discussions des résultats .....	39
Conclusion :.....	42
<b>Conclusion générale</b> .....	44
<b>Bibliographie</b> .....	45
<b>Résumé</b> .....	47

## Nomenclature

$Q_i$	Le flux incident
$A$	La surface de miroir
$Q_r$	Le flux réfléchi
$\theta$	l'angle de l'inclinées
$C_p$	la capacité calorifique
$P_e$	l a variation de la pression
$Q_m$	le débit de la vapeur
$W_T$	Le travaille de la turbine
$\Delta T$	La variation de la température
$P_c$	Puissance totale du champ [MW]
$C_{fs}$	Facteur de capacité mode hybride [%]
$C_{hyb}$	Facteur de capacité mode solaire [%]
$MGI$	Montant global de l'investissement Euro [€]
$P_{vu}$	Prix de vente unitaire [€/kWh]
$T_{pa}$	Puissance produite annuelle [MWh]
$T_{va}$	Total des ventes annuelles d'électricité [€]
$TH$	Le taux d'hybridation
$CC$	Capital d'investissement [€/kw]
$TCAC$	Le total de la consommation annuelle de carburant [€]
$Am$	La fonction d'amortissement

## Liste des figres

Fig.1–: les éléments d'une turbine à gaz .....	14
Fig.2– Schéma d'une turbine à vapeur .....	15
Fig.3 – Les systèmes de concentration .....	16
Fig.4– Configuration typique d'un système de tour solaire à sels fondus .....	17
Fig.5– Centrale solaire à Barstow, California .....	18
Fig.6– Schéma principe d'une centrale hybride .....	19
Fig.7– Schéma d'une centrale solaire à cycle combiné .....	19
Fig.8– La technologie de la centrale à tour .....	24
Fig.9– Un système à eau-vapeur .....	26
Fig.10– Un système à sel fondu. ....	27
Fig.11– Un système à caloporteur air.....	28
Fig.12– Schématisation d'une centrale à tour suivant le principe de liaisons graphiques ... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Fig.13– La fonction amortissement en fonction des différents taux d'hybridation pour un prix de vente unitaire (Pvu) égale à 16 c€ et capital d'investissement (CCsolaire) égale à 2500 €/kWh.....	39
fig.14– La variation de la fonction amortissement d'une centrale à 100% solaire en fonction des années d'exploitation et des capitaux d'investissement CC égaux à (1000, 1500, 2000, 2500 et 3500 €/kWh) pour un prix de vente unitaire égal à 16 c €. ....	40
Fig.15– La variation de la fonction amortissement d'une centrale à 100% solaire en fonction des années d'exploitation et des prix de vente unitaire égaux à 8.7, 14.9 et 16 c€ et un capital d'investissement égal à 2500 €/kWh.....	41
Fig.16 – La variation de la fonction amortissement d'une centrale conventionnelle (TH=0% ) en fonction des années d'exploitation et des prix de vente unitaire égaux à 8.7, 14.9 et 16 c€ et un capital d'investissement égal à 2500 €/kWh.....	41

<b>Liste des tableaux</b>	<b>Page</b>
Tableau 1 : la puissance en MW pour le champ solaire en fonction du taux d'hybridation	37
Tableau 2 : calcul du montant global de l'investissement en fonction du taux d'hybridation	38
Tableau 3 : évaluation du total de la consommation annuelle de carburant en fonction du taux d'hybridation	39
Tableau.4 : Exemple d'évaluation de la fonction amortissement pour le cas d'une centrale avec 10% d'hybridation	40



# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## **Introduction générale**

Le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique. Le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par les sources d'énergies fossiles, motivée par des considérations économiques. D'autres facteurs comme les émissions de CO<sub>2</sub>, le caractère limité de nos réserves fossiles, et l'indépendance énergétique nationale n'ont pas été pris en compte.

L'énergie solaire est source d'énergie renouvelable et propre. Un nombre important de travaux de recherche est consacré aux systèmes solaires thermodynamiques. Ces derniers consistent à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi du travail mécanique ou de l'électricité.

Le potentiel des systèmes solaires thermodynamiques est très important dans les régions à ensoleillement intense. À la fin des années 1970, des projets pilotes de centrales solaires avaient vu le jour aux États-Unis, en Russie, au Japon et en Europe. Aujourd'hui, la technologie de concentration solaire thermodynamique a considérablement évolué et de nombreux projets sont en cours d'étude et d'autres en phase de réalisation. Dans ce contexte, la promotion de la filière des énergies renouvelables et plus particulièrement de la filière thermique solaire est très prometteuse. Le présent travail s'aligne sur les mêmes objectifs susmentionnés. Il est consacré à l'étude et technico-économique d'une centrale hybride à tour de type Brayton solaire-gaz éventuellement localisée à Tissemsilt.

La centrale proposée et étudiée continuera à produire de la puissance mécanique même si l'énergie solaire n'est pas disponible. Elle fonctionnera au gaz naturel pendant les périodes nuageuses ou en fin de journée afin d'assurer une production continue. En plus de la l'étude de faisabilité technique du système, une autre technico-économique est aussi effectuée. Cette dernière permettra de déterminer pour les différents taux d'hybridation d'autres paramètres importants comme le délai d'amortissement, le capital total d'investissement et le prix de revient unitaire du kWh.

Le présent mémoire est composé d'une introduction générale, trois chapitres et une conclusion générale structurés comme suite :

Le premier chapitre est consacré aux centrales solaires thermiques de concentration et ses auxiliaires. Il traite du principe de fonctionnement des différents types de centrales rapportés dans les différentes ressources bibliographiques, suivi par un exposé de leurs principes de fonctionnement et leurs histoires en bref.

Le deuxième chapitre vient compléter le premier sur les centrales de concentration en exposant minutieusement les principes de base de fonctionnement des centrales à tour, leurs éléments (récepteurs, fluides caloporteurs,..etc.). Cette première partie est suivie par un exposé sur les projets pilotes de centrales à tour réalisés un peu partout dans le monde. Enfin, dans sa dernière partie, le chapitre traite du principe des liaisons graphiques ‘’ bond Graphic’’ utilisé comme base dans les travaux de modélisation.

Par ailleurs, le troisième chapitre est consacré à l’étude technico-économique du champ de concentration solaire hybride à tour. Elle a permis de déterminer pour un projet de tour solaire implanté éventuellement à Tissemsilt et pour les différents taux d’hybridation d’autres paramètres importants comme le délai d’amortissement, le capital total d’investissement et le prix de revient unitaire du kWh.

Enfin, les conclusions et les recommandations les plus importantes sont rapportées dans le dernier volet du mémoire dédié à la conclusion générale.

Chapitre 01  
Généralité sur  
les centrales solaires  
et recherche  
bibliographie



## Introduction

Ce chapitre est consacré aux centrales solaires thermiques de concentration et ses auxiliaires. Il traite du principe de fonctionnement des différents types de centrales rapportés dans les différentes ressources bibliographiques.

### 1.1 Aperçu sur les centrales thermiques

#### 1.1.1 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante (Fig.1): de l'air est extrait du milieu environnant pour être comprimé à une pression plus élevée. Ensuite, l'air passe par la chambre à combustion où mélangé au carburant subira une combustion isobare. Les gaz de combustion sont acheminés à pression et température élevées vers la section de la turbine, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre. Ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie utile à la machine conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement et, de l'autre côté à fournir l'énergie nécessaire pour la compression de l'air, qui a lieu dans un compresseur relié directement à la section turbine. Les produits de combustion à basse pression et température sont déchargés à l'atmosphère.

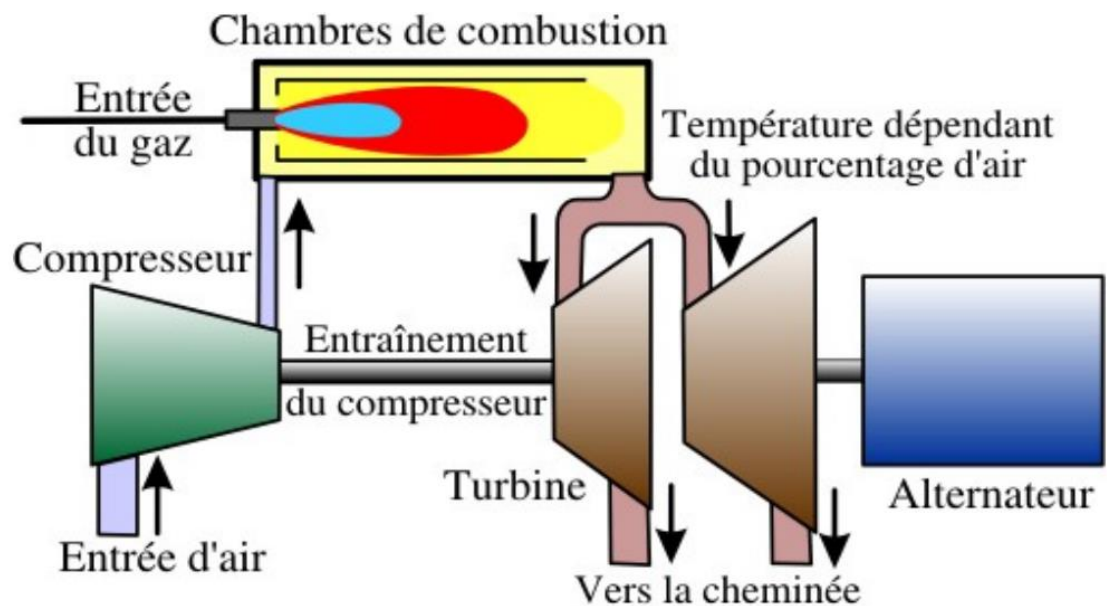


Fig.1-: les éléments d'une turbine à gaz [5,6]

#### 1.1.2 Les éléments d'une turbine à gaz

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue, une turbine à gaz est composée de trois éléments:

- un compresseur, centrifuge ou plus généralement axial, qui a pour rôle de comprimer de l'air ambiant à une pression comprise aujourd'hui entre 10 et 30 bars environ,

- une chambre de combustion, dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement,

-une turbine, généralement axial, dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion. [5,6]

### 1.2 Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau. Ce cycle comprend au moins les étapes suivantes: l'eau liquide est mise en pression par une pompe et est envoyée vers la chaudière (Fig.2) où elle est transformée en vapeur après avoir été chauffée, vaporisée et surchauffée. Ensuite cette vapeur se détend et se refroidit dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique. Enfin, la vapeur détendue est condensée au contact de la source froide sous vide partiel. [4]

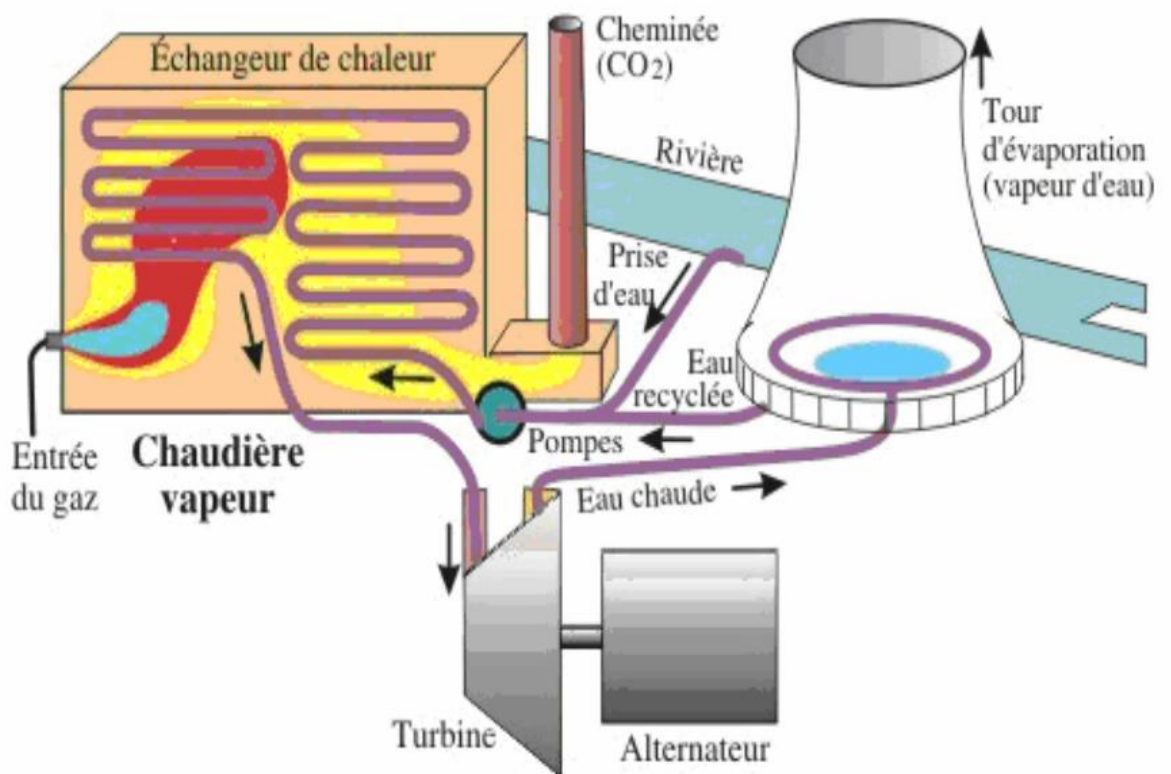


Fig.2– Schéma d'une turbine à vapeur [5,6]

### 1.3 Les systèmes de concentration

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer, via des miroirs réflecteurs, pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel. Le récepteur absorbe l'énergie réfléchi par le miroir et la transfère au fluide thermodynamique. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à celui des concentrateurs ponctuels. [1]

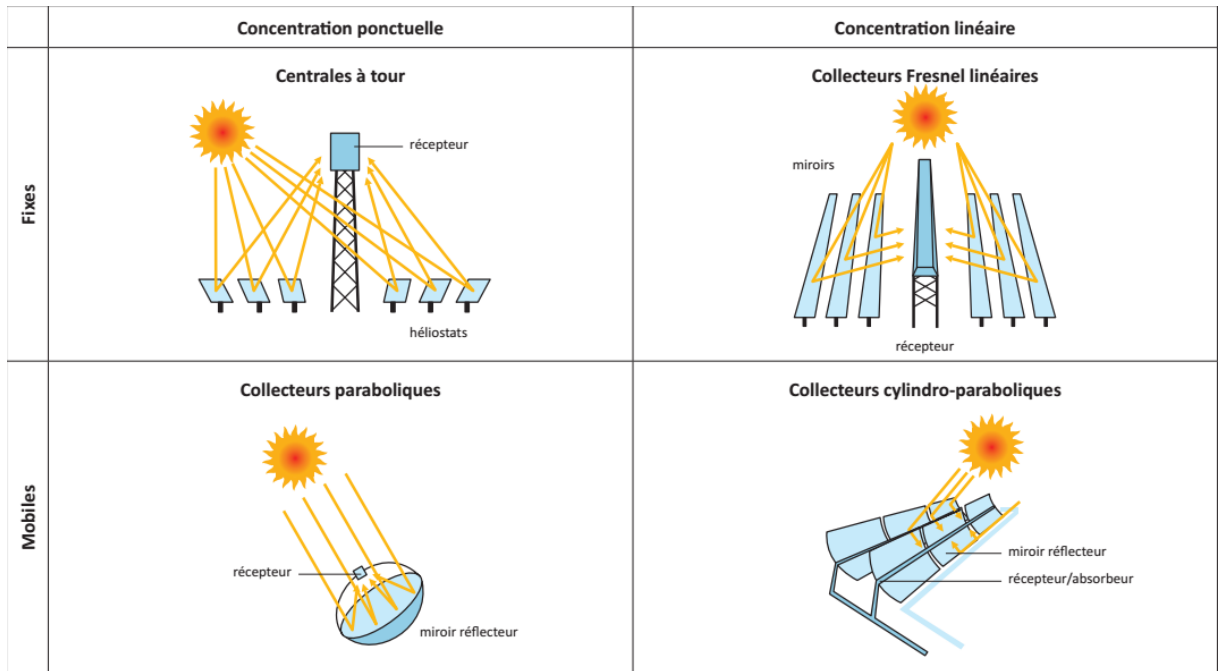


Fig.3 – Les systèmes de concentration [1]

#### 1.4 Les centrales à tour

La centrale solaire à tour rapportée sur la fig.4 empruntée de [2] est constituée de nombre miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour<sup>5</sup>. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration (la surface du miroir sur la surface du récepteur) peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 °c à 1000 °c. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée à la fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines. Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité.

L'avantage de la tour solaire par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques est que les pertes à l'ambiance sont inférieures car la surface exposée est limitée. [1,2]



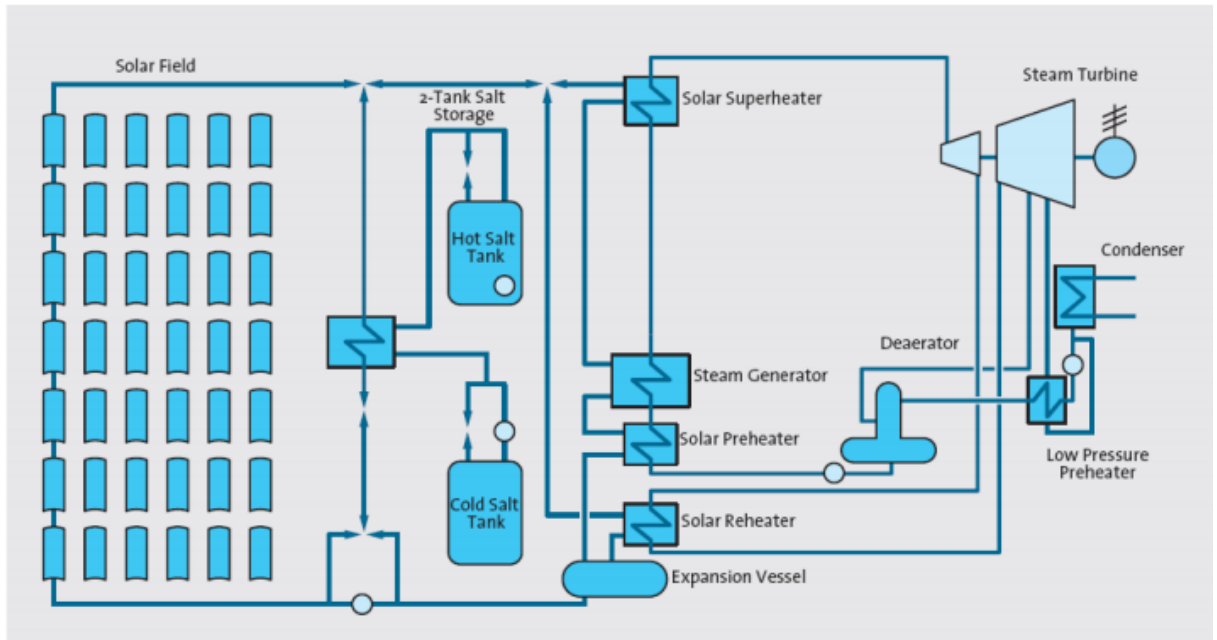


Fig.4– Configuration typique d'un système de tour solaire à sels fondus [2]

### 1.5 Fluide caloporteur et récepteur solaire

Les trois fluides caloporteurs les plus utilisés sont la vapeur d'eau, l'air et les sels fondus. L'installation pilote de Barstow en Californie a utilisé de la vapeur d'eau comme fluide caloporteur de 1982 à 1988. La vapeur d'eau a ensuite été remplacée par des sels fondus, qui ont l'avantage d'être également un moyen de stockage de l'énergie calorifique. Les premières approches utilisaient des faisceaux de tubes en acier au sommet de la tour pour absorber la radiation solaire. Ce concept a bien fonctionné sur l'installation de Barstow avec les sels fondus, mais a montré ses limites sur d'autres installations européennes lorsque l'air est utilisé comme fluide caloporteur. Des surchauffes locales des tubes en acier ont en effet été constatées ainsi que des transferts de chaleurs inadéquats. Un nouveau concept de récepteur à air a alors été mis au point dans le cadre du projet allemand PHOEBUS: le récepteur volumétrique. Ce récepteur utilise un maillage de fils métalliques, directement exposé à la radiation solaire incidente. Le bon fonctionnement de ce système a été validé sur une installation pilote de 2.5 MW à Almeria mais n'est pas encore disponible commercialement. Les températures atteintes sont de l'ordre de 800°C, mais des températures supérieures pourraient être atteintes avec des structures poreuses de SiC ou de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> actuellement en développement. [2]



Fig.5– Centrale solaire à Barstow, California [2]

### **1.6 Systèmes hybrides**

La disponibilité de l'énergie solaire étant intermittente, il n'est pas rentable d'investir dans un champ solaire seul avec sa turbine et son générateur électrique. Le taux d'utilisation du système de génération de puissance en effet très faible et ne justifie pas l'investissement. Afin de mettre à profit le système même quand l'énergie solaire n'est pas disponible, l'installation est généralement hybridée : une unité auxiliaire au gaz ou au pétrole est utilisée pendant les périodes nuageuses ou en fin de journée afin d'assurer une production continue. Une description schématique d'un tel système est disponible à la figure 4. Une autre solution afin d'obtenir un bon taux d'utilisation du bloc de puissance est le stockage de l'énergie thermique par sels fondus. [2]

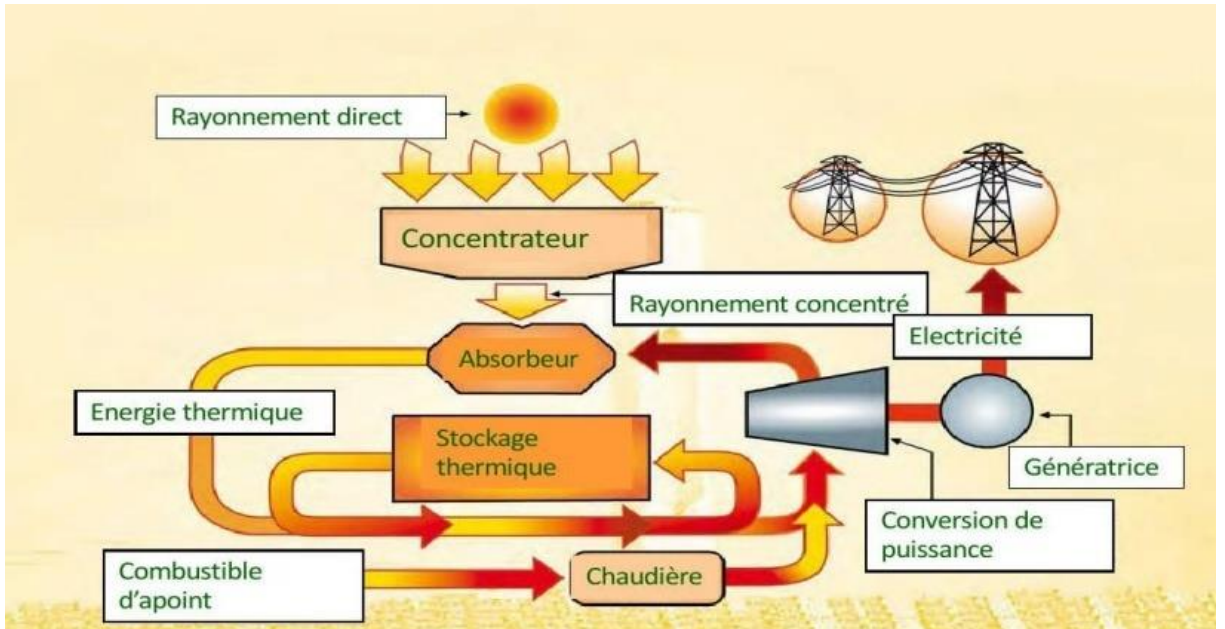


Fig.6– Schéma principe d'une centrale hybride [7]

### 1.7 Cycles combinés

Les hautes températures atteintes dans les tours solaires peuvent être utilisées pour alimenter non seulement un cycle de Rankine, mais aussi une turbine à gaz et un cycle combiné. De tels systèmes pourraient atteindre un rendement peak de 35 % et un rendement annuel solaire-électrique de 25%. Les développements effectués dans les récepteurs volumétriques à air permettent de réchauffer directement l'air dans la tour solaire, à des températures dépassant 800 °C. Ce concept est actuellement développé dans le cadre du projet SOLGATE et semble être une très bonne solution d'avenir pour les centrales solaires. [2]

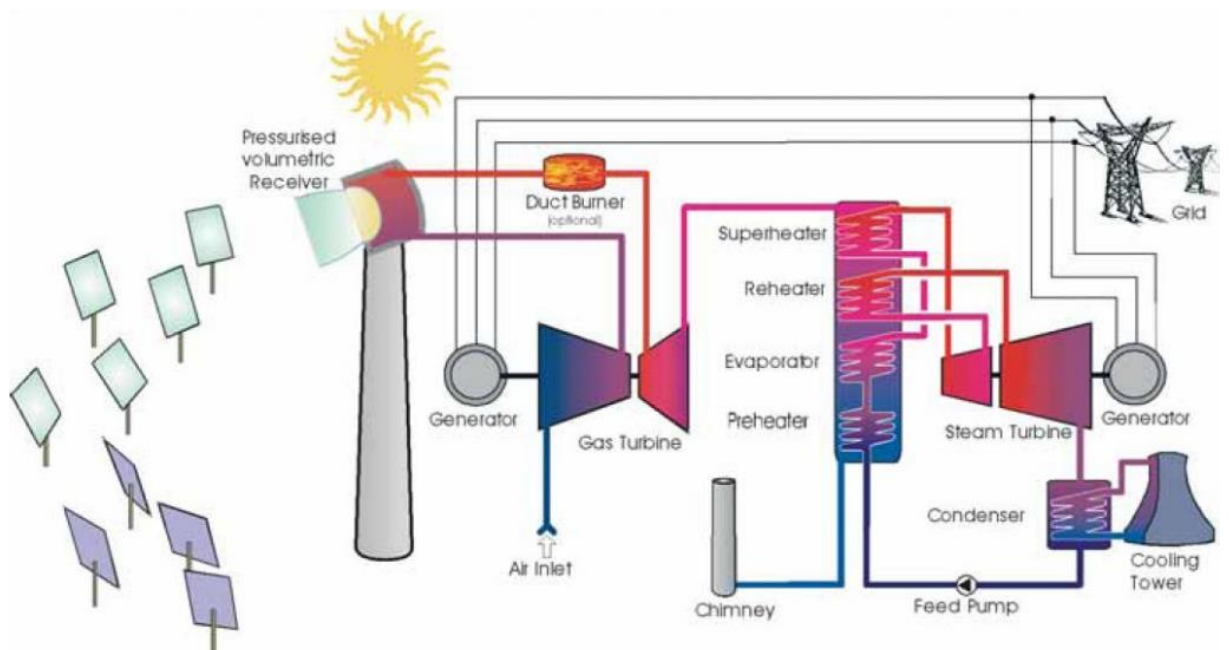


Fig.7– Schéma d'une centrale solaire à cycle combiné [2]

## 1.8 Recherché bibliographique:

Ahmed et al. [17] ont réalisé des travaux de simulation utilisant un récepteur à cavité avec trois géométries différentes: cylindrique, conique et sphérique, d'un récepteur de cavité, dans le but d'analyser leur comportement au moyen d'une méthode avancée de traçage des rayons. Les résultats de cette étude ont montré qu'il existe un lien entre la distribution du flux sur les surfaces internes des cavités et leur efficacité optique.

Des études paramétriques ont été réalisées par Akbari et al. [18] pour les deux cycles à savoir : le cycle supercritique combiné de Rankine et Brayton (supercritique combinée Brayton-SCRB) et le cycle de Rankine organique (ORC) afin d'étudier l'influence sur l'efficacité exergetique, le coût unitaire de revient utilisant le logiciel EES (Engineering Equation Solver). Les résultats obtenus ont révélé l'avantage du SCRB par rapport au ORC en termes de performances thermodynamique et économique.

Dans leur manuscrit [19] Murugan et Horák avaient passé en revue un nombre important d'études récentes consacrées à la production de la micro puissance pour les applications résidentielles de chaleur. Egalement, les mêmes auteurs ont exposé les principales caractéristiques de chaque dispositif de transfert ou de conversion d'énergie utilisé dans les systèmes énergétiques.

Les propriétés thermo physiques des fluides de travail ont été présentées par Benoit et al [20]. Les auteurs ont établis des corrélations pour déterminer les coefficients de transfert de chaleur récepteur-HTF. Dans le même sont proposés les variations des coefficients de transfert de chaleur par convection en fonction de la température pour tous les HTF sélectionnés dans leurs plages de températures de fonctionnement stable.

M.K. Gupta et al. [21] ont représenté dans leur travail une étude détaillée sur les centrales solaires thermiques à concentration solaire disponibles à ce jour comme les systèmes cylindro-paraboliques, les centrales à tour et les systèmes de réflecteur linéaire.

R. Korzynietz et al. présentent dans leur article [22] la première installation hybride solaire de quelques mégawats de puissance fonctionnant avec une turbine à gaz solaire. Ils exposent également les travaux de modernisation effectués sur le projet de Solugas qui cumulait plus de 1000 heures de fonctionnement avec des températures au niveau du récepteur pouvant atteindre les 800 ° C .

Le Roux et al [23] recommandent dans cet article, l'utilisation de la méthode de minimisation de la génération d'entropie totale. Cette méthode peut être utilisée dans la modélisation d'un système solaire à concentration. Les auteurs rapportent sur les diverses perspectives de modélisation requises pour développer la fonction objective optimale. Les auteurs travaillent espèrent développer et élaborer des modèles optimaux de cycle solaire thermique de Brayton dans leurs futures travaux.

Edmund et Amos [24] ont effectué des études d'évaluation sur le développement d'une ST-ISCCS ( la tour solaire avec un système intégré de cycle combiné ) . Les auteurs considèrent que des obstacles existent au développement de la technologie ST-ISCCS. Ces contraintes peuvent être réparties en trois catégories: a) la maturité de la technologique; b) financière et politique; c) facteurs techniques. Ils en concluent que les projets de ST-ISCCS sont immatures et d'avantage d'efforts sont nécessaires pour rendre disponible cette technologique.

Antonio Rovira et al [25] ont effectué une étude détaillée sur les fluides de travail pouvant travailler avec des températures de la source de chaleur très élevées comme certaines fluides non classiques comme le réfrigérant R-125 ou SF6.

S. Sánchez-Orgaz et al [26] proposent une analyse détaillée des pertes observées dans les installations réelles à partir d'un modèle thermodynamique analytique. En commençant par le moteur thermique lui-même jusqu'au sous-système solaire. L'efficacité globale du système et la puissance de sortie ont été prises comme des fonctions objectives se qui a permis de discerner les grandes variables de conception.

Alexander P et al [27] présentent une étude expérimentale sur un cycle thermochimique solaire à deux étapes basé sur les réactions redox  $\text{Co}_3\text{O}_4 / \text{CoO}$  intégré dans un cycle d'air de Brayton. Le cycle à deux étapes englobe (1) la décomposition thermique de  $\text{Co}_3\text{O}_4$  en  $\text{CoO}$  et en  $\text{O}_2$  entraînée par l'énergie solaire et (2) la ré-oxydation de  $\text{CoO}$  avec  $\text{O}_2$  en  $\text{Co}_3\text{O}_4$  avec reconduction de chaleur.

Ricardo Vasquez Padilla et al [28] proposent une analyse détaillée sur l'énergie et l'exergie de quatre différentes configurations pour le cycles Brayton (le Cycle de Brayton Simple, le Cycle de Brayton avec recompression , Refroidissement partiel avec recompression et recompression avec plusieurs compression par refroidissement inter) avec et sans réchauffage.

Mohsen Goodarzi et al [29] ont effectué une étude sur le cycle de Brayton régénératif et le cycle de Brayton inverse a été modifié en contournant partiellement le flux d'air entrant dans régénérateur. L'influence du débit massique de dérivation sur l'efficacité thermique et la puissance de sortie nette a été étudié pour modifié les variétés de rapports de pression des compresseurs.

Gang et al [30] avaient développé un modèle thermodynamique pour déterminer la puissance, le rendement thermique, ainsi que l'efficacité thermo-économique performance d'un système de type brayton d'une cuvette solaire. Les auteurs se sont basés sur optimisation multi-objective, y compris celle à triple et double objectifs en utilisant un algorithme évolutif basé sur NSGA-II(Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm).

Le travail de Brian et al. dans le manuscrit [31] illustre le comportement des turbomachines développés pour le cycle de Brayton en réponse à une Fluctuant, comme les transitoires à court terme expérimentés dans les environnements solaires. L'entrée thermique du cycle a été réduite de

50% et 100% pendant de courtes durées, tandis que la puissance et les conditions du système ont été surveillées. Il a été démontré que malgré ces fluctuations.

### **Conclusion**

Ce chapitre a permis de mettre à l'évidence le fonctionnement des différents types de centrales thermiques de production de puissance. Entre autres, ont été aussi examinés les différents systèmes de concentration solaire thermique. Plusieurs travaux de recherche ont été passés en revue au cours de cette étude. Les plus récents travaux ont révélé l'importance de telles centrales de concentration.

# Chapitre 02

Les centrales à tour et  
les projets pilotes.

Rappelle sur le  
principe des liaisons  
graphiques

## Introduction

Plusieurs types de centrales de concentration solaire thermique existent à ce jour un peu partout dans le monde. Les centrales à tour solaires occupent une position dominante en raison de leur capacité de production importante d'une part, et l'utilisation de technologies classiques déjà maîtrisées comme les cycles à vapeur classique et organique de Rankine (ORC -Organic Rankine Cycle) et les cycles à gaz hautes températures de type Stirling et Brayton.

Dans ce contexte, ce chapitre vient compléter le premier chapitre sur les centrales de concentration en exposant minutieusement les principes de base de fonctionnement des centrales à tour, leurs éléments (récepteurs, fluides caloporteurs,..etc.). Cette première partie est suivie par un exposé sur les projets pilotes de centrales à tour réalisés un peu partout dans le monde. Enfin, dans sa dernière partie, le chapitre traite du principe des liaisons graphiques "bond Graphic".

### 2.1 Technologie à tour (héliostat)

Ce type de centrales est constitué de nombreux miroirs plats (plus de 100m<sup>2</sup>) concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour (80 à 100m de haut). La tour solaire offre l'avantage de ne pas avoir à faire circuler de fluide dans l'ensemble du champ de miroirs (la surface exposée est limitée), les pertes thermiques sont donc significativement réduites. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement (motorisation sur 2 axes) et réfléchit le rayonnement solaire sur la chaudière (récepteur). Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 800 °C à 1000°C. [7]

Les héliostats sont des réflecteurs dotés d'un système de suivi du soleil sur deux axes, les rayons solaires sont ensuite concentrés en haut d'une tour fixe [5]

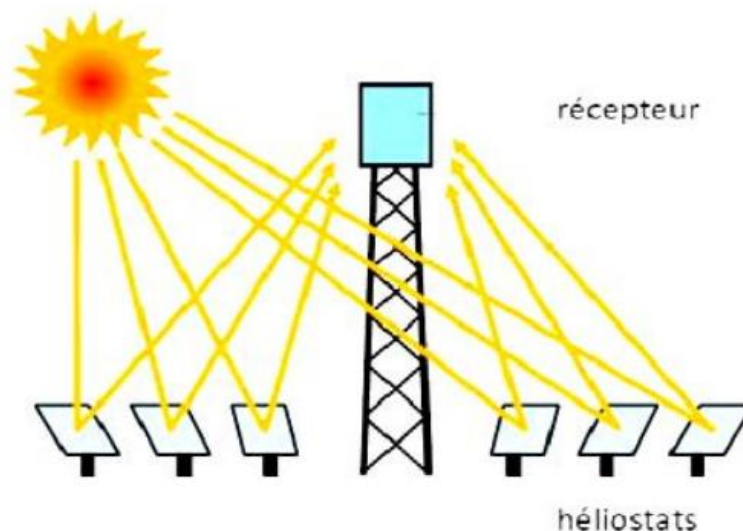


Fig.8– La technologie de la centrale à tour [9]



## **2.2 Fluides caloporteurs et fluides de travail**

Pour transporter la chaleur issue du champ solaire jusqu'à la turbine, un fluide caloporteur et/ou un fluide de travail sont utilisés. Le choix du fluide dépend de la température atteinte lors de la concentration du flux solaire, du type de méthode de fonctionnement (génération direct/indirect) et du type de stockage utilisé. [5,7]

On distingue comme fluides:

### **2.2.1 Les fluides organiques**

(Comme Le butane, propane, etc).qui ont une température, d'évaporation basse sont utilisés comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine. [7]

### **2.2.2 L'eau liquide**

Le fluide de transfert idéal, offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique est utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine. [7]

### **2.2.3 Les gaz**

L'hydrogène ou l'hélium sont utilisés comme fluides thermodynamiques et entrainer les moteurs Stirling associés aux collecteurs paraboliques.[7]

### **2.2.4 L'air**

est utilisé classiquement comme fluide de travail dans une turbine à gaz. Il peut aussi être utilisé comme caloporteur seulement. [7]

## **2.3 La réception du rayonnement :**

Il faut absorber le rayonnement concentré sur une surface noire (ou dans un volume semi-transparent, noir dans son épaisseur), et de ce seul fait absorbante pour le spectre visible (et donc pour le spectre solaire qui en est énergétiquement très proche), et transférer la chaleur ainsi générée à un fluide caloporteur. Dans cette filière, au moins quatre fluides caloporteurs sont susceptibles d'être utilisés : l'eau-vapeur, les sels fondus, les métaux liquides et l'air. Les récepteurs à utiliser sont différents dans ces quatre cas. [8]

### **2.3. 1 Le récepteur à eau-vapeur :**

Dans ce cas, on utilise un récepteur à tubes qui est alimenté en eau à haute pression. Cela pose déjà un problème de sollicitation mécanique des tubes bien connu dans le cas des chaudières à vapeur classiques : leur entretien est coûteux car l'éclatement, et donc le changement d'un tube de chaudière, est ici un événement courant. De plus, les possibilités d'extraction des calories sont très différentes dans les parties des panneaux qui sont « en eau » et dans celles qui sont « en vapeur ». La conduite d'un tel récepteur est donc délicate car elle implique que la cartographie des flux solaires soit contrôlée en permanence, une mauvaise répartition de ceux-ci entraînant une surchauffe et une fusion du tube. Dans la pratique elle impose une conduite sophistiquée des

héliostats impliquant le calcul et la mise en œuvre de dépointages fins en permanence. Voilà deux des raisons de l'abandon aujourd'hui avéré du recours à l'eau-vapeur. Notons aussi la nécessité de disposer de tubes le plus « noir » possible pour assurer le niveau d'absorptivité le plus élevé. Ce problème est général et concerne tous les récepteurs surfaciques, mais il est plus aigu pour les chaudières « ouvertes » (celles qu'on met en œuvre le plus souvent dans le cas de la formule optique du champ circulaire).[8]

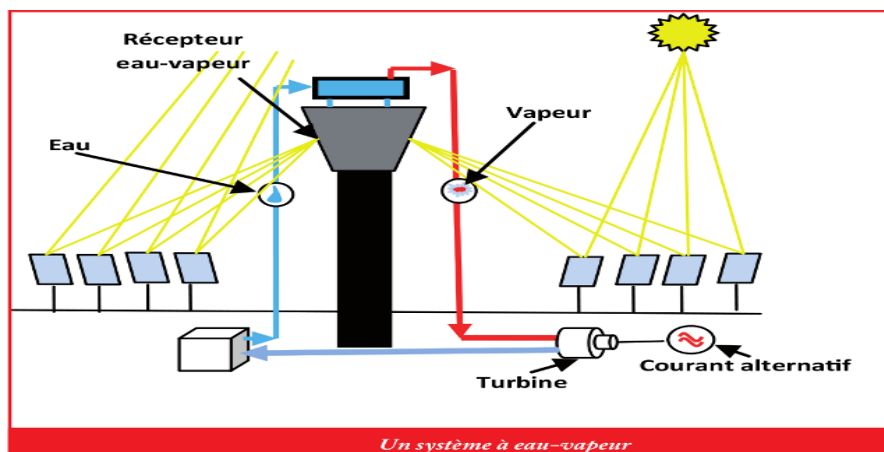


Fig.9– Un système à eau-vapeur [11]

### 2.3.2 Le récepteur à sel fondu :

Le récepteur à sel fondu est un appareil robuste car, étant parcouru sur toute sa surface par un liquide à grande vitesse, il est assez tolérant aux variations naturelles de la cartographie des flux. La rupture d'un de ses tubes peut être considérée comme un événement tout à fait exceptionnel, d'où un entretien à priori peu coûteux. De plus, le contrôle de cette cartographie peut être abandonné, surtout dans le cas d'une chaudière en cavité à la surface de réception généreuse (cas de **Thémis**). Il est donc facile à conduire.

Les sels fondus (composés par exemple de nitrate de sodium et de nitrate de potassium) représentent un fluide de stockage économique et adapté au niveau de température d'un cycle de Rankine. Il paraît donc intéressant d'employer des sels fondus à la fois comme fluide caloporteur et fluide de stockage d'une centrale à tour. [7]

Cette technologie est la plus développée des concepts de centrales à tour. Parmi ses réalisations, on peut citer « THEMIS » en France et « Solar Two » aux USA

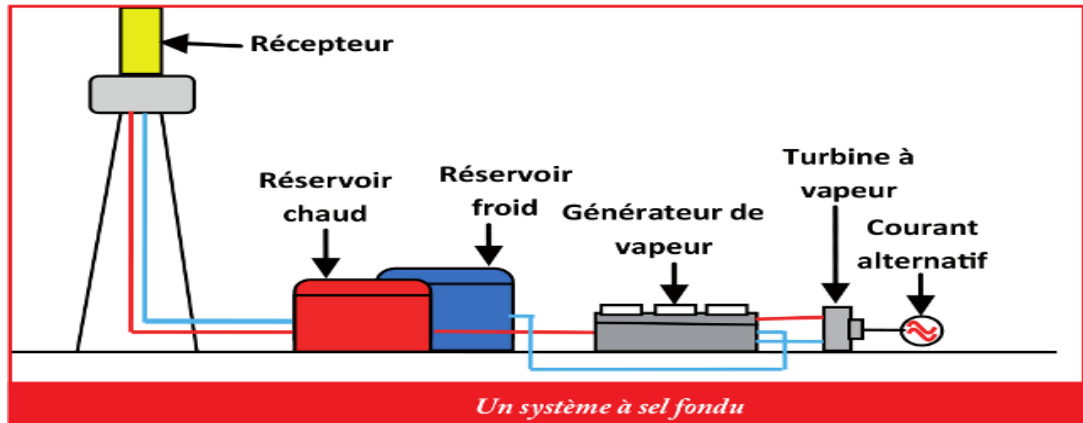


Fig.10– Un système à sel fondu. [11]

### 2.3. 3 Le récepteur à métal fondu :

L'intérêt d'utiliser un métal fondu comme fluide caloporteur vient de ce qu'il est très bon conducteur de la chaleur et qu'en conséquence il présente des coefficients d'échange thermique avec la paroi particulièrement favorables. De ce fait, un récepteur à métal liquide (typiquement : le sodium) peut présenter au flux une surface bien moindre que celle nécessaire à un récepteur à sel. Il pourra par exemple s'inscrire directement dans le plan focal sans avoir besoin de se développer en cavité pour augmenter ses surfaces d'échange. Une des conséquences de ce fait est que, à puissance thermique égale, un récepteur à sodium présentera bien moins de pertes de charge qu'un récepteur à sel. [8]

### 2.3. 4 Le récepteur à air :

Le circuit de transfert de chaleur est basé sur un schéma où l'air atmosphérique est aspiré à travers un récepteur volumétrique à absorbeur poreux (treillis métallique ou céramique) au travers duquel il est chauffé jusqu'à environ 700°C et utilisé pour alimenter un cycle vapeur entre 480-540°C. L'air en sortie d'échangeur est rejeté devant l'entrée du récepteur pour minimiser les pertes thermiques. Le rendement total est assez faible pour une centrale à tour, à cause des performances relativement mauvaises des récepteurs volumétriques actuels qui sont moins développés que les récepteurs à sels ou à vapeur saturée[7]

Aucune centrale à tour n'a été construite autour de ce choix. Mais de nombreuses propositions de chaudière à air haute température ont été faites dans l'ambition de rendre possible la mise en œuvre d'un cycle combiné et de pouvoir profiter de ses hauts rendements. Le récepteur doit ici réchauffer de l'air à une température très élevée (typiquement : 800°C). Des tentatives ont été menées à bien pour obtenir ce résultat à partir d'un absorbeur métallique à paroi (l'expérience « **Sirocco** » entreprise par le **CNRS** au grand four solaire d'**Odeillo** au début des années 80 et qui mettait en œuvre une paroi métallique gaufrée en « boîte à œufs » pour augmenter sa surface d'échange). C'était d'ailleurs l'option envisagée lors des premières esquisses de **Gast**. Mais de telles solutions, chères et fragiles, présentent en plus l'inconvénient d'offrir des surfaces de pertes à

température plus élevée que celle de l'air chaud produit (du fait du gradient de température existant dans la paroi métallique)[8]

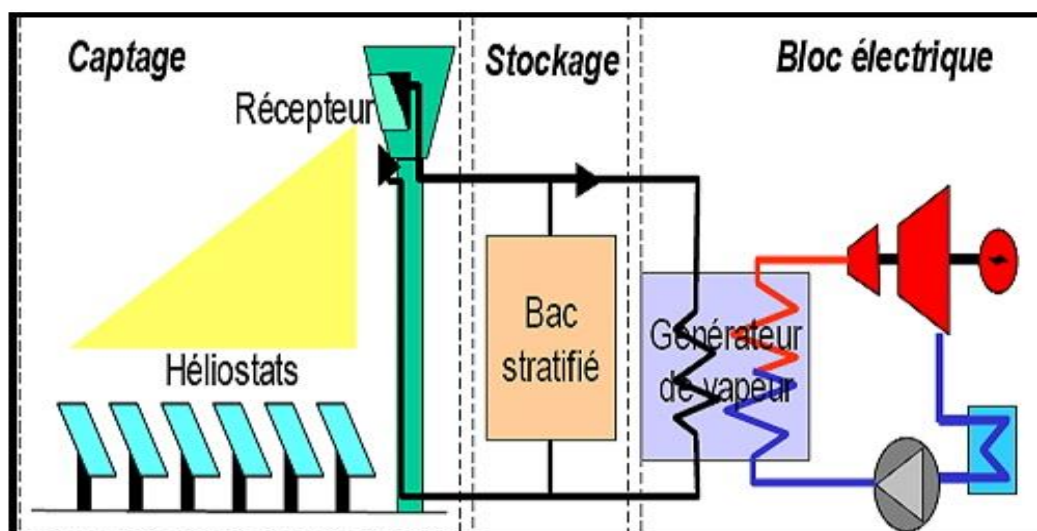


Fig.11– Un système à caloporteur air [10]

## 2.4 Aperçu sur les projets pilotes et ambitieux

### 2.4.1 Les projets pilotent

#### a) Hier

-Thémis ,France (EDF-CNRS),1982-1986 :centrale à tour à sel fondu,2,5MW<sub>el</sub>, stockage sel fondu.

-Solar Two USA(Sandia)1990/centrale à tour à sel fondu ,12,4MW<sub>el</sub>, stockage sel fondu.

-Solgate,EU-FP6,2000 :centrale hybride solaire –fossile à turbine à gaz ,230KW<sub>el</sub>. [3]

-CRS à Almeria en Espagne, centrale à sodium liquide construite par l'AIE (1981, 3700m<sup>2</sup> de miroirs .

-SUNSHINE à Nio Town, centrale à eau-vapeur, (Japon, 1981, 12900m<sup>2</sup> de miroirs),

- SOLAR ONE à Barstow, centrale à eau-vapeur, (Californie, USA, 1982, 71500m<sup>2</sup> de miroirs),

-CESA 1 à Almería, centrale à eau-vapeur, (Espagne, 1983, 11900m<sup>2</sup> de miroirs),

- SPP-5 à Shchelkino, centrale à eau-vapeur, (Crimée, Ukraine, URSS à l'époque, 1985, 40000m<sup>2</sup> de miroirs

#### b) Aujourd'hui et demain

-Julich, Allemagne,2007 :centrale à tour à air atmosphérique et cycle Rankine

-Pegase, France(CNDRS),2007 :centrale hybride solaire –fossile à turbine à gaz ,2MW<sub>e</sub>

-Solugas ,Espagne (EU-FP7),2009 :centrale hybride solaire –fossile à turbine à gaz ,5MW<sub>e</sub>

-Solar tres ,Espagne (SENER),2009 :centrale à tour à sel fondu,17MW\_el, stockage sel fondu  
15h. [3]

## **2.4.2 Les projets ambitieux**

### **2.4.2.1 Plan solaire méditerranéen (PSM)**

Ce programme, lancé le 13 juillet 2008 par l'Union pour la méditerranée (UPm) a pour objectif de permettre aux pays situés sur le pourtour méditerranéen, en Afrique du Nord et au Proche-orient, de développer une production d'électricité d'origine renouvelable par la construction de capacités additionnelles de production d'électricité bas carbone, et notamment solaire d'une puissance totale de 20 000 mW à l'horizon 2020. Le fort potentiel solaire de ces pays permettrait d'approvisionner, en électricité à faible contenu CO<sub>2</sub>, le marché local et d'en exporter une partie vers les pays européens, fortement demandeurs d'électricité. Pour mettre en œuvre ces objectifs, de nombreux pays se sont dotés de plans solaires nationaux. [1]

### **2.4.2.2 Medgrid**

Le projet medgrid s'inscrit dans le cadre du Plan Solaire méditerranéen. cette initiative industrielle a pour objet d'étudier la faisabilité d'un réseau de transport de l'électricité entre les rives nord et sud de la méditerranée et le développement des interconnexions autour du bassin méditerranéen. En effet, acheminer l'électricité produite par les centrales développées dans le cadre du PSM vers les zones de consommation nécessite de nouvelles infrastructures de transport et d'interconnexion reliant les sites de production aux réseaux locaux et à l'Europe. [1]

### **2.4.2.3 Desertec**

Initié en 2009, le projet Desertec vise à exploiter les potentiels énergétiques des déserts du moyen-orient et d'Afrique du Nord, grâce à un vaste réseau de centrales solaires à concentration et de parcs éoliens. L'objectif de cette initiative industrielle est de faire coopérer l'Europe, le moyen-orient et l'Afrique du Nord afin de produire de l'électricité et de l'eau douce. D'ici 2050, 15 % des besoins en électricité de l'Europe et une grande partie de ceux des pays producteurs pourraient être assurés. [1]

### **2.4.2.4 L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE)**

Prévoit une contribution de cette technologie à hauteur de 11,3 % de la production d'électricité mondiale à l'horizon 2050. Avec plus de 1 000 000 MW de capacité installée, les centrales solaires thermodynamiques pourraient fournir une production électrique de 4 770 TWh par an. L'Estela (Agence européenne du solaire à concentration) prévoit un objectif européen de 30 000 MW de capacité installée et de 89,8 TWh/an de production d'électricité en 2020. [1]

## **2.5 Rappel sur les liaisons graphiques**

### **2.5.1 Histoire sur liaisons graphiques**

La modélisation et l'analyse des modèles permettent d'étudier des phénomènes réels et de prévoir des résultats à un niveau d'approximation donné. Les modèles mathématiques peuvent être complexes et difficiles à interpréter ; pour cette raison, dans les dernières décades plusieurs outils graphiques ont été développés, parmi lesquels on peut trouver: les schémas blocs [Graybeal, 1951], les graphes de fluence [Mason, 1953], les Bond Graphs (BG) [Karnopp et Rosenberg, 1975]

L'énergie est un concept essentiel dans la description de l'évolution des systèmes technologiques. On le retrouve dans tous les domaines : il constitue le lien entre ceux-ci. Fort de cette constatation, Henry M. Paynter (1923-2002), a introduit le concept de « bond graph » (BG) (graphe de liaisons) en 1961.

### **2.5.2 Modélisation en liaisons graphiques 'bond graph'**

Le bond graph est une technique graphique utilisée pour modéliser les systèmes avec un langage unifié pour tous les domaines des sciences physiques [Dauphin-Tanguy, 2000]. On peut associer des sous modèles de différents types de systèmes tels que les systèmes électriques, mécaniques, hydrauliques, thermiques en un seul bond graph, ce qui permet une visualisation graphique des relations de cause à effet, et assure la conservation de la puissance.

### **2.5.3 La construction du modèle**

Se fait en 3 étapes

- Analyse fonctionnelle.
- Analyse phénoménologique.
- Analyse comportementale.

### **2.5.4 Le langage des bonds graphiques :**

- Comprendre les transferts d'énergie (topologie des échanges) ;
- S'intéresser plus particulièrement aux propriétés structurelles des systèmes ;
- S'affranchir des vicissitudes de la modélisation mathématique et fournir un schéma de calcul associé au graphe

- Mettre en évidence la causalité dans le modèle obtenu

- Simuler simplement un système pluri technique

C'est in langage graphique qui est :

- Unifié pour tous les domaines physique et technique

- Fondé sur une étude des transferts de puissance au sein d'un système

- Modélisant les systèmes à paramètres localisés

Permettant les approches :

- Fonctionnelle bond graphs à mots
- Structurelle : visualisation des propriétés de causalité
- Comportementale : déduction des modèles mathématiques

### 2.5.5 Les éléments de base du langage

- I** : élément de modélisation d'un phénomène physique liant la variable flux à la variable moment généralisé
- C** : élément de modélisation d'un phénomène physique liant la variable effort à la variable déplacement généralisé
- R** : élément de modélisation d'un phénomène physique liant la variable effort à la variable flux
- Se, Sf** : source d'effort et source de flux indépendante respectivement de leur variable complémentaire
- 0, 1** : la jonction 0 sert à coupler des éléments soumis au même effort, la jonction 1 sert à coupler des éléments parcourus par le même flux
- TF** : transformateur (exemples : transformateur électrique, train d'engrenages,...)
- GY** : gyrateur ((exemples : moteur électrique, turbine, pompe centrifuge,...))

### 2.5.8 Schématisation d'une centrale à tour suivant le principe des liaisons graphiques :

Par l'utilisation des éléments de base du langage. On peut schématiser le champ solaire à tour de type baryton (solaire-gaz), suivant la fig.12

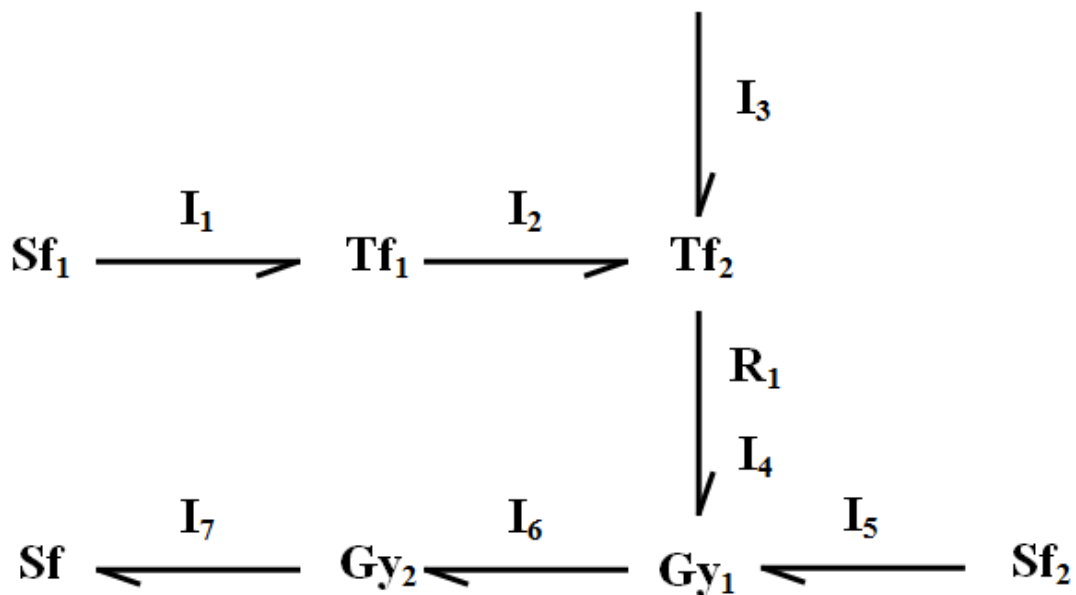


Fig.12– Schématisation d'une centrale à tour suivant le principe des liaisons graphiques

**Où:**

**Sf<sub>1</sub>** : est une source de flux sous forme de rayonnement qui exprime le soleil

**I<sub>1</sub>** : est un élément de modélisation d'un phénomène physique liant la variable flux et est formulé mathématiquement en fonction de rayonnement solaire incident ( $Q_i$ ).

**Tf<sub>1</sub>** : est un transformateur de l'énergie qui exprime les miroirs de réflexion. Il est fonction des (la surface des miroirs A, le rayonnement solaire incident  $Q_i$ , le coefficient de réflexion, l'angle de l'inclinaison  $\theta$  )

**I<sub>2</sub>** : élément de modélisation d'un phénomène physique liant la variable flux et est formulé mathématiquement en fonction de rayonnement réfléchi par les miroirs ( $Q_r$ )

**I<sub>3</sub>** : élément de modélisation d'un phénomène physique lié à l'air aspiré du milieu environnement.

**Tf<sub>2</sub>** : un transformateur de l'énergie représentant le récepteur et qui transmet l'énergie de flux réfléchi par les miroirs vers le fluide caloporteur.

**R<sub>1</sub>** : élément de modélisation d'un phénomène physique liant la variable effort à la variable flux, fonction de: la variation de la pression  $P_e$ , le débit  $q_m$  et la capacité calorifique  $c_p$  )

**I<sub>4</sub>** : élément de modélisation d'un phénomène physique liant la variable flux formulé mathématiquement en fonction la variation de la température  $\Delta T$ .

**Sf<sub>2</sub>** : élément représentant le réservoir du carburant.

**I<sub>5</sub>** : élément de modélisation d'un phénomène physique liant la variable flux formulé mathématiquement en fonction de la chaleur introduite par le carburant.

**Gy<sub>1</sub>** : élément représentant la turbine de type baryton.

**I<sub>6</sub>** : élément de modélisation liant la variable flux formulé mathématiquement en fonction le travail de la turbine  $W_t$ .

**Gy<sub>2</sub>** : élément représentant la génératrice électrique.

**I<sub>7</sub>** : élément de modélisation d'un phénomène physique liant la variable flux formulé mathématiquement en fonction de la puissance annuelle produite  $T_{pa}$ .

**Sf** : élément représentant le consommateur.

**Conclusion :**

Ce chapitre a permis d'étaler le principe de fonctionnement des centrales de concentration à tour solaires et de mettre à l'évidence les projets similaires de centrales pilotes et ambitieux. Un schéma de principe d'une centrale de concentration solaire thermique à tour a été élaboré en épuisant dans la théorie des liaisons graphiques. Ce schéma devra permettre de proposer un modèle mathématique de la centrale qui n'est pas l'objet de ce travail.



# Chapitre 3

## Étude technico- économique

## Introduction

Le présent chapitre est consacré à l'étude technico-économique du champ de concentration solaire hybride à tour éventuellement localisée à Tissemsilt. L'étude comprend l'évaluation des paramètres économiques comme le délai d'investissement, le capital global d'investissement, le prix de revient unitaire du kWh en fonction des différents taux d'hybridation. Cette étude permettra de se prononcer sur la viabilité d'un tel projet d'investissement.

### 3.1 Calcul de la puissance en MW en fonction du taux d'hybridation pour une centrale de concentration à tour éventuellement localisée à Tissemsilt

L'abondance du potentiel solaire est le critère principal qu'il faut évaluer avant toute implantation de champ solaire. Selon l'Agence spatiale Allemande [14] le potentiel d'énergies renouvelables dans le bassin méditerranéen est le plus important.

Des études antérieures avaient montré que le temps d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national excède 2500 heures par an et peut atteindre jusqu'à 3900 heures par an, L'énergie reçue se forme de rayonnement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup> par an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup> par an au sud d'Algérie [15]. Les diverses recherches jusqu'à présent sur le potentiel énergétique solaire en Algérie convergera vers le sens de l'utilisation et l'exploitation cette forme d'énergie, qui est une propre énergie et la possibilité de hybridation par un autre forme d'énergie.

La ville de Tissemsilt se trouve à l'intérieur de l'Algérie. Géographiquement, elle est située au nord-ouest entre la latitude 35,606 N et la longitude de 1,812 E. Tissemsilt est caractérisée par un climat continental.

Pour évaluer l'ensoleillement à Tissemsilt, ils existent une multitude de logiciels, qui exploitent les bases de données réelles de mesures effectuées sur des périodes différentes, les meilleurs sont commerciaux, pouvant fournir des données précises sur l'ensoleillement entre autre sa durée annuelle et son potentiel.

Dans la présente étude sont utilisées les données fournies par l'Atlas Solaire Algérien élaboré par le CDER [15]. Pour la région de Tissemsilt et pour la période de 1992-2002 les moyennes annuelles de la durée de l'ensoleillement mesurée et de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale  $G_h$  sont égales consécutivement à 8,23 h et 5348 Wh/m<sup>2</sup> ce qui montre l'installation solaire n'est disponible que quelle que heures pondons la journée ce qui signifie que le facteur de Capacité pour le champ solaire ( $C_{fs}$ ) égale 15.9% par l'analyse des données de [16].

Autrement dit, et par l'analyse des données [12] le facteur de Capacité de centrale hybride ( $C_{hyb}$ ) à gaz naturelle est égal à 80%.

Pour la localité de Tissemsilt, la durée d'ensoleillement annuelle est estimée à 2999 h [12]. Cette durée significative pourrait assurer une production importante d'électricité à partir du champ solaire de type Brayton solaire-gaz.

Dans ce qui suit sera exposé deux exemples d'estimation de puissance pour deux centrales à tour avec deux taux d'hybridation, à savoir : 10 et 90%.

**Cas n°1** : 10% du total de la consommation annuelle de Tissemsilt est de provenance solaire.

La possibilité de n'importe quel projet de grande envergure pour la production de puissance en particulier celle d'une filière pour la production d'électricité solaire ainsi que la sélection de la technologie appropriée est en grande partie déterminée par l'étude technico-économique et bien connaître des prés condition de base. Dans ce contexte, plusieurs indicateur significatifs doivent être évalués comme le montant global d'investissement (MGI), le capital d'investissement (CC: Capital Cost), la fonction d'amortissement (Am), la puissance totale (Pc) du champ en kW et enfin le prix de revient unitaire (Pvu) du kWh.

Le calcul de la puissance du champ solaire pouvant assurer 10% de la puissance annuelle de la wilaya de Tissemsilt est effectué à partir de l'expression suivante:

$$P_C = T_{pa} \times TH / (365 (C_{Fs} \times 24)) \quad (01)$$

$$P_C = 15,91$$

Où:

$T_{pa}$  : la puissance annuelle produite ; TH est le taux d'hybridation; Cfs le facteur de capacité pour le champ solaire égal à 15.9% par l'analyse des données de [16] ; la consommation annuelle de Tissemsilt est 222GW. [12]

**Cas n°1** : 90% du total de la consommation annuelle de Tissemsilt est de provenance solaire.

AN:

$$P_C = 222000 \times (1 - TH) / (C_{hyb} \times 365 \times 24 \text{ h}) \quad (02)$$

$$P_C = 28,51$$

Les puissances solaire et conventionnelle en MW pour le champ hybride avec un taux d'hybridation de 0 à 100% sont rapportées dans le Tab.1

L'analyse des données de [12 et 16] avance un facteur de capacité de champ solaire (Cfs) égal à 15.9%. D'après la source [12] le facteur de capacité de la centrale hybride ( $C_{hyb}$ ) pour le gaz naturelle peut atteindre les 80%.

**Tableau 1– Estimation de la puissance en MW pour le champ solaire en fonction du taux d'hybridation**

taux d'hybridat	P <sub>conv</sub> , MW	P <sub>solaire</sub> , MW
0	31,68	0
0,1	28,51	15,91
0,2	25,34	31,82
0,3	22,17	47,73
0,4	19,01	63,63
0,5	15,84	79,54
0,6	12,67	95,45
0,7	9,5	111,36
0,8	6,34	127,27
0,9	3,17	143,18
1	0	159,09

L'examen du Tab.1 permet d'en conclure que pour chaque taux d'hybridation existe une puissance totale différente, d'ailleurs la somme des deux puissances solaire et conventionnelle. Chacune de ces puissances permettra d'assurer une production annuelle de 222 GW (la consommation annuelle de Tissemsilt)

### 3.2 Estimation du montant global de l'investissement (MGI)

Selon [13] le prix de revient du kWh produit par le champ solaire à tour est égal à 1500 €. Ce prix est estimé à 800 €/kWh pour les centrales de production d'électricité conventionnelles à turbine à gaz (BRYTON).

Le montant global de l'investissement est estimé par l'expression suivante :

$$MGI = P_c \times CC \quad (03)$$

Le calcul du montant global d'investissement (MGI) pour des taux d'hybridation allant de 0 à 100% est rapporté dans le Tab.2

**Tableau 2–calcul du montant global de l'investissement en fonction du taux d'hybridation**

<b>taux d'hybridation</b>	<b>P<sub>conv</sub>, MW</b>	<b>P<sub>solaire</sub>, MW</b>	<b>MGI<sub>solaire</sub>, P<sub>solaire</sub>*1500€/kw</b>	<b>MGI<sub>conv</sub>, P<sub>conv</sub>*800€/kw</b>
0	31,68	0	0	25344000
0,1	28,51	15,91	23865000	22808000
0,2	25,34	31,82	47730000	20272000
0,3	22,17	47,73	71595000	17736000
0,4	19,01	63,63	95445000	15208000
0,5	15,84	79,54	119310000	12672000
0,6	12,67	95,45	143175000	10136000
0,7	9,5	111,36	167040000	7600000
0,8	6,34	127,27	190905000	5072000
0,9	3,17	143,18	214770000	2536000
1	0	159,09	238635000	0

L'examen du Tab.2 permet de conclure que l'installation conventionnelle a un coût inférieur à l'installation solaire. Le coût de cette dernière est croissant avec l'augmentation du taux d'hybridation.

### **3.3 Calcul de total des ventes annuelles d'électricité et le total de la consommation annuelle de carburant**

- le total des ventes annuelles d'électricité  $T_{va}$  est déterminé comme par l'expression:

$$T_{va} = T_{pa} \times P_{vu} \quad (04)$$

Où  $T_{pa}$  est la puissance annuelle produite constante égale à 222000 MWh ;  $P_{vu}$  est le prix de revient kWh d'électricité, égal à 0,22 €/kWh.[12]

-Le total de la consommation annuelle de carburant, TCAC ; Le coût de l'électricité issue d'une centrale au fioul égale 0,08181 €/kWh. [13]

$$TCAC=(1-TH) \times T_{pa} \times 0,08181 \quad (05)$$

Le calcul de la consommation annuelle de carburant(TCAC) pour les différents taux d'hybridation et le total des ventes annuelles d'électricité est rétablie au Tab.3

**Tableau 3– évaluation du total de la consommation annuelle de carburant en fonction du taux d'hybridation**

<b>taux d'hybridation</b>	<b>total de la consommation annuelle de carburant 'TCAC' €</b>	<b>Tva, €</b>
0	18161820	48840000
0,1	16345638	48840000
0,2	14529456	48840000
0,3	12713274	48840000
0,4	10897092	48840000
0,5	9080910	48840000
0,6	7264728	48840000
0,7	5448546	48840000
0,8	3632364	48840000
0,9	1816182	48840000
1	0	48840000

L'examen du Tab.3 permet d'en conclure que pour l'augmentation du taux d'hybridation qui montre convergence vers l'installation solaire la consommation annuelle de carburant (TCAC) se démunie jusque à égale 0

### **3.4 Calcul de la fonction d'amortissement**

La durée totale de l'amortissement est déterminée quand la fonction d'amortissement déterminée comme étant la déférence entre la durée de l'échéance multiplié par le total des ventes annuelles d'électricité, l'autre part est le montant global de l'investissement (MGI solaire + MGIconv + la durée de l'échéance multiplié par le total de la consommation annuelle de carburant, TCAC) soit nulle. C'est à dire:

$$Am=n \times T_{va} - (MGI_{solaire} + MGI_{conv} + n \times TCAC) = 0 \quad (06)$$

L'évaluation a été effectuée pour les différents taux d'hybridation (0, 10, 20, 30, ... 100 %) en commençant par une centrale 100 % classique c'est-à-dire avec un taux d'hybridation égale à 0. Ensuite 90% classique ou 10 % solaire et ainsi de suite jusqu'à 100% solaire. Les résultats de l'évaluation pour le cas d'une centrale avec 10% de production solaire sont rapportés dans le Tab.4

**Tableau.4 – Exemple d'évaluation de la fonction amortissement pour le cas d'une centrale avec 10% d'hybridation**

N	MGI <sub>solaire</sub>	MGI <sub>conv</sub>	Tva	TCAC	n*TCAC	am=n*Tva-(MGI <sub>solaire</sub> +MGI <sub>conv</sub> +nTCAC)
1	23865000	22808000	48840000	16345638	16345638	-14178638
2	23865000	22808000	48840000	16345638	32691276	18315724
3	23865000	22808000	48840000	16345638	49036914	50810086
4	23865000	22808000	48840000	16345638	65382552	83304448
5	23865000	22808000	48840000	16345638	81728190	115798810
6	23865000	22808000	48840000	16345638	98073828	148293172
7	23865000	22808000	48840000	16345638	114419466	180787534
8	23865000	22808000	48840000	16345638	130765104	213281896
9	23865000	22808000	48840000	16345638	147110742	245776258
10	23865000	22808000	48840000	16345638	163456380	278270620

L'examen du Tab.4 permet d'en déduire que la fonction amortissement prend des valeurs négatives ce qui signifie que le retour d'investissement est quasiment impossible jusque à ce que la fonction d'amortissement soit nulle

### 3.5 Discussions des résultats

#### 3.5.1 Résultats et discussions du graphe 1

La variation de la fonction amortissement en fonction du taux d'hybridation pour un prix de vente unitaire (Pvu) égal à 16 c€ et un capital d'investissement (CCsolaire) égal à 2500 €/kWh est représentée sur la fig.13

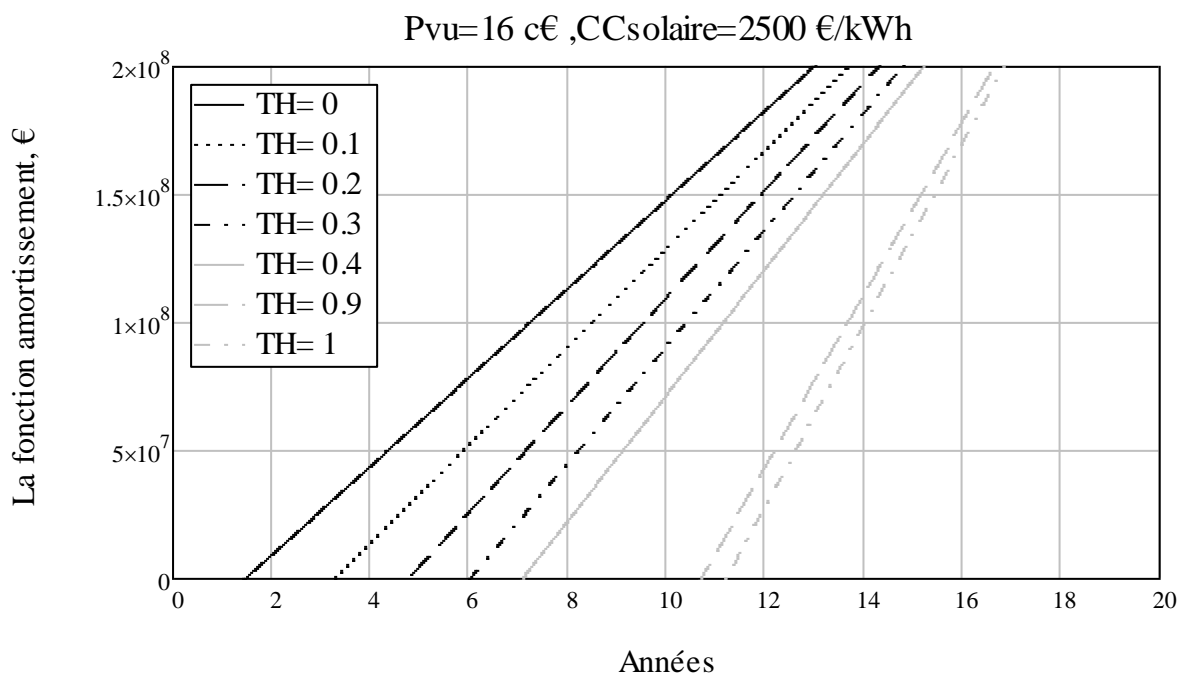


Fig.13– La fonction amortissement en fonction des différents taux d'hybridation pour un prix de vente unitaire (Pvu) égale à 16 c€ et capital d'investissement (CCsolaire) égale à 2500 €/kWh

On en déduit que l'augmentation de l'investissement de la partie solaire de la centrale conduit à l'accroissement des délais d'amortissement ce qui signifie un retard dans le retour des investissements.

La variation de la fonction amortissement d'une centrale à 100% solaire en fonction des années d'exploitation et des capitaux d'investissement CC égaux à (1000, 1500, 2000, 2500 et 3500 €/kWh) et pour un prix de vente unitaire égal à 16 c € est représentée sur la Fig.14.

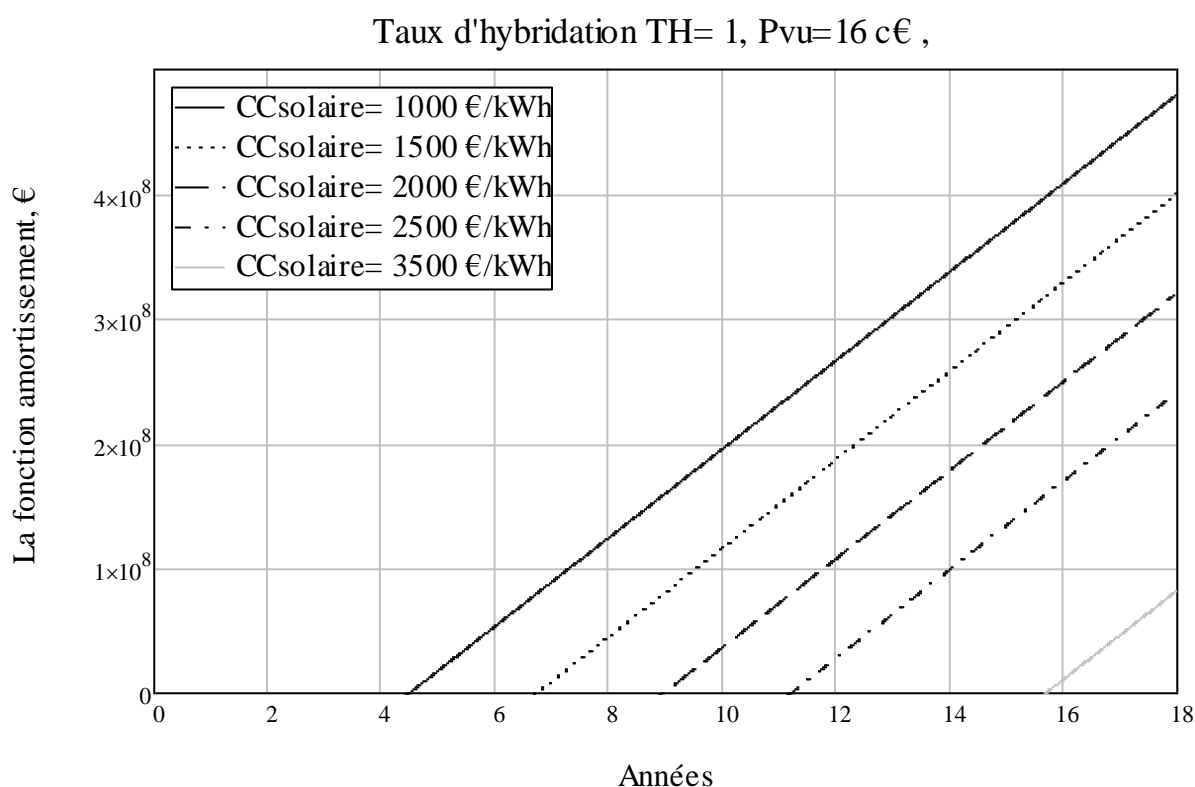


fig.14– La variation de la fonction amortissement d'une centrale à 100% solaire en fonction des années d'exploitation et des capitaux d'investissement CC égaux à (1000, 1500, 2000, 2500 et 3500 €/kWh) pour un prix de vente unitaire égal à 16 c €

On en conclu que la croissance du capital d'investissement ne fera qu'allonger les délais d'amortissement. Au delà d'une certaine valeur du capital d'investissement (> 3500 eur/kWh) le projet n'est plus rentable.

La variation de la fonction amortissement d'une centrale à 100% solaire en fonction des années d'exploitation et des prix de vente unitaire égaux à 8.7, 14.9 et 16 c€ et un capital d'investissement égal à 2500 €/kWh est présenté sur la fig.15.



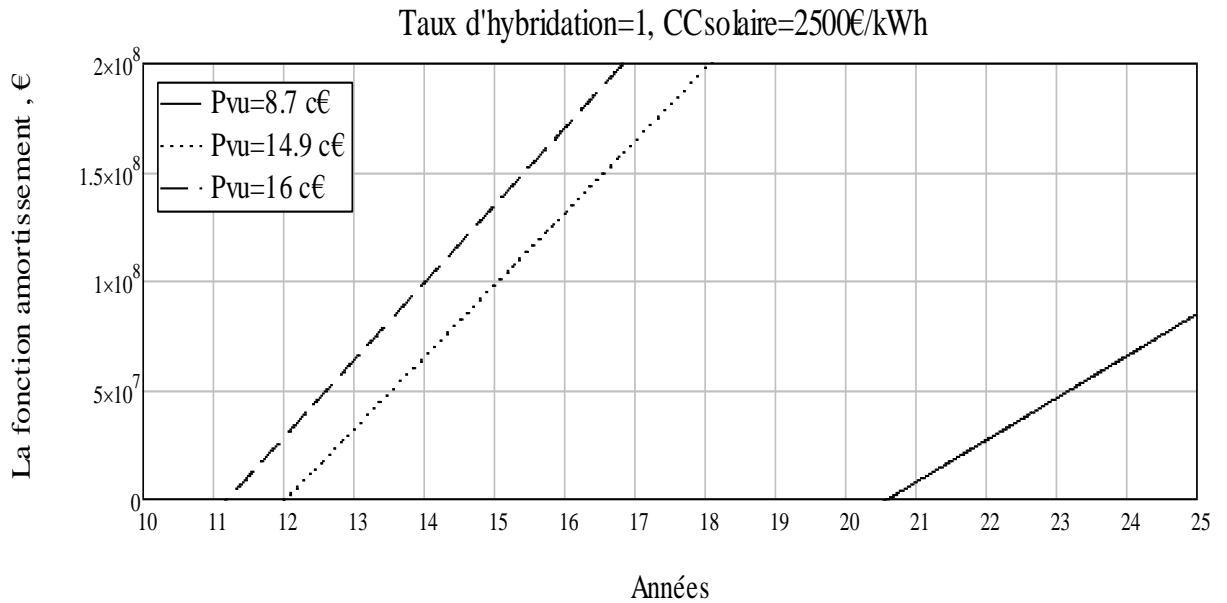


Fig.15– La variation de la fonction amortissement d’une centrale à 100% solaire en fonction des années d’exploitation et des prix de vente unitaire égaux à 8.7, 14.9 et 16 c€ et un capital d’investissement égal à 2500 €/kWh

On en déduit que la croissance du prix de vente unitaire a un effet positif sur le retour d’investissement. Avec un prix de vente égal à 16 c€ le projet est très viable.

La variation de la fonction amortissement d’une centrale conventionnelle (TH=0% ) en fonction des années d’exploitation et des prix de vente unitaire égaux à 8.7, 14.9 et 16 c€ et un capital d’investissement égal à 2500 €/kWh est présenté sur la fig16.

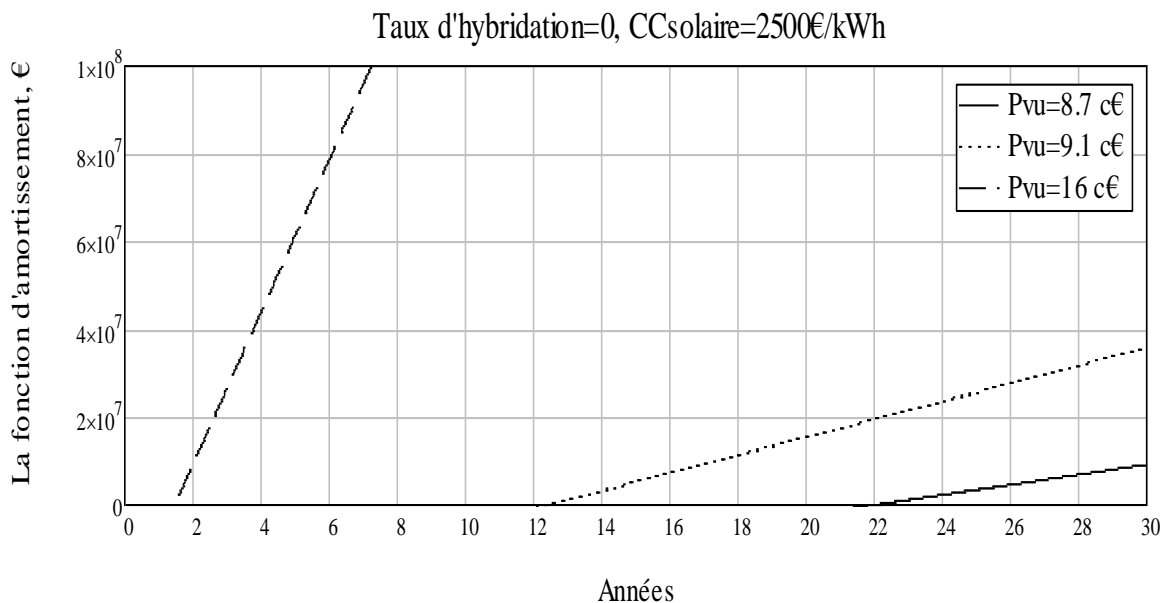


Fig.16 – La variation de la fonction amortissement d’une centrale conventionnelle (TH=0% ) en fonction des années d’exploitation et des prix de vente unitaire égaux à 8.7, 14.9 et 16 c€ et un capital d’investissement égal à 2500 €/kWh

L'examen de la fig.16 permet d'en conclure que la diminution du prix de vente unitaire ne fera que diverger la fonction d'amortissement. La figure enseigne que le projet de centrale conventionnelle est viable pour un prix de vente égal à 16 c€, d'ailleurs c'est le prix de vente du kWh sur le marché mondial.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre dédié à l'étude technico-économique d'une centrale de concentration solaire à tour éventuellement localisée à Tissemsilt a permis de faire ressortir les conclusions suivantes :

- la croissance du capital d'investissement ne fera qu'allonger les délais d'amortissement. Au delà d'une certaine valeur du capital d'investissement ( $> 3500$  eur/kWh) le projet n'est plus rentable ;

- La croissance du prix de vente unitaire a un effet positif sur le retour d'investissement. Avec un prix de vente égal à 16 c€ le projet est économiquement très viable.

- La diminution du prix de vente unitaire ne fera que diverger la fonction d'amortissement. Ceci dit qu'un projet de centrale conventionnelle est viable pour un prix de vente égal à 16 c€, d'ailleurs c'est le prix de vente du kWh sur le marché mondial.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Les intérêts d'une mobilisation de plus en plus importante des énergies renouvelables, et de l'énergie solaire de concentration en particulier, sont immenses et toucheront, certainement d'une façon différenciée, tous les pays et auront un impact bénéfique. Pour les uns, il y aura les possibilités d'investissements, d'exportations de technologies ainsi que la garantie de couverture durable des besoins en énergies par des vecteurs propres à des prix stables.

Les centrales à tour font partie des technologies de concentration solaire. Ces technologies incluent entre autres les cylindro-paraboliques, les capteurs paraboliques (dishes) et les cheminées solaires. Ce travail a permis de mettre en revue toutes ses différentes technologies. Un volet important du travail a été consacré aux centrales de concentration solaire à tour. Ces dernières sont constituées de deux blocs. Le bloc solaire utilise des miroirs pour concentrer le rayonnement solaire et produire ainsi de la chaleur. Il est constitué d'un champ de miroirs mobiles qui réfléchissent le rayonnement solaire vers un récepteur où l'énergie solaire est convertie en chaleur. Le bloc de puissance, similaire à un système conventionnel, est constitué d'une chaudière pour la production de vapeur, d'une turbine entraînant un alternateur pour la production de l'électricité. Un fluide caloporteur permet le transfert de la chaleur du bloc solaire au bloc de puissance.

L'analyse technico-économique d'une centrale hybride à tour de type Brayton solaire-gaz éventuellement localisée à Tissemsilt a permis de tirer les conclusions suivantes :

-au-delà d'une valeur du capital d'investissement égale à 3500 €/kWh le projet n'est plus rentable et la croissance du capital d'investissement ne fera qu'allonger les délais d'amortissement.

-pour qu'un projet de centrale hybride à tour de type Brayton solaire-gaz éventuellement localisée à Tissemsilt soit viable pour un capital d'investissement égal à 2500 €/kwh le prix de vente unitaire doit être proche de celui sur le marché mondial estimé à 16 c€

- la diminution du prix de vente unitaire ne fera que croître les délais d'amortissement et de même renvoyer la fin des retours d'investissement vers des dates non définis .

En conclusion, l'installation d'un champ solaire de systèmes de type Brayton solaire-gaz au niveau de la localité de Tissemsilt est possible et est économiquement rentable pour les conditions arrêtées dans cette étude.

## Bibliographie :

- [1] Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique, [www.enr.fr/.../2010171642\\_Fich...egralemai2010.pdf](http://www.enr.fr/.../2010171642_Fich...egralemai2010.pdf),14/02/2017
- [2] Les Centrales Solaires à Concentration, [labothap.ulg.ac.be/.../centrales\\_s...\\_SQ070925.pdf](http://labothap.ulg.ac.be/.../centrales_s..._SQ070925.pdf) ,14/02/2017.
- [3] A. Ferriere , Les centrales solaires à concentration, une solution pour la production massive d'électricité verte , UPR-CNRS 8521
- [4] B. Abedlaali , Calcul énergétique de l'installation hybride thermique pour la production d'électricité, Mémoire de Fin d'Etudes, Juin 2013
- [5] B. ABEDLAALI , «Calcul énergétique de l'installation hybride thermique pour la production d'électricité, Université de Biskra,2013 .
- [6] S. ABD ESSELAM, BELKHAMSA, S., "Contribution à l'étude et au calcul des cycles thermodynamiques des turbines à gaz", mémoire d'ingénieur, Université Ouargla, 2008.
- [7] J.Bernard Michel, Centrales Solaires Thermique à concentration(CSTC) Etat de l'art.
- [8] Les centrales solaires , [dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/468/1/chapitreI.pdf](http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/468/1/chapitreI.pdf) ,25/02/2017.
- [9] Etude bibliographique sur les centrales solaires thermodynamiques, [dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/5022/4/chapitre1.pdf](http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/5022/4/chapitre1.pdf),23/05/2017.
- [10] P.GARCIA, Outils d'évaluation technico économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur, Thèse présentée à l'Université de Perpignan Pour obtenir le titre de Docteur de l'Université de Perpignan 2007.
- [11] M.Mohamed, Les types de récepteurs d'une centrale solaire à tour , Attaché de Recherche Division Solaire Thermique et Géothermie – CDER ,N° 25 2012.
- [12] D. Zebbar \*, S. Kherris, N. Mohamed Chérif et B. Ghabi, Etude technico-économique d'un champ solaire de type stirling dish à tissemsilt, Revue des Energies Renouvelables Vol. 18 N°2 (2015) 315 – 327
- [13] Le coût comparé de l'électricité selon la filière Pour un choix futé de l'énergie, internet: [www.ucil.fr](http://www.ucil.fr),03/06/2017.
- [14] P.Paal,R., Dersch, J. Milow B. European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping. Edited by Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrte.V. 23 p;
- [15] M.Yaiche ., Bouhanik, A. Atlas Solaire Algérien , CDER, 2013, 84 p ;
- [16]T .Tsoutsos., Gekas V., Marketaki K..Technical and economical evaluation of solar thermal power generation, Renewable Energy 28(2003), pp. 873–886
- [17] M. Ahmed. Daabo ,Saad Mahmoud, Raya K. Al-Dadah ,The effect of receiver geometry on the optical performance of a smallscale solar cavity receiver for parabolic dish applications , Energy 114 (2016) 513e525
- [18] D. Akbari, Seyed M.S. Mahmoudi , Thermoeconomic analysis & optimization of the combined supercritical CO2 (carbon dioxide) recompression Brayton/organic Rankine cycle ,Energy 78 (2014) 501e512.
- [19] B. Horák,Murugan , A review of micro combined heat and power systems for residential applications ,Renewable and Sustainable Energy Reviews 64 (2016) 144–162.
- [20] L. Spreafico, D. Gauthier, G. Flamant , Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients ,Renewable and Sustainable Energy Reviews 55 (2016) 298–315 .
- [21] S.Gupta.,C. Kaushik, K.R. Ranjan, N.L. Panwar, V. Siva Reddy, S.K. Tyagi ,Thermodynamic performance evaluation of solar and other thermal power generation systems ,Renewable and Sustainable Energy Reviews 50 (2015) 567–582

- [22] J.Korzynietz, A. Brioso , A. del Río , M. Quero , M. Gallas , R. Uhlig , M. Ebert , R Buck , D. Teraji ,Solugas – Comprehensive analysis of the solar hybrid Brayton plant , *Solar Energy* 135 (2016) 578–589
- [23] T. Bello-Ochende, J.P. Meyer ,A review on the thermodynamic optimisation and modelling of the solar thermal Brayton cycle ,*Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28 (2013) 677–690
- [24] E. Okoroigwe, Amos Madhlopa ,An integrated combined cycle system driven by a solar tower , *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (2016) 337–350
- [25] A. Rovira ,Carlo Rubbia, Manuel Valdés, José M. Martínez-Val , Thermodynamic cycles optimised for medium enthalpy units of concentrating solar power , *Energy* 67 (2014) 176e185
- [26] S.Orgaz, M. Pedemonte, P. Ezzatti, P.L. Curto-Risso , A. Medina ,A. Calvo Hernández ,Multi-objective optimization of a multi-step solar-driven Brayton plant , *Energy Conversion and Management* 99 (2015) 346–358
- [27] A. P. Muroyama, Andrew J. Schrader, Peter G. Loutzenhiser , Solar electricity via an Air Brayton cycle with an integrated two-step thermochemical cycle for heat storage based on Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CoO redox reactions II: Kinetic analyses , *Solar Energy* 122 (2015) 409–418
- [28] R. Vasquez Padilla ,Yen Chean Soo Too , Regano Benito , Wes Stein ; Exergetic analysis of supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles integrated with solar central receivers , *Applied Energy* 148 (2015) 348–365
- [29] M. Goodarzi, Mohsen Kiasat, Ehsan Khalilidehkordi ; Performance analysis of a modified regenerative Brayton and inverse Brayton cycle ; *Energy* 72 (2014) 35-43
- [30] Y. Li ,Shengming Liao ,Gang Liu ,Thermo-economic multi-objective optimization for a solar-dish Brayton system using NSGA-II and decision making ; *Electrical Power and Energy Systems* 64 (2015) 167–175.
- [31] B.D. Iverson, Thomas M. Conboy, James J. Pasch , Alan M. Kruizena , Supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles for solar-thermal energy , *Applied Energy* 111 (2013) 957–970.

## Résumé

Le présent travail, est consacré à l'étude technico-économique d'une centrale hybride à tour de type Brayton solaire-gaz éventuellement localisée à Tissemsilt. Le travail sur ce thème tout au long du mémoire a été développé dans l'ordre qui va suivre. Dans la première partie du mémoire on en retrouve un aperçu général sur les centrales solaires à concentration pour la production de puissance. Ici même, les différents systèmes et leurs composants sont décrits utilisant plusieurs ressources bibliographiques. Suivie par exposé détaillé sur les centrales de concentration solaire à tour solaire, ses composants (récepteur de rayonnement, fluide caloporteur...ect). La encore on en retrouve une description des différents projets pilotes et d'autres ambitieux complété par un rappel théorique sur liaisons graphiques. Enfin, arrivent les conclusions. Il faut retenir qu'un champ de concentration solaire à tour hybride solaire-gaz pourra est économiquement viable pour les valeurs du prix de vente unitaire du kWh avoisinant les 16 c€.

**Mots clés :** centrale solaire de concentration ; centrale à tour ; Brayton ; amortissement ; prix de vente unitaire ; kWh.

### Abstract

The present work is devoted to the technico-economic study of a solar hybrid tower of Brayton type solar-gas eventually located in Tissemsilt. The work on this theme throughout the paper has been developed in the following order. The first part of the thesis contains a general overview of concentrating solar power plants. Here, the various systems and their components are described using several bibliographic resources, followed by a detailed description of solar concentrating power plants with solar tower, its components (radiation receiver, heat transfer fluid ... ect). It also contains a description of the various pilot projects and other ambitious projects completed by a theoretical reminder on bond graphic theory. Finally, it should be noted that a solar concentration field with a hybrid solar-gas tower may be economically viable for the values of the unit selling price per kWh equal to 0,16 €.

### Key words:

solar concentrating plant; central tower; Brayton; amortization ; unit selling price; kWh.

هذا العمل يخصص الدراسة التقنية والاقتصادية لبرج التهجين بالطاقة الشمسية من نوع برايتون (غازي شمسي) تقع في تيسمسيلت ، قد تم تطوير العمل بشأن هذا الموضوع في المذكرة بالترتيب التالي ، يحتوي الجزء الأول من الرسالة على لمحة عامة عن محطات الطاقة الشمسية المركزة لإنتاج الطاقة ، هنا يتم وصف مختلف النظم ومكوناتها باستخدام العديد من الموارد الببليوغرافية، يليها وصفا مفصلا لمحطات الطاقة الشمسية المركزة للابراج الشمسية، مكوناته (استقبال الإشعاع، سائل نقل الحرارة ... إلخ) كما يحتوي على وصف لمختلف المشاريع التجريبية والمشاريع الطموحة الأخرى تكمل بتذكير نظري على الروابط الرسمية ، وأخيرا، نصل الاستنتاجات. وتجدر الإشارة إلى أن مجال التركيز الشمسي للبرج الهجين الغاز الشمسي يمكن أن تكون قابلة للانجاز اقتصاديا لسعر بيع كيلووات في الساعة بالقرب من 16 سنتيم اورو لقيم الوحدة .

#### الكلمات الرئيسية

لمحطات الطاقة الشمسية المركزة ،الابراج الشمسية، قابلة للانجاز، برايتون ، السعر لقيم الوحدة، كيلووات في الساعة