REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département de génie mécanique

Projet de fin d'étude

Présenté pour l'obtention de diplôme de master en génie mécanique

Option : énergie renouvelable en mécanique

Thème

Le potentiel des systèmes solaires a concentration utilisant les miroirs de Fresnel pour la production de chaleur en Algérie

Réalise par :

Souri Hassan

Abdelli Mohammed

Encadre par :

Dr. Bendjebbas Hichem

Année universitaire 2017 / 2018

Remerciement

Tout d’abord, nous devons remercier « ALLAH » le tout puissant de nous avoir donné tout le courage et la santé pour achever ce travail.

A Monsieur **Dr. Bendjebbas Hichem,** pour nous avoir suivi durant notre travail dans le cadre de ce mémoire, pour ces conseils précieux, pour sa disponibilité et la compétence de son encadrement, qu’elle trouve ici notre reconnaissance et notre respect.

Nous remercions également tous les membres du jury de leur avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Ils trouvent ici une expression de notre profond respect.

N'oubliez pas de remercier le personnel de l'UDES Unit Développent d’Equipment Solaire de BOUSMAIL.

Nous avons également eu l'occasion de remercier nos enseignants qui nous ont guidés et guidés tout au long de ces années.

Enfin nous remercions nos familles et nos amis pour leur soutien moral et leurs aides, ainsi que tous ce qui nous avaient soutenu et aidé tout au long de ce travail.

Dédicace

C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde pour leurs sacrifices :

- *A mes chers parents que dieu les gardes et préserve*
- *A mes chères grande parents que je la souhaite une longue vie*
- *A mes frères : hafidh et sans oublier fares*
- *A mes sœurs*
- *A toute la famille Souri et Abdelli*

Je remercie mon ami et binôme Mohammed qui a contribué à la réalisation de ce travail

- *A tous mes amis sans exception*
- *A tous mes collègues de la 2^{éme} années master option énergie renouvelable et 2éme années option ingénierie des matériaux*

Hassan

Dédicace

C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde pour leurs sacrifices :

- *A mes très chers parents qui m'ont guidé durent les moments les plus pénibles de ce long chemin, que Dieu les garde.*
- *A mes frères jumeaux: Ayoub et hamza*
- *A mes sœurs*
- *A toute la famille Abdelli*
- *A tous mes amis sans exception et surtout Bilal**

A tous mes collègues de la 2éme années master option énergie renouvelable «Aissa, Mohamed, Amin, hamza, Nabil et Imane»

A grande remercie à mon binôme Hassan qui a contribué à la réalisation de ce travail

Mohammed

Résumé

La demande urgente par la communauté industrielle sur l'énergie est la nécessité d'une large maîtrise des différentes sources d'énergie disponibles pour atteindre À cet égard, des travaux d'investigation et de recherche ont commencé à remplacer les anciennes sources d'énergie utilisées dans ce domaine Les centrales thermiques, et compensées par l'énergie solaire et la conversion. Les capteurs solaires à concentration, sont les plus utilisés pour convertir Énergie .Dans ce contexte, nous avons évalué le potentiel de production de chaleur solaire à des fins industrielles en utilisant des miroirs de Fresnel en Algérie, Le but de ce projet de recherche est de présenter aux étudiants dans le domaine de l'énergie solaire concentrée pour leur permettre d'absorber les technologies appropriées dans l'industrie.

Mots clés :

Centrales thermiques. Capteurs solaires. Concentration. Miroirs de Fresnel.

Abstract:

The urgent request by the industrial energy community is the need for a broad understanding of the different energy sources available to achieve. In this respect, research and research work has begun to replace the old sources of energy. Used in this field Thermal power plants, and offset by solar energy and conversion. Concentrated solar collectors are the most used to convert Energy. In this context, we evaluated the potential for solar heat production for industrial purposes by using Fresnel mirrors in Algeria; the purpose of this research project is to introduce students in the field of concentrated solar energy to enable them to absorb appropriate technologies in the industry.

Keywords:

Thermal power plants. Solar collectors. Concentration. Fresnel mirrors.

ملخص

إن الطلب الملح من قبل المجتمع الصناعي على الطاقة هو ضرورة الإتقان الواسع لمختلف مصادر الطاقة المتاحة لتحقيق استغلالها وفي هذا الصدد تم البدء بأعمال التحقيق والبحث من أجل استبدال المصادر الطاقوية القديمة المستخدمة في المحطات الحرارية، و تعويضها بالطاقة الشمسية وتحويلها. اللوحات الشمسية لتركيز ،هم الاكثر استعمالا لتحويل الطاقة. في هذا السياق قمنا بتقييم إمكانات إنتاج الحرارة الشمسية للأغراض الصناعية باستعمال مرايا فرينل في الجزائر والهدف من هذا المشروع البحثي هو إدخال الطالب في مجال الطاقة الشمسية المركزة لتمكينه من استيعاب التقنيات المناسبة في مجال الصناعة.

الكلمات المفتاحية :

محطات الطاقة الحرارية. جامعي الطاقة الشمسية. التركيز. مرايا فريسنل.

Table des matières

Résumé 5
Abstract.....5
Abréviation.....13
Introduction générale 18

Chapitre I généralité

I.1 Introduction : 22
I.2 Etat de l'art sur les travaux de réalisation et de recherche dans le domaine des systèmes a concentration linéaire de Fresnel 22
I.3 Principe fondamental de rayonnement solaire 24
I.3.1 Le rayonnement solaire 24
I.3.2 Composantes du rayonnement solaire 25
I.3.3 Modèles pour le rayonnement solaire 25
I.4 Rayonnement solaire dans le monde et en l'Algérie 26
I.4.1 Rayonnement solaire dans le monde 26
I.4.2 Le rayonnement solaire en Algérie 27
I.5 Concertation solaire par les systèmes Fresnel (LFC) 29
I.6 Principaux composants des (LFC) 30
I.6.1 Réflecteurs primaires 30
I.6.2 Réflecteur secondaire 30
I.6.3 Tube absorbeur 31
I.6.4 Système poursuite 32
I.7 Les avantages et inconvénients de système de Fresnel 33
I.7.1 Les avantages 33
I.7.2 Les inconvénients 33
I.8 Coûts des collecteurs de Fresnel linéaires 34

CHAPITRE II Intégrabilité des systèmes solaires a concentration linière de Fresnel dans l'industrie

II.1 Introduction 37

II.2 Intégration de la chaleur solaire dans les processus industriels 37

II.2.1 Intégration du processus 38

II.2.2 Intégration de chaleur solaire 38

II.3 La génération directe de vapeur 39

II.4 Le Stockage 41

II.4.1 Les technologies de stockage 42

II.5 D'autres effets pour augmenter l'efficacité énergétique 44

II.5.1 Orientation du champ solaire 44

II.5.2 Effets d'un champ solaire sur l'efficacité de la chaudière 45

II.5.3 Concepts de chaudière 46

II.5.4 Technologies de poly génération 47

II.6 Outils pour l'analyse financière 48

II.6.1 Évaluation de l'investissement 48

II.6.2 Autres outils financiers 51

II.7 Conclusion 53

chapitre III La situation énergétique en Algérie

III.1 Introduction 55

III.2 Production nationale d'énergie 55

III.2.1 Pétrole 55

III.2.2 Gaz naturel 56

III.2.3 Électricité 56

III.3 Bilan énergétique nationale 58

III.3.1 Production d'énergie primaire 58

III.3.2 Production d'énergie dérivée 60

III.4 La demande et la croissance de la demande énergétique par secteur 61
III.4.1 La consommation d'énergie par secteur..... 62
III.5 Potentiel des énergies renouvelables en Algérie 64
III.5.1 Potentiel Solaire 64
III.5.2 Potentiel Eolien 65
III.5.3 Potentiel de l'énergie nucléaire 66
III.5.4 Potentiel de l'énergie Géothermique 67
III.5.5 Potentiel Hydraulique 67
III.5.6 Le Potentiel de la Biomasse 68
III.6 Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables 68
III.7 Potentiel de l'énergie solaire thermique en Algérie 69
III.7.1 La demande en matière de chaleur du secteur industriel 70

Chapitre IV Etude de potentiel des systèmes à concentration linéaires de Fresnel en Algérie.

IV.1 Introduction 73
IV.2 Topographie algérienne et son potentiel solaire 73
IV.3 Les applications des systèmes Fresnel dans les processus industriels 75
IV.4 Énergie solaire thermique..... 77
IV.4.1 Collecteur linéaire de Fresnel..... 77
IV.4.2 Collecteur cylinro-parabolique 78
IV.5 Configuration d'une unité industrielle..... 79
IV.6 Paramètres économiques 80
IV.7 Etude des rendements de systèmes solaires a concentration linéaire de Fresnel pour déférents sites algériens 80

Conclusion générale ……..86

Références……87

Liste des figures

Figure I - 1 : Premier prototype de Concentrateur Linéaire de Fresnel, Marseille (France) 1963 23
Figure I - 2: Rayonnement solaire reçu par une surface au sol 26
Figure I - 3 : Ceinture solaire, régions du globe pour lesquelles l'ensoleillement direct annuel excède 2000 kWh/m² /an [9]. 27
Figure I - 4: Rayonnement solaire en Algérie 28
Figure I - 5 : Principe d'un concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel 29
Figure I - 6 : Collecteurs linéaires de centrales électriques de Fresnel (Source: Häberle 2002, Novatec Solar, Ausra) 30
Figure I - 7 : Récepteur monotube Novatec Solar avec Concentrateur secondaire de forme parabolique (source: Novatec Solar) 31
Figure I - 8 : Récepteur à tubes multiples Ausra avec secondaire trapézoïdale simple Réflecteur (source: Ausra (gauche)) 31
Figure I - 9 : Tubes absorbants pour centrales électriques de Fresnel développés par l'Institut ISE Fraunhofer (source: ISE Fraunhofer Institute) 32
Figure I - 10 : Systèmes de suivi permettant une rotation à faible force des miroirs: la conception circulaire d'Ausra (à gauche) et le relèvement asymétrique de Solarmundo (à droite) (sources: AusraHäberle (2002)) 32
Figure I - 11 : Fonction de coût des collecteurs linéaires de Fresnel (Industriel Solar GmbH) 35

Figure II - 1 : Possibilités de combiner le système solaire avec l'apport de chaleur existant 38
Figure II - 2: Représentation au niveau de l'approvisionnement et du processus d'un système utilisant la vapeur comme milieu (Lauterbach, n.d.) 39
Figure II - 3 : A gauche, centrale avec un circuit primaire et un circuit secondaire. A droite, centrale à génération directe de vapeur 41
Figure II - 4: Schéma descriptif d'un réservoir accumulateur de vapeur 44
Figure II - 5 : Résultats mensuels pour les champs NS et EW pour une configuration de modèle aléatoire 45
Figure II - 6 : Coupe transversale à travers une chaudière à vapeur 46
Figure II - 7 : Générateur de vapeur à grande vitesse (Spirax Sarco, 2011) 47

Figure III - 1: Puissance installée par producteur……....57
Figure III - 2: Puissance installée par type d'équipement 58
Figure III - 3: Structure de la production d'énergie primaire 60
Figure III - 4: Structure de la production d'énergie dérivée..... 61
Figure III - 5 : Evolution de la consommation finale par secteur l'horizon 2030 64
Figure III - 6: irradiation globale et potentiel électricité solaire..... 65
Figure III - 7: Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010)..... 66
Figure III - 8: Carte de température des sources thermales. 67
Figure III - 9: Consommation d'énergie dans différents secteurs (2015) 70

Figure IV - 1 : Carte solaire de l'Algérie……..…...74
Figure IV - 2 : Collecteur linéaire de Fresnel (LFC). Source: AREVA solar 78
Figure IV - 3 : Collecteur cylindro-parabolique. Source: Enerstar 79
Figure IV - 4 : Configuration de l'unité industrielle analysée 79
Figure IV – 5 : Courbes d'efficacité de sites Alger. 82
Figure IV - 6 : Courbes d'efficacité de sites Médéa. 82
Figure IV - 7 : Courbes d'efficacité de sites Ghardaïa 83
Figure IV - 8 : Courbes d'efficacité de sites Adrar. 84

Liste des tableaux

Tableau I- 1 : Potentiel solaire en Algérie 28

Tableau II- 1 : les avantages et inconvénients.....…...44
Tableau II - 2 : Sorties en poly-génération à différents niveaux de température....……48

Tableau III - 1: Production pétrolière (milliers de barils par jour)…….56
Tableau III - 2: Production d'énergie primaire 59
Tableau III - 3: Production d'énergie dérivée 60
Tableau III - 4 : Evolution de la consommation finale par secteur en pourcentage à l'horizon 2030 63
Tableau III - 5: vitesse moyenne du vent en Algérie 65
Tableau III - 6: les processus industriel qui demande la chaleur 71

Tableau IV - 1 : Densité de puissance thermique et facteur de capacité par classe DNI……75
Tableau IV - 2 : Plage de température des processus industriels potentiels..... 76
Tableau IV - 3 : Coûts de la technologie solaire 80
Tableau IV - 4 : efficacité du champ solaire instantané pour sites d'Alger. 81
Tableau IV - 5 : efficacité du champ solaire instantané pour sites de Médéa 82
Tableau IV - 6 : efficacité du champ solaire instantané pour sites de Ghardaïa. 83
Tableau IV - 7 : efficacité du champ solaire instantané pour sites d'Adrar. 83

Liste des abréviations

AIEA	l'Agence internationale de l'énergie atomique
BP	compagnie pétrolière britannique.
CSP	system solaire à concentration (Concentrated solar power)
CNIM	l'entreprise de construction navale et industriel de la méditerranée
CSTPT	technologies d'énergie solaire thermique concentrée ()
C_{SHG}	costs for solar heat generation
CLFR	concentrateur linéaire de Fresnel compact (compact linear Fresnel reflector)
CC	cycle combiné.
CH	cycle hybride.
DSG	Génération Directe de Vapeur (Direct Steam Genration)
DNI	Irradiation normale directe (Direct Normal Irradiation)
ECA	Expanded Cork Agglomerate
ENEA	Agence nationale pour les nouvelles technologies
ER	énergie renouvelable (renewable energy)
GPL	Les Gaz de pétrole liquéfiés.
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
HYD	hydraulique.
HTF	heat transfer fluid
IRR	taux de rentabilité interne (Internal rate of return)
IPP	Producteurs indépendants d'électricité
LCOH	coûts de production de chaleur (Levelized Cost of Heat)

LFR concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel (linear Fresnel reflector)

MIRR (Modified internal rate of return)

NPV valeur actuelle nette (net present value)

ORC cycle organique de Rankine (organic Rankine cycle)

PE Puerto Errado (nom de central LFC)

PV photovoltaïque

PACES entreprise a d'ailleurs obtenu le prix l'innovation technique au congrès

PS 10 Planta solar 10

PCM Matériau à changement de phase (Phase Change Material)

PP période de récupération (playback period)

PIB produit intérieur brut.

PTC Concentrateur cylindro-parabolique (Parabolic trough collector)

SHIP Chaleur solaire pour les processus industriels (Solar heat for industriel processes)

SHIPc Chaleur solaire pour les processus industriels avec des collecteurs concentrés (Solar heat for industrial processes with concentrating collectors)

SPG solar power group

SPE Société Algérienne de Production de l'Électricité.

SKTM Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida.

SKS Shariket Kahraba Skikda mise en service en 2006.

SKB Shariket Kahraba Berrouaghia (Médéa) mise en service en 2007.

SKH Shariket Kahraba Hadjret Ennouss « SKH » mise en service en 2009.

SKT Shariket Kahraba Terga « SKT » mise en service en 2012.

SKD	Shariket Kahraba de Koudiet Edraouch « SKD » mise en service en 2013.
TV	turbine à vapeur.
TG	turbine à gaz.
Mb/j	(millions de barils par jour)
GW_h	Giga Wattheure
K Tonnes	Kilo Tonnes
Tec	Tonne équivalent charbon
Tep	Tonnes Equivalent Pétrole
Tep/an	Tonnes Equivalent Pétrole par année.
K Tep	Kilo tonne équivalent pétrole
M Tep	Million de tonnes équivalent pétrole
MW	megawatt
KWh/m^2	kilo watt-hour par meter carré
KM	kilomètre
MW_e	mégawatt électrique
S	entropie
C	capacité thermique (J/g-k)
P	Pression de vapeur (bar)
T	température (°C - K)
D	Densité (kg / m^3)
V	Volume. Capacité thermique (kJ / m^3-K)
N	viscosité (m^2/s)
λ	Conductivité (W / m-K)

η_{sf} efficacité du champ solaire instantané.

η_0 efficacité optique.

c_1 coefficient de perte de chaleur du premier ordre ($W / K^2 . m^2$).

c_2 coefficient de perte de chaleur du second ordre ($W / K^2 . m^2$).

ΔT différence de température

G_T rayonnement solaire incident (W / m^2).

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE :

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croitre, posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre, et sur l'épuisement prochain des ressources fossiles. Suite à cette prise de conscience, un développement économique préservant l'environnement s'avère absolument nécessaire.
Ce problème a conduit tous les pays du monde, y compris l'Algérie, à se tourner vers d'autres formes de ressources propres et disponibles, connues sous le nom d'énergies renouvelables. Toutes les énergies renouvelables (solaire, éolienne hydraulique, biomasse...) proviennent du soleil transformées ensuite par l'environnement terrestre.

Ainsi, les énergies solaire et éolienne sont les plus développées et présentent de nombreux avantages. En effet, ce sont des énergies complètement propres, elles n'émettent ni déchets ni gaz à effet de serre. Leurs fonctionnements ne polluent ni l'atmosphère ni le sol ni l'eau et, convertissent en électricité une ressource abondante, gratuite et illimitée à l'échelle mondiale.
Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire en Algérie le solaire photovoltaïque (PV) qui transforme directement le rayonnement solaire en électricité par la voie de panneaux solaires , et le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement solaire en chaleur en utilisant des capteurs solaire thermiques. le solaire thermique peut être décomposé en deux catégories : le solaire thermique à basse température pour le chauffage de l'eau et de l'air pour des utilisations domestiques a des températures ne dépassants pas les 80°C et le solaire thermique a concentration (CSP) produisant de la chaleur pour des application à grande échelle a des températures allant de 120°C jusqu'à plus de 600°C [13].

Les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation commerciale. Ces technologies se basent sur des collecteurs qui concentrent la radiation solaire et réchauffent à haute température un fluide caloporteur. Ce fluide est utilisé pour la production de la vapeur d'eau qui est ensuite utilisées soit directement pour des applications industrielles soit pour produire de l'électricité en faisant des turbines à vapeur.
Les principales technologies de CSP sont au nombre de quatre. Les centrales à tour, Les cylindro-paraboliques, les dishs Stirling (parabolique) et les systèmes de concentration linéaire de Fresnel.

Afin de diminuer les coûts des systèmes CSP de Fresnel, plusieurs groupes de recherche travaillent sur des prototypes de collecteurs de Fresnel à focalisation linéaire.

Le réflecteur linéaire de Fresnel utilise un champ de longues bandes linéaires de miroir pour concentrer la lumière sur un récepteur linéaire fixe. Les miroirs sont plats ou légèrement courbés, et tournent continuellement autour de leurs axes afin que la réflexion des rayons solaires soit toujours sur le récepteur. Un petit nombre de prototypes (environ 10 MWe) [2] ont été construits et sont utilisés pour des applications allant de la production de vapeur à température moyenne pour les centrales électriques au refroidissement solaire thermique.

Dans ce mémoire, nous avons suivi le plan de travail suivant :

- Dans le premier chapitre nous avons mis la généralité sur les systèmes solaires à concentration ainsi que les travaux de réalisation et de recherche dans le domaine des systèmes à concentration linéaire de Fresnel.
- Le deuxième chapitre a été consacré pour l'étude de l'intégrabilité des systèmes solaires à concentration linière de Fresnel dans l'industrie.
- Dans le troisième chapitre nous avons fait des statistiques concernant la situation et bilan énergétique en Algérie.
- Dans le dernier chapitre, une étude du potentiel de quelques sites en Algérie pour la production de chaleur a été effectuée en se basant sur l'effet de la température du fluide caloporteur sur le rendement du système.

CHAPITRE I

Généralités

I.1 Introduction :

Les systèmes solaires à concentration collectent uniquement le rayonnement solaire direct, alors que les systèmes plans non concentrateurs captent également le rayonnement diffus. La part de rayonnement direct dans le rayonnement total dépend de l'épaisseur et de la nature de l'atmosphère traversée. Une faible latitude, une altitude élevée, une faible teneur en gouttelettes, poussières ou aérosols favorisent la transmission directe du rayonnement [9].

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques qui réside dans la mise en forme du verre pour obtenir la forme parabolique requise. Afin de diminuer ce coût, plusieurs groupes de recherche travaillent sur des prototypes de collecteurs de Fresnel à focalisation linéaire. L'idée est de faire une approximation de la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans [5].

I.2 Etat de l'art sur les travaux de réalisation et de recherche dans le domaine des systèmes a concentration linéaire de Fresnel :

Au XIXe siècle l'italien Alessandro Battaglia réalise des travaux pionniers sur les concentrateurs solaires. Ses brevets, sortis de l'oubli récemment, sont inventifs. Aucune mise en œuvre pratique de l'époque n'a cependant été retrouvée. Les travaux de Battaglia peuvent être vus comme l'origine de la technique de concentration par réflecteurs linéaires de Fresnel.

Les travaux les plus significatifs ont été réalisés par Giovanni Francia (1911-1980), également italien. Entre autres travaux scientifiques et techniques, il s'intéressa à l'énergie solaire. Au début des années 1960, il développa un système concentrateur linéaire de Fresnel à réflexion (LFR). Il a conçu et monté un premier prototype à Gènes en 1963. L'année suivante, il a construit et testé un prototype de LFR à Marseille. Francia était persuadé que l'énergie solaire ne pouvait se développer qu'avec une rentabilité économique et une technique simple. Ainsi les miroirs plans étaient un point clé décisif pour la percée du solaire à grande échelle [4].

Depuis les années 1990, David Mills, en Australie, développe un LFR. Il introduit le concept de réflecteur compact linéaire de Fresnel (CLFR). Il s'agit de disposer plusieurs lignes focales en parallèle. On peut ainsi optimiser l'utilisation des miroirs en choisissant vers quelle ligne focale chaque miroir réfléchit la lumière [4].

Au début du nouveau millénaire, la technologie de Fresnel a gagné en influence. La première entreprise à avoir construit un prototype était Solarmundo de Belgique. Solarmundo a commencé à tester un collecteur de 2 500 m² à Liège, en Belgique, en 2001. Ils ont attiré l'attention avec leur prétention d'être considérablement plus rentable que d'autres systèmes de concentration de rayonnement existants. La présentation du prototype Solarmundo a été le signal d'un intérêt croissant pour la technologie Fresnel [7].

Aujourd'hui le développement a bien avancé. Plusieurs entreprises proposent des systèmes à concentration linéaire de Fresnel LFR. Les quartes sociétés les plus avancées sont : Novatec Solar (anciennement Novatec-Biosol), Solar Power Group (SPG), Areva Solar (anciennement Ausra) et Industriel Solar (anciennement PSE, puis Mirroxx). Il y a de nouveaux acteurs qui émergent, notamment en France : la CNIM s'est dotée d'un prototype de sa conception en 2010, Solar Euromed développe aussi son prototype de concentrateur LFR. ALSOLEN, du groupe ALCEN, est un nouvel acteur français, annoncé en octobre 2011, qui vient encore renforcer le secteur du LFR. Le système Solar Fire, proche d'une géométrie LFR, est une conception libre de droits et simplifiée à l'extrême, pour une diffusion large du système, en particulier dans les pays pauvres [4].

On peut s'attendre à beaucoup de travail de test et d'amélioration des différents designs. Ils sont encore des sujets à évolutions, vu le peu de retours d'expériences. En 2004, la société australienne Solar Heat and Power, qui a déménagé aux États-Unis et a changé son nom pour Ausra, a construit un collecteur de Fresnel à Liddell / Australie qui produisait de la vapeur et avait une puissance thermique de 1 MW [7].

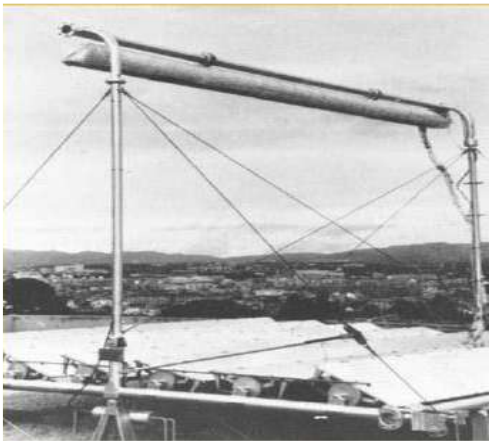


Figure I - 1 : Premier prototype de Concentrateur Linéaire de Fresnel, Marseille (France) 1963 [4].

En 2008, Ausra a construit la première centrale électrique de Fresnel (solaire seulement) à Bakersfield / Californie. Sa puissance électrique atteint 5 MW. Ausra a été acquise en 2010 par le groupe français Areva [7].

La première centrale commerciale de Fresnel en Europe, PE 1, a été construite par Novatec Solar AG (à l'époque Novatec Biosol). Le PE 1 est situé à Murcia / Espagne et a une puissance électrique de 1,4 MW. Il a commencé ses activités commerciales en mars 2009, une deuxième centrale de Fresnel, PE 2, est en construction. Avec une puissance électrique de 30 MW, elle sera la plus grande centrale électrique de Fresnel au monde au moment de son démarrage [7].

Ces premières centrales LFR sont très importantes, car elles fournissent les premiers résultats expérimentaux. On peut ainsi confronter ces résultats aux prédictions des simulations. L'expérience concrète du fonctionnement des centrales est aussi très précieuse. Cela permet d'optimiser les stratégies de contrôle du système. Ces résultats permettent également de comparer les différentes voies technologiques. En particulier, on peut analyser les performances relatives des concentrateurs linéaires de Fresnel par rapport au Cylindro-Parabolique (PT). On ne sait toujours pas aujourd'hui laquelle de ces deux technologies donnera les meilleurs résultats en termes de coût d'électricité produite. Il apparaît que les deux filières sont difficiles à départager. A l'heure actuelle, à leur niveau de développement, la qualité de l'installation joue plus que les choix techniques. Un bon système LFR sera meilleur qu'un mauvais cylindro-parabolique et réciproquement [4].

Il est indéniable que ces dernières années, l'intérêt pour la technologie LFR monte en puissance. Le congrès Solar PACES est un bon indicateur de l'activité sur les LFR. Jusqu'en 2008 classée dans les "concepts émergents", la technologie LFR ne comptait que 2 ou 3 contributions. En 2009, 13articles ont été retenus, 9 articles en 2010, 13 en 2011 [4].

I.3 Principe fondamental de rayonnement solaire :

I.3.1 Le rayonnement solaire :

L'énergie émise par le soleil voyage jusqu'à la terre sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement possède une gamme de fréquences différentes. La quantité d'énergie disponible au cours du trajet entre le soleil et l'atmosphère extérieur de la terre est égale à environ 1367w/m^2 [13]. Il en résulte qu'au cours d'une journée ensoleillée, la

quantité disponible à la terre dans la direction du soleil est généralement plus ou moins de1100w/m ^{2} [10]. L'énergie solaire disponible est principalement en fonction de la position du soleil dans le ciel et de la nébulosité. Sur une base mensuelle ou annuelle, la quantité d'énergie solaire disponible dépend également de l'emplacement géographique. De plus l'énergie solaire utilisable dépend de l'énergie solaire disponible.

I.3.2 Composantes du rayonnement solaire :

Les processus affectant les rayons solaires sont trop complexes pour être abordé d'une manière détaillée. D'une façon générale, nous disons que les radiations solaires arrivant au sommet de l'atmosphère sous d'onces électromagnétiques se répartissent en premier lieu en deux parties :

La première partie est directement réfléchie vers l'espace avant de s'enfoncer dans l'atmosphère. La deuxième en pénétrant dans l'atmosphère subit des réflexions et des diffractions pour être à son tour, soit renvoyée vers l'espace, soit dirigée vers la terre.

En outre dans l'atmosphère, la vapeur d'eau et de multiple gaz absorbent de façon très irrégulière certaine radiation caractérisée par leurs longueurs d'onde. Citons par exemple la vapeur d'eau, qui a une épaisseur variable selon le climat et la saison (elle varie entre quelques millimètres et quelques centimètres), est responsable de l'absorption des rayons infrarouges.

Les radiations absorbées par les composantes de l'atmosphère sont ensuite émises dans les directions, il en résulte que parmi les radiations solaires arrivant finalement à la terre, quelques-unes sont fournies par les nuages et les autres composantes de l'atmosphère. Une fois ces radiations arrivées au sol, une fraction est réfléchie directement vers le ciel, l'autre sera gagnée par la terre. En conclusion la terre reçoit l'énergie du soleil et de l'atmosphère, pour simplifier ces multiples réflexions et émissions, on subdivise le rayonnement solaire provenant au sol en rayonnement direct et rayonnement diffus [10].

I.3.3 Modèles pour le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire hors atmosphère suit une ligne directe du soleil vers la terre. En traversant l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire ne subit aucune modification (absorption ou réflexion), c'est ce qu'on appelle le *rayonnement direct*, l'autre partie est diffusée par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, c'est ce qu'on

appelle le *rayonnement diffus.* La somme du rayonnement direct et diffus est le rayonnement global comme la montre la figure ci-dessous [9] :

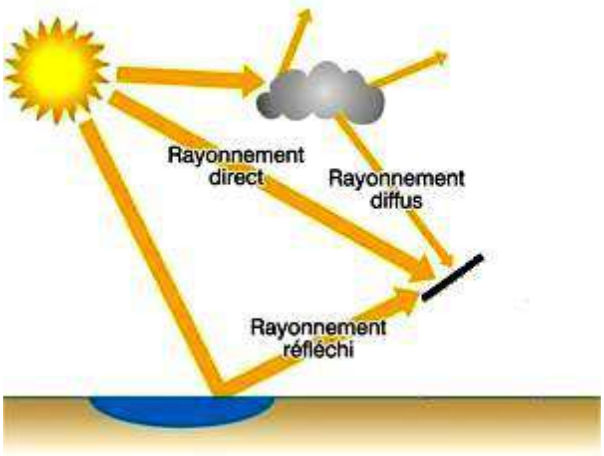


Figure I - 2: Rayonnement solaire reçu par une surface au sol [11].

I.4 Rayonnement solaire dans le monde et en l'Algérie :

I.4.1 Rayonnement solaire dans le monde :

Les zones désertiques, situées sous des latitudes proches de l'équateur sont les plus favorables à l'énergie solaire. Certains pays développés proches de ces zones d'ensoleillement commencent à exploiter cette énergie, grâce à différents procédés, dont les concentrateurs solaires. Les zones dans lesquelles le rayonnement solaire est particulièrement important vont permettre la création de site de production électrique à grande échelle, c'est le cas en Californie où se trouve actuellement une centrale solaire d'une puissance de 354 MW [11].

Un calcul simple montre qu'en appliquant un rendement de conversion énergétique de 10%, une surface de collecteurs de 550 000 km² recevant un ensoleillement direct annuel de 2200 kWh/m² fournirait à elle seule 10,4 Gtep/an, c'est-à-dire l'équivalent des besoins mondiaux en énergie [9].

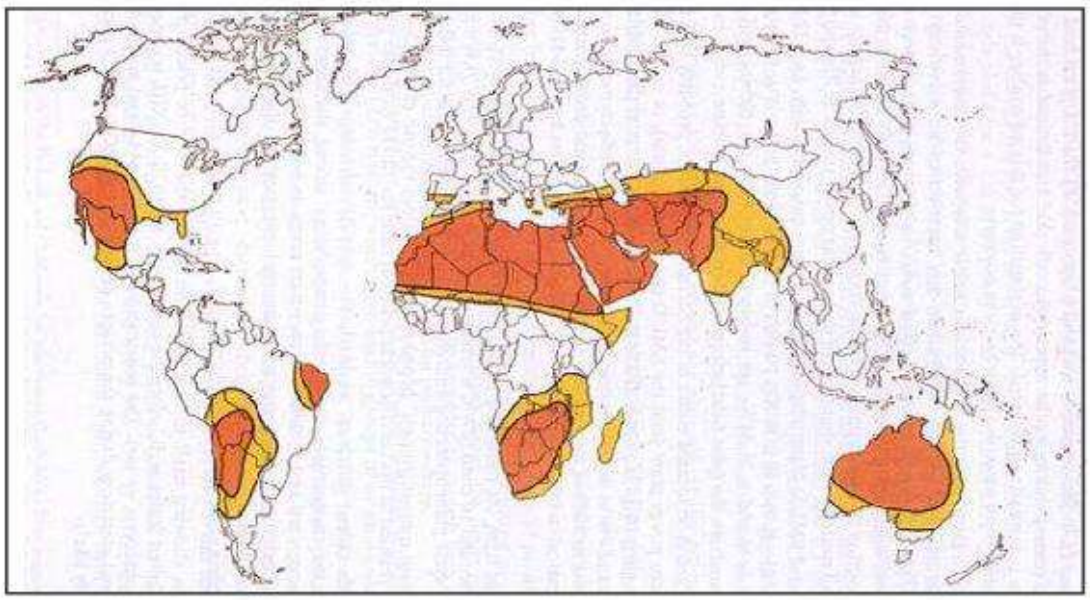


Figure I - 3 : Ceinture solaire, régions du globe pour lesquelles l'ensoleillement direct annuel excède 2000 kWh/m² /an [9].

I.4.2 Le rayonnement solaire en Algérie :

I.4.2.1 Situation géographique de l'Algérie :

L'Algérie est l'un des plus grands pays d'Afrique avec une superficie de 2 381 741 km^2 sur les 30 millions de km^2 du continent africain, soit près du 1/12 de la surface totale de l'Afrique.

C'est le plus vaste des états africains, il s'étend entre les latitudes 18° et 38° Nord et entre les longitudes 9°Ouest et 12°Est dont les principales dimensions seraient [11]:

- 1900 km du Nord au Sud,
- 1800 km de l'Ouest à l'Est,
- 2100 km du Nord-Est au Sud-Ouest,
- 1200 km de côtes sur la Méditerranée.
- Le Sahara qui couvre les 5/6 de la superficie du pays.

Les diverses études entreprises jusqu'à présent sur le potentiel énergétique solaire en Algérie font apparaître des quantités énergétiques considérables et très appréciables pour le développement. L'Algérie avec plus de deux millions de km^2 de superficie, reçoit l'équivalent

d'environ 30 fois l'énergie consommée dans le monde. Cette importante disponibilité fait de l'Algérie un réservoir d'énergie inépuisable.

En termes d'insolation, la moyenne quotidienne nationale est supérieure à 5 kWh/m^2, et la durée d'ensoleillement sur le territoire national dépasse les 2500 heure/an [11].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.4.

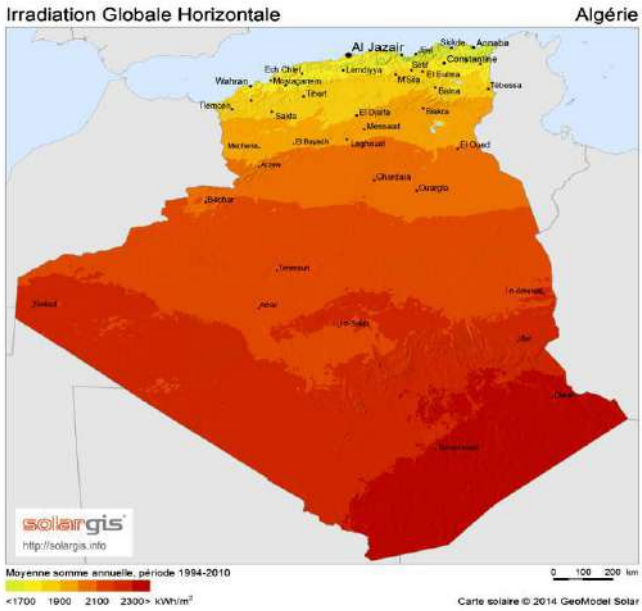


Figure I -4: Rayonnement solaire en Algérie [11].

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m^2/an au Nord et 2263kWh/m^2/an au Sud du pays [13].

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
rayonnement moyenne reçue (KWh/m^2/an)	1700	1900	2650

Tableau I- 1: Potentiel solaire en Algérie [13].

I.5 Concertation solaire par les systèmes Fresnel (LFC) :

En utilisant des réflecteurs afin de concentrer les rayons du soleil sur l'absorbeur d'un capteur solaire, cela permet de diminuer grandement la taille de l'absorbeur, ce qui réduit les pertes de chaleur et augmente son efficacité à hautes températures, un autre avantage de ce système est que les réflecteurs sont sensiblement moins coûteux, par unité de surface, que les capteurs, comme indiqué sur la figure I.5 [10].

La technologie de type Fresnel utilise les miroirs plans qui sont disposés de façon à reproduire la forme cylindro-parabolique. Les miroirs plans sont équipés d'un système de motorisation qui permet de suivre le soleil sur un seul axe EST-OUEST afin de concentrer les rayons vers un récepteur linéaire situé sur la focale. La température de fonctionnement varie de 270 °C à 550 °C, avec un facteur de concentration allant de 25 à 100. Dans cette centrale, le fluide de travail est soit de l'huile, soit de l'eau [12].

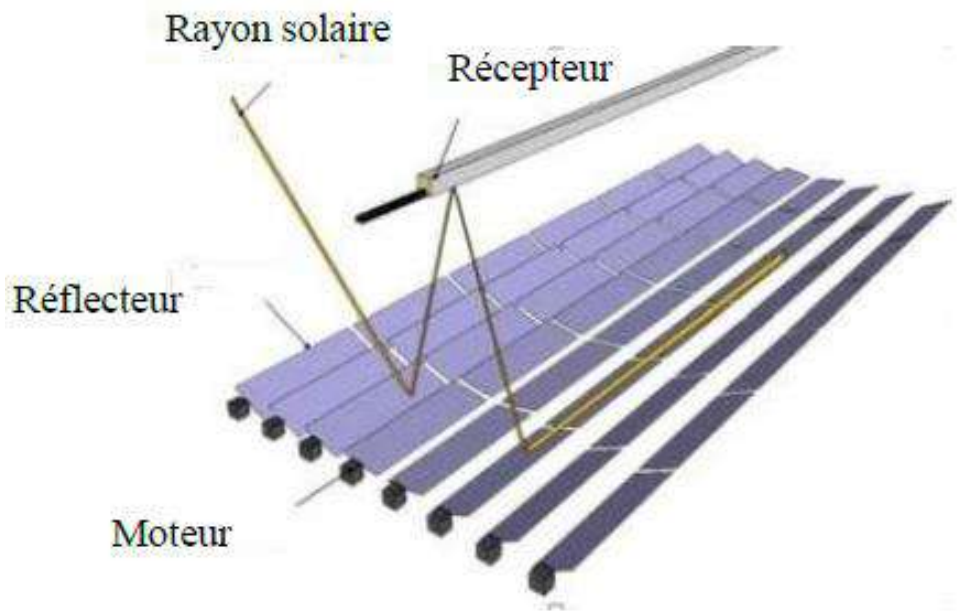


Figure I - 5: Principe d'un concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel [4].

Un premier étage de réflecteur est installé sur le sol. Le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur. Ce second étage de réflecteurs, en plus de réfléchir le rayonnement, joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur. Il est en effet recouvert d'une importante couche d'isolation en sa partie supérieure. La partie inférieure est quant à elle isolée par une vitre [5].

I.6 Principaux composants des (LFC) :

I.6.1 Réflecteurs primaires :

Pour les réflecteurs primaires de LFC, des miroirs plats peuvent être utilisés, qui sont cintrés mécaniquement. Ceci est possible en raison de la distance relativement grande entre le réflecteur primaire et l'absorbeur et peut faire baisser les coûts. Le champ de collecteur est défini par le nombre de récepteurs primaires, leur largeur et leur longueur ainsi que la distance entre les réflecteurs. Le verre des miroirs devrait être mince et avec une faible teneur en fer pour réduire l'absorption. En même temps, le verre et la couche réfléchissante doit résister à des conditions environnementales difficiles [6].



Figure I - 6: Collecteurs linéaires de centrales électriques de Fresnel (Source: Häberle 2002, NovatecSolar, Ausra) [7].

I.6.2 Réflecteur secondaire :

Dans le LFC, des réflecteurs secondaires sont utilisés puisque tout le rayonnement réfléchi n'atteint pas directement l'absorbeur. De ce fait, plus de réflecteurs peuvent être installés par récepteur. De plus, le secondaire le réflecteur réduit les pertes par convection au niveau de l'absorbeur [6].

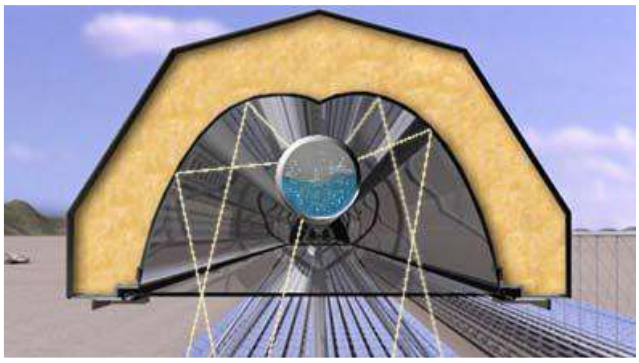


Figure I - 7:Récepteur monotube Novatec Solar avec Concentrateur secondaire de forme parabolique (source: Novatec Solar) [7].

Le récepteur du système Ausra est différent du récepteur Novatec Solar. Alors que ce dernier a un tube absorbeur et a donc besoin d'un miroir concentrateur secondaire avec une géométrie de concentrateur exacte, Ausra a opté pour un récepteur multitube. Ceci a l'avantage que la zone de l'absorbeur est plus grande. Dans ce système, le concentrateur secondaire n'a pas la même importance que dans le système Novatec Solar. Le récepteur Ausra a une forme trapézoïdale avec une géométrie de concentrateur secondaire simple correspondante [7]:

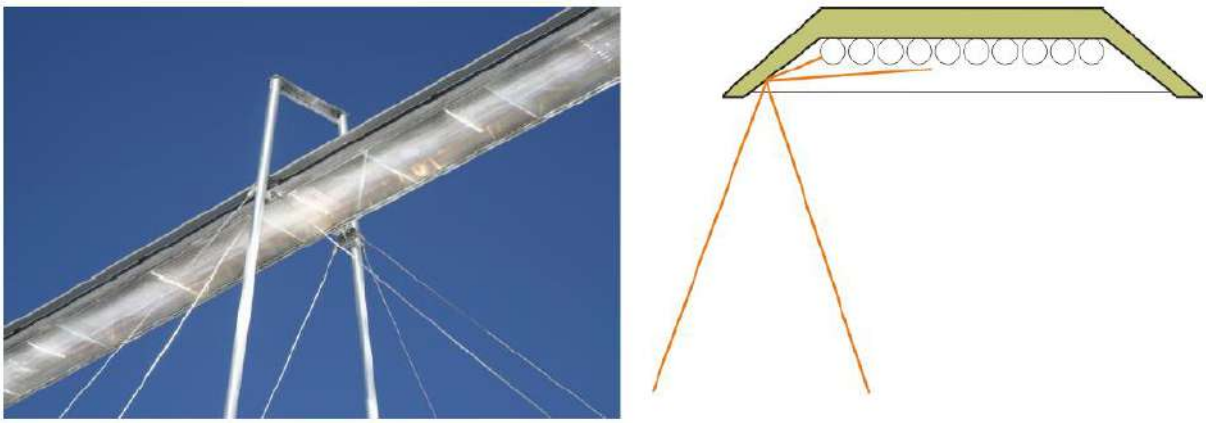


Figure I -8:Récepteur à tubes multiples Ausra avec secondaire trapézoïdale simple Réflecteur (source: Ausra (gauche))[7].

I.6.3 Tube absorbeur :

Le tuyau absorbeur collecte le rayonnement entrant et le transporte vers le caloporteur. Donc, son revêtement sélectif devrait avoir une faible émittance et une absorption élevée. De plus, il a pour supporter des températures élevées. Parfois, le tuyau d'absorbeur est protégé par une couverture en verre par le bas. Dans d'autres installations, des tubes sous vide sont utilisés comme dans le PTC (Concentrateur cylindro-parabolique). Pour éviter colmatage seule l'eau traitée peut être utilisée [6].



Figure I -9: Tubes absorbants pour centrales électriques de Fresnel développés par l'Institut ISE Fraunhofer (source: ISE Fraunhofer Institute) [7].

I.6.4 . Système poursuite :

Comme les auges paraboliques, les collecteurs de Fresnel ont un seul axe de suivi. L'angle modifié en permanence est l'angle d'inclinaison. Cet angle est différent pour les différentes rangées de miroirs.

Comparé aux collecteurs cylindro-paraboliques, le système de suivi des collecteurs de Fresnel a l'avantage de nécessiter des forces plus faibles pour déplacer les miroirs. Les miroirs sont beaucoup plus petits et la structure du miroir peut être conçue facilement de telle sorte que le centre de gravité se trouve dans l'axe de rotation, de sorte que les moteurs et les engrenages peuvent être assez simples.

Les figures suivantes montrent deux possibilités pour réaliser que le centre de gravité des constructions de miroirs se situe dans l'axe de rotation. Il y a la solution Ausra d'une part qui intègre le miroir dans une structure circulaire et d'autre part la solution Solarmundo qui utilise une structure asymétrique pour maintenir le centre de gravité fermé à l'axe de rotation [7].

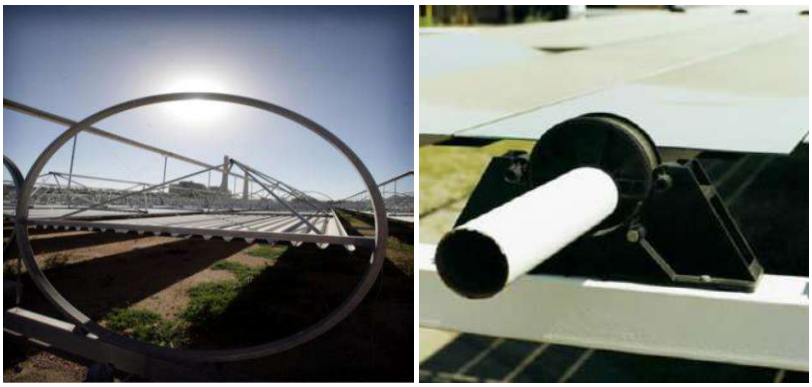


Figure I - 10: Systèmes de suivi permettant une rotation à faible force des miroirs: la conception circulaire d'Ausra (à gauche) et le relèvement asymétrique de Solarmundo (à droite) (sources: AusraHäberle (2002)) [7].

I.7 Les avantages et inconvénients de système de Fresnel :

I.7.1 Les avantages :

Le choix du capteur solaire thermique optimal dépend de l'application prévue, principalement température du processus. Les LFC conviennent aux températures moyennes (100 °C-400°C). Sous le Les principaux avantages du LFC sont énumérés, suite à une étude sur le projet Solarmundo. La plupart d'entre eux doivent être compris par rapport à (Concentrateur cylindro-parabolique) PTC [6].

- L'utilisation de miroirs plats offre un grand potentiel de réduction des coûts.
- Les faibles charges de vent réduisent la rupture des rétroviseurs et réduisent les coûts pour les moteurs et les engrenages.
- Le LFC peut avoir un coût d'investissement plus faible et une durée de vie plus longue, car il n'y a pas de haute pression flexible les articulations sont nécessaires comme dans le PTC.
- Meilleure efficacité d'utilisation des terres par rapport à PTC, car le champ de capteurs peut être plus dense emballé.
- Faible coût de fonctionnement et d'entretien grâce à un accès et un nettoyage faciles.
- Utilisation multiple des terres puisque les collecteurs peuvent être installés sur les toits.
- Avantages de la génération directe de vapeur (DSG) puisque la plupart des absorbeurs de radiation au-dessous de [6].

I.7.2 Les inconvénients :

L'inconvénient d'efficacité des centrales de Fresnel par rapport aux centrales paraboliques est principalement dû aux pertes optiques. Le collecteur de Fresnel ne suit pas le Soleil, comme c'est le cas avec les creux paraboliques. Ce qui suit le Soleil sont les miroirs individuels ou les rangées de miroirs. Ceci implique des pertes optiques qui n'existent pas (ou qui n'existent pas dans le même sens) aux creux paraboliques:[7]

- Les collecteurs de Fresnel n'ont pas seulement des pertes de cosinus longitudinales, mais ils sont également affectés par des pertes de cosinus transversales. Au contraire, les auges paraboliques ne présentent que des pertes de cosinus longitudinales. Les pertes transversales n'existent pas en raison du suivi de l'auge complète. C'est le facteur de perte optique supplémentaire le plus important chez les collecteurs de Fresnel par rapport aux creux paraboliques.
- Les rangées de miroirs parallèles s'égrènent les unes les autres à des angles d'incidence transversaux élevés. Ils bloquent également des parties du rayonnement réfléchi à des angles d'incidence transversaux élevés.
- Il est impossible d'atteindre des courbures de miroir idéales parce que l'angle d'incidence transversal sur eux change au cours de la journée. L'astigmatisme résultant dans le champ de Fresnel est inévitable. Cependant, ce problème est atténué par le concentrateur secondaire et / ou par un récepteur multitube plus large, ce qui amplifie la taille de la cible de rayonnement. Bien entendu, cela se fait au détriment d'une étape de réflexion supplémentaire (dans le cas d'un concentrateur secondaire), ce qui implique une perte supplémentaire et / ou de l'augmentation de la surface absorbante, ce qui entraîne des pertes thermiques plus importantes. La perte de réflexion supplémentaire dans le concentrateur secondaire, cependant, est maintenue très faible en utilisant des miroirs de taille frontale de sorte qu'aucune couche de verre supplémentaire ne doit être traversée [7].

I.8 Coûts des collecteurs de Fresnel linéaires :

La technologie (Concentrateur cylindro-parabolique) PTC est même la technologie dominante pour l'énergie solaire concentrée au cours des dernières années plus d'entreprises ont commencé à travailler sur le LFC. Malgré le même principe de fonctionnement, les dessins des systèmes diffèrent. Pour la production d'électricité, les LFC sont généralement plus grands températures plus élevées). De plus, les coûts dépendent de la taille du système, comme le montre la Figure (I-11) [6].

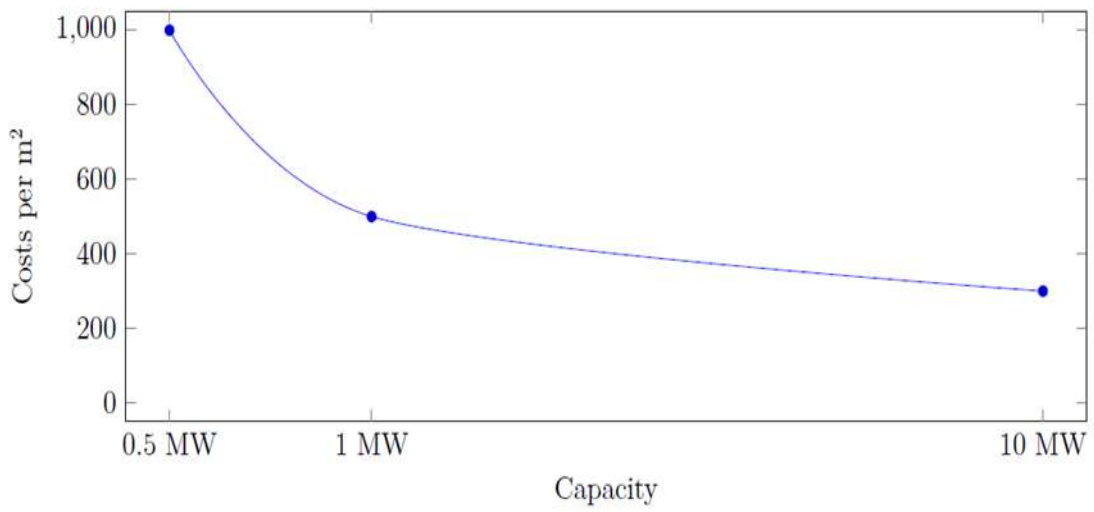


Figure I - 11: Fonction de coût des collecteurs linéaires de Fresnel (Industriel Solar GmbH) [6].

Dans une tentative de comparer le seuil de rentabilité de LFC avec PTC pour la production d'électricité Morinet al. Ont constaté que «peu de données sur les coûts du CFL commercial sont publiées aujourd'hui» [6].

Outre les incertitudes des prix absolus, les projets dont la taille est inférieure à une certaine taille (par exemple 1 MW) pas raisonnable en raison de la structure de coûts. En même temps, de plus grands projets deviennent de plus en plus économiques. La raison de la forte baisse des prix est le montant élevé des coûts fixes (pompes, contrôle, planification). Pour comparer les prix avec d'autres technologies, il est important d'utiliser variable, pour l'énergie c'est habituellement le C_{SHG}. Total des coûts d'installation des projets sont trompeurs car ils comprennent également les coûts pour le bloc de puissance, un refroidisseur à absorption ou de la vapeur espace de rangement. De plus, les coûts par m^2 pour $SHIP_c$ ne peuvent pas être comparés directement avec les coûts des centrales puisque les derniers sont généralement d'une taille de 50 MW et plus [6].

CHAPITRE II

Intégrabilité des systèmes solaires a concentration linière de Fresnel dans l'industrie

II.1 Introduction :

Outre les défis généraux de l'énergie solaire, un obstacle majeur pour le SHIP « Solar heat for industrial processes » est l'intégration dans les processus industriels. Pour l'industrie, un approvisionnement fiable en énergie à des spécifications constantes (pression, température) est crucial. Même de courtes perturbations dans le processus de production peuvent causer de grandes pertes. Une chaudière d'appoint à combustible fossile est toujours disponible. L'intégration de SHIPc «Solarheat for industrial processes with concentrating collectors » dépend des exigences des processus spécifiques (par exemple, les fluides caloporteurs), des circonstances d'implantation (par exemple les zones d'installation), le système d'approvisionnement en énergie actuel (par exemple le système centralisé) et la charge de consommation. De plus, en raison de leurs fluctuations, au moins une certaine conservation est bénéfique pour l'application. Une intégration complexe peut faire grimper les coûts de manière substantielle tant dans la conception que dans l'investissement [6].

II.2 Intégration de la chaleur solaire dans les processus industriels :

Le solaire thermique a le potentiel de satisfaire la demande en matière de chaleur pour les procédés industriels. «Actuellement, 120 systèmes solaires thermiques opérationnels produisant la chaleur sont répertoriés dans le monde, avec une capacité totale d'environ 88 MW (125 000 m^2)» [16].

Des informations générales sur l'intégration des processus sont décrites, suivies d'une approche centrée sur l'intégration de la chaleur produite par la voie solaire et sa méthodologie de base. Les trois possibilités sont : vapeur générée au niveau du système, couplage direct à un processus spécifique et préchauffage d'eau alimentée par chaudière et conclure avec un ensemble d'exemples d'applications existantes de l'énergie solaire thermodynamique dans un processus de fabrication.

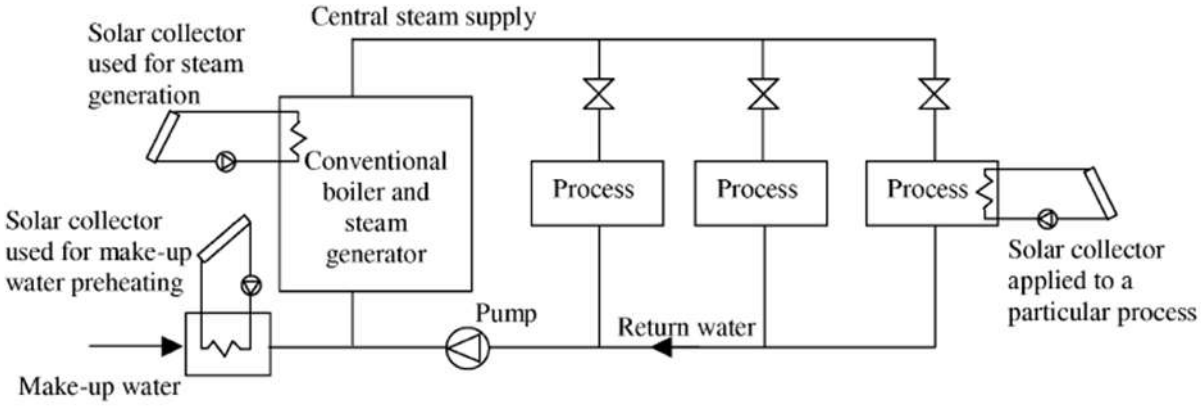


Figure II - 1 : Possibilités de combiner le système solaire avec l'apport de chaleur existant [19].

II.2.1 Intégration du processus :

Avant d'aborder le sujet de l'intégration solaire, une brève définition de l'intégration des processus est présentée: «Méthodes systématiques et générales de conception de systèmes de production intégrés », allant des processus individuels aux applications de grande échelle, avec une attention particulier sur l'efficacité énergétique et la réduction des effets environnementaux.

Concernant les applications industrielles dans lesquelles ces approches peuvent être utilisées, comme les projets de réhabilitation, amélioration de l'efficacité (liée à l'utilisation de l'énergie et des matériaux, flexibilité contrôlabilité, etc.). Puisque un système solaire thermodynamique est destiné à rééquiper la ligne de fabrication ECA « Expanded Cork Agglomerate » existante, les meilleurs projets de rénovation sont ceux qui combinent des caractéristiques d'économie d'énergie pure avec des modifications plus générales sur le processus industriel [16].

II.2.2 Intégration de chaleur solaire :

De nombreuses possibilités existent sur la combinaison d'un processus industriel avec une centrale solaire thermodynamique, chacune ayant des avantages et des inconvénients qui doivent être évalués. Les alternatives détermineront l'utilisation de différents équipements et composants qui ont un impact direct sur la configuration finale du processus, ainsi que sur les coûts d'investissement, qui doivent être réduits autant que possible (si la cible de performance est définie de cette manière). Pour le côté technique, l'introduction de l'alimentation en

énergie solaire ne devrait pas interférer avec le fonctionnement du processus existant, donc la conception finale devrait être un compromis entre ces considérations. Ces termes seront abordés fréquemment, d'où les définitions succinctes suivantes:

Point d'intégration: «spécifie une demande de chauffage dans un local industriel ou commerciale pouvant être partiellement alimentée par la chaleur.

Concept d'intégration de la chaleur solaire: désigne le point du processus (échangeur de chaleur et connexion hydraulique) auquel la chaleur issue de l'énergie solaire peut être transférée en tenant compte de la technologie d'alimentation en chaleur existante. Par exemple: alimentation en vapeur directe, alimentation en eau chaude via un échangeur de chaleur externe etc. [16].

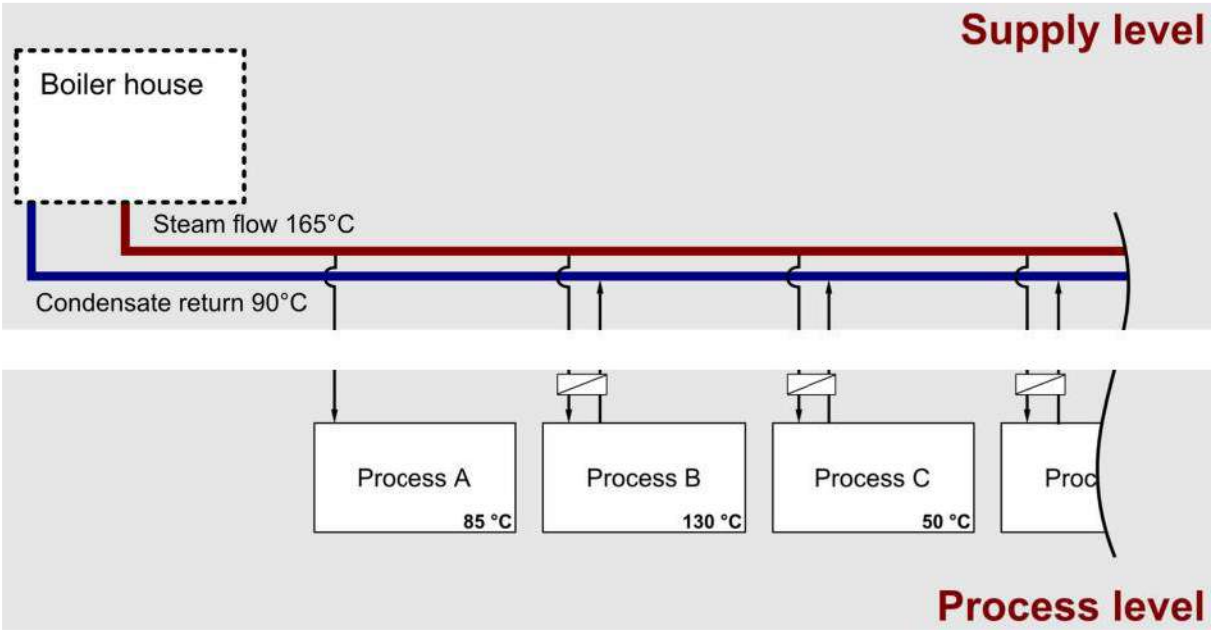


Figure II - 2: Représentation au niveau de l'approvisionnement et du processus d'un système utilisant la vapeur comme milieu (Lauterbach, n.d.) [16].

II.3 La génération directe de vapeur :

La DSG «Direct Steam Genration »consiste à utiliser le fluide de travail du cycle thermodynamique comme fluide caloporteur : la vapeur d'eau est générée directement à partir de la centrale solaire, ce qui supprime le circuit « huile » et les échangeurs « eau/huile » qui sont coûteux. La difficulté de cette technologie réside dans les conditions de haute pression et haute température nécessaires au turbinage du fluide [14].

La fraction de liquide qui se condense à l'intérieur de la turbine doit être maintenue faible valeur pour éviter l'érosion de la lame. Cela peut être réalisé en veillant à ce que la vapeur est suffisamment surchauffée avant l'expansion. Augmentation de la chaudière la pression pour augmenter l'efficacité peut signifier que les matériaux ne permettent pas la vapeur doit être surchauffée suffisamment loin pour éviter la condensation dans la turbine. Ainsi qu'à la présence d'un écoulement diphasique dans les tubes absorbeurs [21].

Les trois concepts de génération de vapeur sont :

- **Vapeur flash :** La vapeur flash ne diffère pas de la vapeur vive. Cette appellation désigne simplement la méthode de formation de cette vapeur. Les systèmes à vapeur produisent de la vapeur vive à l'aide d'une chaudière, d'un générateur de vapeur ou d'un générateur de récupération de chaleur. La vapeur flash est produite lorsque du condensat à température et pression élevées subit une forte chute de pression, comme à la sortie d'un purgeur. Le condensat à température élevée contient beaucoup d'énergie et lorsqu'il y a une chute de pression, le condensat ne peut pas rester entièrement sous sa forme liquide parce qu'il contient plus d'énergie que ne peut contenir l'eau saturée à cette pression. Une certaine quantité du condensat se vaporise donc en vapeur flash pour libérer une partie de l'énergie [15].

- **Vapeur direct :** Un flux biphasé circule dans le collecteur. Il a besoin de moins d'énergie pour le pompage et les pertes thermiques sont également réduites. Cependant, les bulles d'air peuvent causer des instabilités d'écoulement et des gradients locaux de température / pression élevés qui augmentent les contraintes matérielles. Aussi l'opération devient plus difficile, surtout le champ de capteurs solaires est plus grand champs de capteurs.

- **Vapeur indirect :** le fluide caloporteur circule dans le collecteur cependant la vapeur est générée en utilisant un échangeur de chaleur. Alors que ce concept est relativement facile à utiliser mais les coûts d'investissement sont élevés. De plus, les thermo-huiles ont d'autres effets inhérents. Ils sont souvent toxiques et facilement inflammables. En outre, ils ont des caractéristiques de transfert de chaleur moins bonnes que l'eau. Ainsi, des débits plus élevés et des différences de température sont nécessaires, ce qui diminue globalement l'efficacité [6].

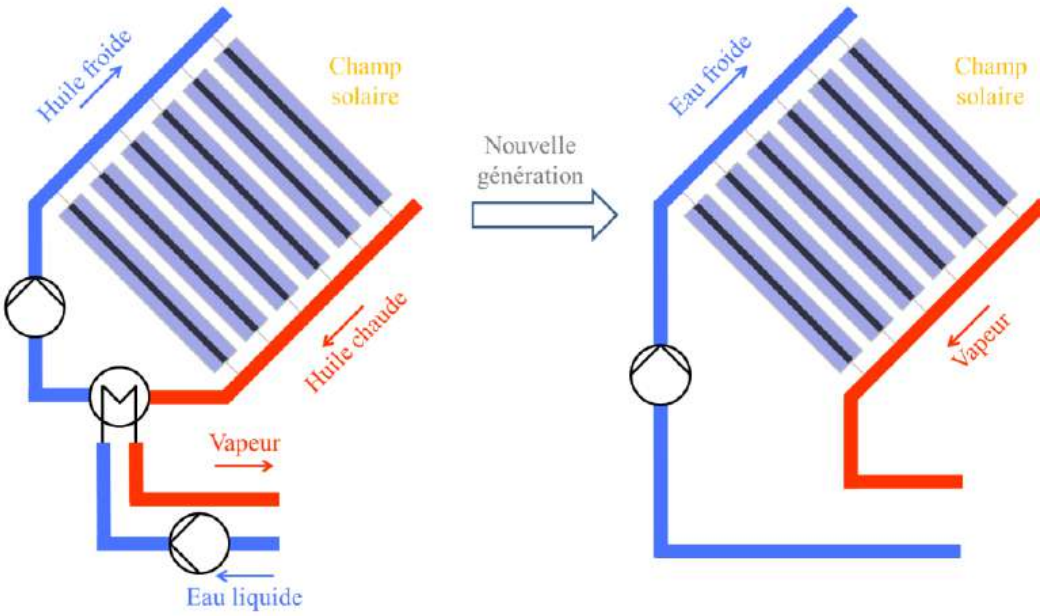


Figure II - 3 : A gauche, centrale avec un circuit primaire et un circuit secondaire. A droite, centrale à génération directe de vapeur [17].

La production directe de vapeur a un grand potentiel car elle augmente l'efficacité et réduit les coûts (pas d'échangeur de chaleur ou fluides caloporteurs), mais la technique est encore à ses débuts. [6].

II.4 Le Stockage :

Les technologies hélio thermodynamiques permettent le stockage d'énergie thermique (TES : Thermal energy Storage).C'est leur principal avantage, sur d'autres ressources renouvelables comme l'éolien ou le photovoltaïque. Le stockage thermique permet de découpler la production d'énergie utile, de la ressource solaire, à l'échelle de la journée. Un passage nuageux n'affectera pas la production, qui peut être maintenue en déstockant de l'énergie. La production peut aussi être mieux adaptée à la consommation. Le pic des besoins est surtout pendant la nuit. Le TES peut même être dimensionné pour permettre une production continue, 24h/24.Les technologies de stockage thermique sont encore au stade de recherche. Peu d'applications industrielles existent. La difficulté vient notamment du fait qu'il n'y a pas une technologie de stockage universelle. Pour chaque conception de centrale solaire, une technologie de stockage spécifique est entreprise [4].

Les éléments importants pour définir la technologie de TES sont :

- les conditions opératoires : température et pression.
- le fluide caloporteur dans le champ de capteurs solaire (huile, sels, eau/vapeur, gaz).

II.4.1 Les technologies de stockage :

II.4.1.1 Technologies actuelles :

II.4.1.1.1 Stockage dans des sels fondus :

Pour les grosses puissances, la seule solution de stockage commerciale est les sels fondus. Ils ne sont pas évidents à utiliser comme fluide caloporteur, mais peuvent directement servir de fluide de stockage. L'équipe italienne de l'ENEA travaille, dans le cadre du projet Archimède, à la mise au point d'un système à sels fondus, comme fluide caloporteur et de stockage. La centrale Andasol1 fonctionne avec de l'huile thermique comme fluide caloporteur. Elle dispose d'un stockage de 7,5 heures, grâce à des sels fondus [4].

II.4.1.1.2 . Stockage de vapeur saturée :

Les autres fluides sont plus difficiles à stocker en grande quantité. PS10 a cependant des réservoirs qui stockent directement la vapeur saturée. La capacité du stock n'est que d'une demi-heure. Cela est suffisant pour réduire significativement la dépendance à l'ensoleillement instantané. Mais cette technologie n'est pas adaptée à de grandes capacités de stockage. En effet, elle ne bénéficie pas d'effet d'échelle : la masse d'acier du réservoir sous pression, donc son coût, est proportionnel au volume de stockage. Stocker de grandes quantités de vapeur à haute pression mène donc rapidement à des coûts énormes [4].

II.4.1.2 Autres technologies de stockage :

II.4.1.2.1 Stockage par chaleur sensible :

Toujours dans la catégorie des stockages de chaleur sensible, on peut également stocker l'énergie thermique dans des matériaux solides.

Un système utilisant un lit de cailloux est développé par l'entreprise Air Light et le laboratoire suisse ETH. L'objectif est de chauffer les cailloux directement avec l'air, utilisé comme fluide caloporteur. Il est possible de stocker la chaleur à haute température (plus de 650°C) avec un rendement stockage/déstockage de 98% [4]

II.4.1.2.2 Stockage par chaleur latente :

Les matériaux à changement de phase (PCM) suscitent aussi un intérêt particulier. Ils permettent un stockage significativement plus compact, que les systèmes à chaleur sensible. Un autre avantage est qu'ils permettent d'extraire de l'énergie à la même température, quel que soit le niveau de charge du stockage. Cependant la température des matériaux étudiés reste assez basse : de 200°C à 300°C. Il s'agit en particulier de mélanges à base de nitrates [4].

II.4.1.2.3 Stockage mixte sensible/latent :

Un système mixte est en cours de développement, pour les centrales à génération directe de vapeur. Le béton est utilisé comme matériau de stockage pour les niveaux de température en chaleur sensible. Des PCM sont utilisés pour stocker l'énergie thermique dans la partie où le changement de phase a lieu [4].

II.4.1.2.4 Accumulateur de vapeur :

Dans cette configuration, un réservoir pressurise qui contient initialement du liquide sature est utilisé pour stocker la vapeur (figure II-4).Le chargement du réservoir s'effectue par l'injection d'eau soit sous forme de vapeur saturée, soit sous forme d'eau liquide saturée. Si de la vapeur saturée est utilisée pour le chargement, la pression augmente dans le réservoir et si de l'eau saturée est utilisée, la température et la pression restent constantes tout au long du processus de charge. La vapeur d'eau est ensuite générée dans la phase de décharge en baissant la pression à l'intérieur du réservoir [25].

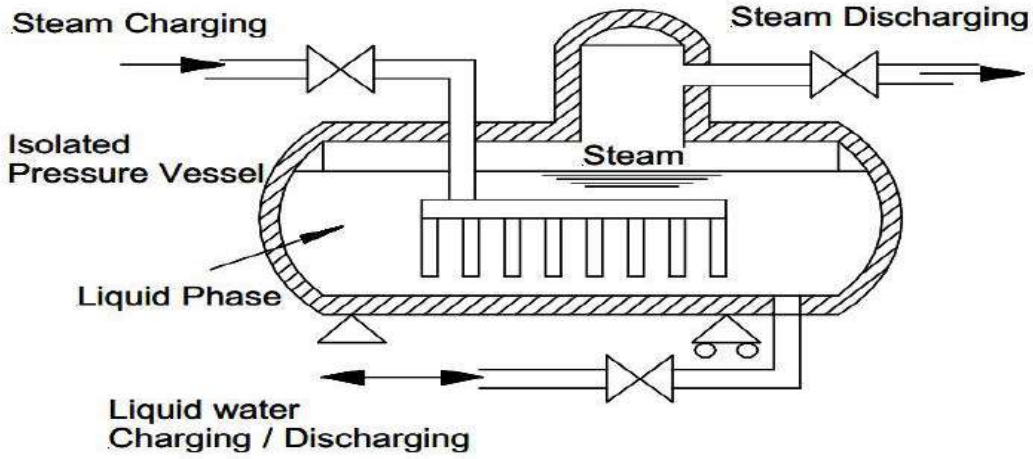


Figure II - 4: Schéma descriptif d'un réservoir accumulateur de vapeur [25].

II.4.1.2.4.1 Les avantages et inconvénients d'un accumulateur de vapeur :

Avantages	**Inconvénients**
la vapeur est directement disponible pour entrainer une turbine	faible densité de stockage,
un temps de réaction très court	pression de travail très élevée,
un grand débit de décharge.	Coût très élevé.

Tableau II-1 : les avantages et inconvénients.

II.5 D'autres effets pour augmenter l'efficacité énergétique :

II.5.1 Orientation du champ solaire :

L'installation de ces concentrateurs ne se fera pas d'une façon aléatoire. Pour mieux exploiter le rayonnement solaire le choix de l'orientation, Le champ nord-sud collecte beaucoup plus d'énergie en été qu'en hiver, à l'opposé de l'orientation est-ouest qui collecte plus d'énergie en hiver que le nord-sud et moins en été, L'orientation nord-sud horizontale collecte, légèrement plus d'énergie que l'orientation est-ouest horizontale, Aussi le choix de l'orientation dépendra de l'application et des besoins selon la période [18].

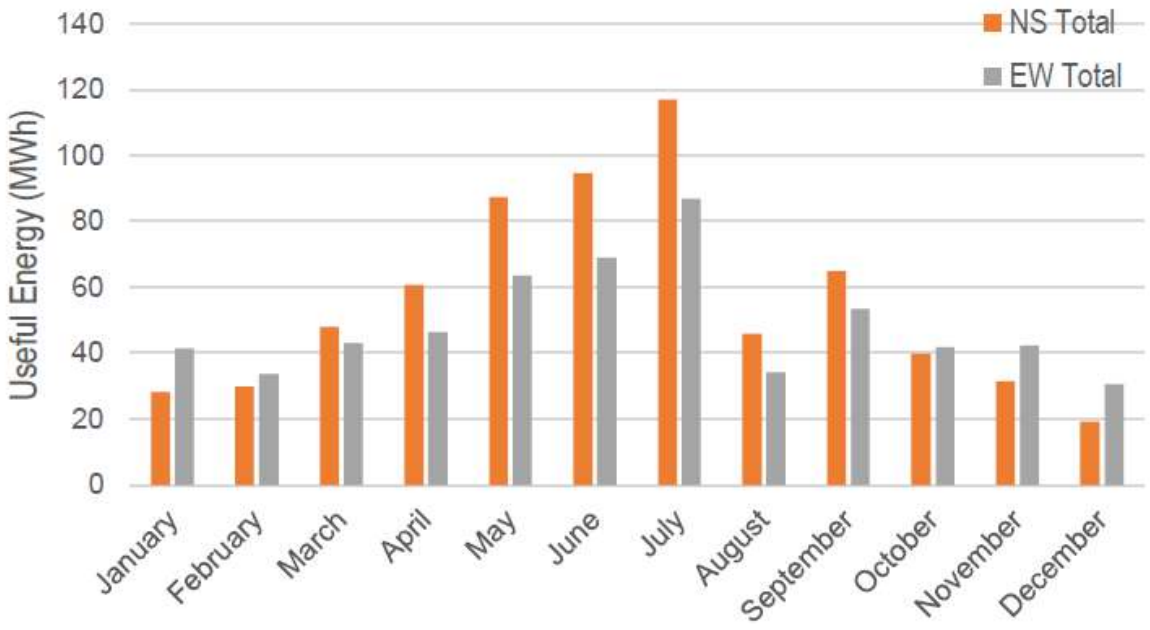


Figure II - 5 : Résultats mensuels pour les champs NS et EW pour une configuration de modèle aléatoire [16].

II.5.2 Effets d'un champ solaire sur l'efficacité de la chaudière :

Même si, avec un stockage important suffisant, une production solaire seulement est techniquement possible n'est pas faisable. L'option réaliste pour l'intégration de SHIPc est de fonctionner comme un économiseur de carburant, où la chaudière conventionnelle produit de la vapeur pendant la nuit et lorsque l'irradiation es insuffisant. L'efficacité de la chaudière dépend entre autres de la température des gaz de combustion les pertes, les pertes de rayonnement et de convection, le rapport air-carburant et les conditions de fonctionnement (ΔT).De plus, lors de la comparaison des chaudières, il est également important de prendre en compte leur principe de fonctionnement. Si une chaudière fonctionne à plus faible capacité, les pertes thermiques absolues restent constantes et augmentent par rapport à la vapeur produite. En outre, si la chaudière doit être allumée et éteinte plus souvent cela réduit l'efficacité globale. Ainsi, l'intégration de SHIPc peut réduire l'efficacité de la chaudière. À dans le même temps, dans les grandes industries avec plusieurs chaudières efficacité pourrait être soulevée si une chaudière peut être complètement éteint Il n'est pas possible de définir les impacts de l'intégration d'un champ solaire sur une chaudière en général, cependant, ils peuvent être sévères et doivent être pris en compte [6].

II.5.3 .Concepts de chaudière :

Il existe principalement deux types de chaudières dans l'industrie. Chaudière à tubes de fumée et générateurs de vapeur à grande vitesse.

II.5.3.1. Chaudière à tubes de fumée :

Une chaudière à vapeur est un récipient scellé non ventilé conçu dans le but de générer vapeur à une pression supérieure à la pression atmosphérique pression. "Confiner" la vapeur augmente la pression et par conséquent l'ébullition Température. Cela augmente également l'énergie le contenu de la vapeur générée, Dans le premier type, l'eau est contenue dans des tubes qui sont entourés de gaz chaud. Cette conception prend généralement la forme d'une vapeur à grande vitesse générateur jusqu'à une pression d'env. 30 bar ou comme une chaudière à tubes d'eau jusqu'à env. 200 bar [20].

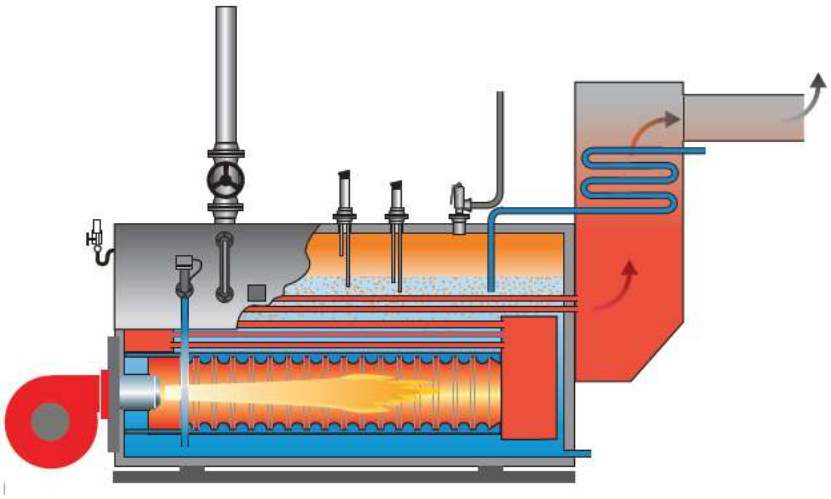


Figure II -6 : Coupe transversale à travers une chaudière à vapeur [20].

II.5.3.2. Générateurs de vapeur à grande vitesse :

Dans les générateurs de vapeur à grande vitesse, l'eau est circulée dans une bobine qui est placée dans la flamme.

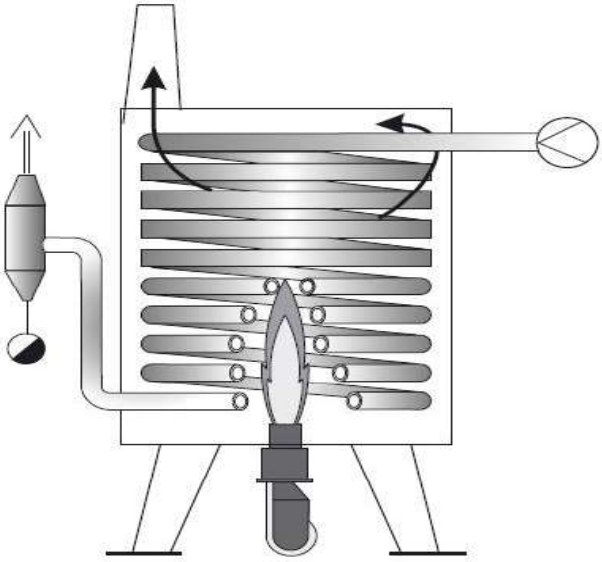


Figure II - 7 : Générateur de vapeur à grande vitesse (SpiraxSarco, 2011) [6].

II.5.4 . Technologies de poly génération:

Les technologies de poly génération peuvent être classées selon différentes perspectives. En termes de production de formes d'énergie, les formes d'énergie de base sont l'énergie électrique et la chaleur, L'efficacité de la technologie de poly génération résulte de l'utilisation de la chaleur excédentaire qui serait autrement gaspillé dans le processus. Dans une usine de poly génération, la production de différents produits énergétiques suit une caractéristique commune définit la dépendance entre les coûts d'exploitation et la production de différents produits énergétiques [26].

Niveau de température	Processus
250° C - 400° C	• production d'électricité dans une turbine à vapeur conventionnelle • production d'électricité dans le cycle organique de Rankine • chaleur industrielle
100° C - 250° C	• chaleur industrielle • dessalement d'eau de mer avec distillation multi-effet • refroidisseur d'absorption à plusieurs étages • régénération de la vapeur après la turbine
40° C - 100° C	• chaleur industrielle • refroidisseur à absorption à un étage • chauffage urbain

Tableau II - 1: Sorties en poly-génération à différents niveaux de température [6].

II.6 Outils pour l'analyse financière :

Pour évaluer et comparer la situation dans les entreprises, les rendements énergétiques doivent être transférés sen unités monétaires. Dans cette partie, des approches majeures pour l'évaluation des investissements sont discutées, plus tard, d'autres outils financiers sont introduits.

II.6.1 Évaluation de l'investissement :

II.6.1.1 Pour la valeur actuelle nette (VAN) :

Les systèmes CSP ont des coûts d'investissement élevés et aucun coût de carburant. Investissements initiaux doivent être amortis sur la durée de vie des systèmes. Ainsi, la question clé est la valeur actuelle nette (VAN) sur la durée de vie. La formule de base pour évaluer NPV « net présent value» est :

$$VPN = \sum_{i=1}^{N} \frac{C_i}{(1+DR)^i} \qquad \text{(II-1)}$$

Où les flux de trésorerie Ci sont ceux qui se produisent dans l'intervalle de temps (année) i, DR est le taux d'actualisation et N est le nombre total de périodes de composition [21].

Les flux de trésorerie peuvent être mesurés en unités monétaires nominales ou réelles. Une le flux de trésorerie réel est ajusté pour l'inflation et exprimé en une valeur de une année précise quelle que soit l'année où elle a lieu et a donc une constante valeur efficace. Le taux d'actualisation peut être nominal ou réel. Les VAN peuvent être calculé en utilisant des mesures de flux de trésorerie en monnaie réelle ainsi que taux d'actualisation, ou des mesures de flux de trésorerie en monnaie nominale avec pourcentages de remise; la même VAN sera obtenue dans les deux cas [21].

II.6.1.2. Taux de rendement interne :

Le taux de rentabilité interne (IRR : Internal rate of return) pour un investissement qui a une série de flux de trésorerie futurs (F_0, F_1, ... F_n,) est le taux qui fixe la VAN des flux de trésorerie à zéro. L'analyse IRR permet la comparaison d'une grande variété d'activités d'investissement. Cependant, IRR n'est pas recommandé lorsque évaluer investissements dans lesquels un investissement supplémentaire après le retour est nécessaire parce que les investissements en aval sont incorrectement actualisé et plusieurs valeurs IRR positives peuvent être. IRR est couramment utilisé pour accepter les décisions, permettant une comparaison rapide avec un taux de rendement minimum acceptable (obstacle taux).IRR n'est pas recommandé lors du choix entre des alternatives mutuellement exclusives car les valeurs de différentes tailles d'investissement ne sont pas prises en compte (un investisseur choisira d'investir davantage dans une alternative avec des rendements plus favorables). Cette défaut peut être corrigée en appliquant le IRR sur une base incrémentielle base. IRR n'est pas recommandé non plus lors du classement des projets car IRR suppose implicitement le réinvestissement des retours à l'IRR [22].

IRR est égal au taux pour lequel:

$$0 = NPV = \sum_{n=0}^{N} [F_n /(1+d)^n] \qquad (II-2)$$

Où:

VAN = valeur actuelle nette de l'investissement en capital

F_n = flux de trésorerie reçus à l'instant n

d= taux qui équivaut à la valeur actuelle des flux de trésorerie positifs et négatifs lorsqu'il est utilisé ratraté.

II.6.1.3. Le taux de rendement interne modifié :

Pour des projets d'échelle et de vie différentes, il est possible d'utiliser différents critères de classement, tels que NPV et IRR, produire des résultats contradictoires en raison de différentes hypothèses de réinvestissement. La méthode NPV supposeré investissement au taux d'actualisation, alors que la méthode IRR suppose un réinvestissement au taux IRR. Lecompte de taux de rendement interne modifié (MIRR : Modified internal rate of return) pour des taux de réinvestissement variables et devrait être utilisé ces circonstances. Le MIRR est calculé en supposant que toutes les entrées de trésorerie reçues avant la fin de période d'analyse sont réinvestis au taux d'actualisation jusqu'à la fin de la période d'analyse. Le terminal (futur Valeur) Montant à la fin de l'analyse est ensuite actualisé à l'année de base. Le taux d'actualisation fera correspondre la valeur actuelle (dans l'année de base) du montant final à la valeur actuelle de les coûts d'investissement est le MIRR [22].

La formule pour calculer un MIRR est la suivante:

MIRR = solution pour r dans l'équation suivante:

$$MIRR = r, ou \ \sum_{n=0}^{N} \frac{Fn_n}{(1+d)^n} = \sum_{n=0}^{N} \frac{Fp_n(1+d)^{N-n}}{(1+r)^N} \qquad \text{(II-3)}$$

Ou :

MIRR = r, taux de rendement interne modifié.

Fn_n= flux de trésorerie négatifs nets à l'instant n.

Fp_n= flux de trésorerie positifs nets chez moi n.

d= taux de rendement du réinvestissement.

N = durée d'investissement.

r =le facteur d'actualisation.

II.6.2 Autres outils financiers :

Outre les méthodes mentionnées ci-dessus, d'autres outils financiers peuvent fournir des informations supplémentaires.

II.6.2.1 La période de récupération (PP) :

La période de récupération actualisée (PP : pay back period) est le nombre d'années nécessaires pour recouvrer le coût du projet l'investissement tout en tenant compte de la valeur temporelle de l'argent.

PP est recommandé lorsque le risque est un problème (c'est-à-dire que des incertitudes significatives sont présentes) car PP permet pour une évaluation rapide de la durée pendant laquelle le capital d'un investisseur est à risque. Le PP peut être trouvé avec Équation suivent [22] [6]:

$$PP = min\left\{\frac{t}{NPV(t)} = -C_{INV} + \sum_{t=1}^{LT} \frac{CF_t}{(1+r)^t}\right\} \quad \text{(II-4)}$$

Ou :

CF = le flux de trésorerie.

C_{INV} = coût d'investissement.

II.6.2.2. Les coûts de production de chaleur solaire :

Le coût nivelé de la chaleur (LCOH : Levelized Cost of Heat) est le coût de production de chaleur pour un système particulier à une particulière température du fluide de travail. C'est une évaluation économique du coût du système de production de chaleur tout le coût au cours de sa vie: investissement initial, exploitation et entretien, coût du carburant, coût du capital. Un filet le calcul de la valeur actuelle est effectué et résolu de manière appropriée, telle que la valeur actuelle nette du projet soit nulle pour la valeur de la LCOH choisie [23].Par conséquent, LCOH est défini par la formule suivante :

$$LCOH = \frac{OCC*CRF+O\&M}{8.76*CF} + FC.hr \quad \text{(II-5)}$$

Le CRF est défini par:

$$CRF = \frac{i*(1+i)^n}{(1+i)^n-1} \quad \text{(II-6)}$$

Le LCOH est le prix minimum auquel la chaleur doit être vendue pour un système de production de chaleur, à un niveau maximum défini, température du fluide de travail, pour atteindre le seuil de rentabilité. Typiquement, le LCOH est calculé sur une durée de vie de 20 ans, et il est donné en unités de monnaie par kilowattheure, par exemple $ / kWh ou € / kWh ou par mégawatheure [23].

II.6.2.3. Les coûts de réduction des gaz CO_2 :

Sont un important outil pour comparer différents investissements. Ils expriment les coûts supplémentaires qui sont nécessaire pour réduire l'émission de CO2.Ainsi, ils sont plutôt utilisés par les décideurs pour comparer l'efficacité des investissements environnementaux, Afin de tenter d'être cohérent avec la littérature existante, nous assumons le coût d'un nouvelle centrale électrique au charbon et ses émissions comme base de référence pour les coûts et les émissions du fossile centrale électrique [6] [24].

Le coût d'atténuation d'une tonne de CO2 comme:

$$Coût\ de\ l'atténuation = \frac{\$/MWh_{(ren)} - \$/MWh_{(fos)}}{ton\ CO_2/MWh_{(fos)} - ton\ CO_2/MWh_{(ren)}} \quad \text{(II-7)}$$

II.7 Conclusion :

Les projets d'intégration industrielle de la chaleur solaire impliquent l'évaluation économique dans sa méthodologie. De plus, les études de faisabilité technico-économiques conjointes sont presque obligatoires pour tout projet de réhabilitation [16]. Les centrales CSP à linéaires de Fresnel sont aujourd'hui les plus nombreuses sur le marché commercial actuel (ou en construction) du CSP à génération directe de vapeur, bien qu'elles ne soient pas majoritaires en termes de puissance installée [14].En résumé, ce qui suit a été trouvé. Premièrement, il existe une variété d'outils d'évaluation diffèrent dans leurs hypothèses et leurs approches. Ainsi, l'évaluation du SHIP dépend aussi de choix de l'outil d'évaluation. Deuxièmement, les entreprises fondent souvent leurs décisions d'investissement sur PP une méthode qui ne convient pas à l'évaluation et qui biaiser les investissements ER [6].

CHAPITRE III

La situation énergétique en Algérie

III.1 . Introduction:

Depuis la nationalisation des hydrocarbures, l'Algérie a enregistré un essor remarquable, marqué par le lancement d'importants programmes de développement qui ont permis d'améliorer le niveau de vie et de bien-être du citoyen.

Les hydrocarbures occupent une place importante dans l'économie nationale. Ils contribuent à hauteur d'un tiers du produit intérieur brut (PIB) [37], à près de la moitié des recettes budgétaires de l'Etat et représentent l'essentiel des revenus d'exportation du pays.

L'Algérie dispose d'un potentiel de ressources énergétiques appréciable. Au-delà des ressources pétrolières et gazières, l'exploitation des énergies renouvelables et notamment le solaire va diversifier la base énergétique et conforter le développement durable du pays.

L'industrie nationale des hydrocarbures poursuit son développement, pour accroître le niveau des réserves. Le secteur a ainsi réalisé un nombre important de découvertes, notamment par la compagnie nationale Sonatrach en effort propre. L'effort de développement et de rationalisation de l'exploitation des ressources est complété par l'expansion des infrastructures de transport par et des unités industrielles de transformation et de valorisation des hydrocarbures [37].

III.2 Production nationale d'énergie :

III.2.1 Pétrole :

L'Algérie est un pays membre de l'Organisation des pays exportateurs de pétrole et du Forum des pays exportateurs de gaz.

Les réserves prouvées de pétrole de l'Algérie étaient estimées par la compagnie pétrolière britannique BP à 1,5 milliards de tonnes fin 2015 (12,2 milliards de barils), soit 21 années de production au rythme de 2015. Ces réserves classaient l'Algérie au 17^{e} rang mondial avec 0,7 % du total mondial, et au 4^{e} rang en Afrique derrière la Libye, le Nigeria et l'Angola [33].

III.2.1.1 Production de pétrole :

En 2015, l'Algérie a produit 68,5 Mt (millions de tonnes) de pétrole, soit 1,59 Mb/j (millions de barils par jour), en baisse de 0,4 % en 2015 et de 20,3 % depuis 2005. Elle se classe au 18e rang mondial avec 1,6 % de la production mondiale et au 3e rang en Afrique derrière le Nigeria (2,6 %) et l'Angola (2,0 %)

année	2005	2010	2014	2015
Production	1 990	1 689	1 589	1 586

Tableau III - 1: Production pétrolière (milliers de barils par jour) [33].

III.2.2 Gaz naturel :

L'Agence internationale de l'énergie classait l'Algérie au 10e rang mondial des producteurs de gaz naturel en 2015 avec 2,3 % de la production mondiale et au 6e rang mondial des exportateurs de gaz naturel avec 5,3 % du total mondial

Les réserves prouvées de gaz naturel de l'Algérie étaient estimées par compagnie pétrolière britannique (BP) à 4 500 milliards de m^3 fin 2015 (159,1 trillions US de pieds cubes), soit 54 années de production au rythme de 2015. Ces réserves classaient l'Algérie au 10e rang mondial avec 2,4 % du total mondial, et au 2e rang en Afrique derrière le Nigeria [33].

III.2.2.1 Production de gaz naturel :

En 2015, l'Algérie a produit 83,0 milliards de m^3 de gaz naturel, soit 74,7 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole), en baisse de 0,4 % (-6 % depuis 2005). Elle se classe au 9erang mondial avec 2,3 % de la production mondiale et au 1er rang en Afrique [33].

III.2.3 Électricité :

Les impératifs de préservation de l'environnement imposent l'utilisation du gaz naturel comme énergie primaire pour la production d'électricité, par rapport aux autres énergies fossiles jugées polluantes, sachant que la ressource du gaz est largement disponible en Algérie.

Mais la préoccupation environnementale exige aussi de développer d'autres énergies dites propres et renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne, dont les gisements sont disponibles et abondants au sud du pays [38].

III.2.3.1 Puissance installée de production d'électricité :

La puissance installée totale de parc de production de sociétés du Groupe Sonalgaz, est passée de 17087.6 MW en 2015 à 18845.1 MW en 2016 soit une augmentation de 10.3%.

A noter que la puissance installée du parc de production du SPE, à elle seul s'est élevée à 12784.1MW. En 2016 la production d'électricité nationale a augmenté de 2.4% par rapport à celle de 2015, représentant ainsi 95.5% de prévisions.

A noter que la production de SKTM réalisée en 2016 est constituée de 78.6% d'énergies conventionnelles et de 21.4% d'énergie renouvelables, cette dernière représente à son tour 0.34% de la production nationale [39].

La répartition de la puissance installée par filière et par producteur pour l'année 2015 est illustrée dans les graphiques ci-après :

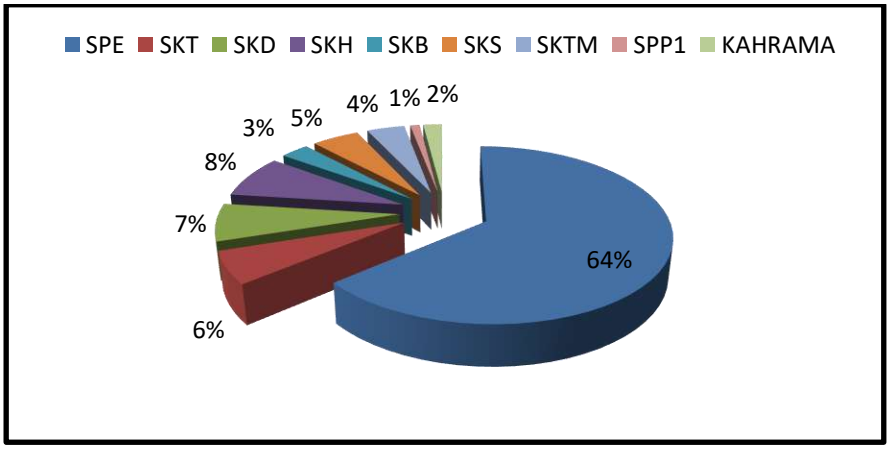


Figure III - 1: Puissance installée par producteur [38].

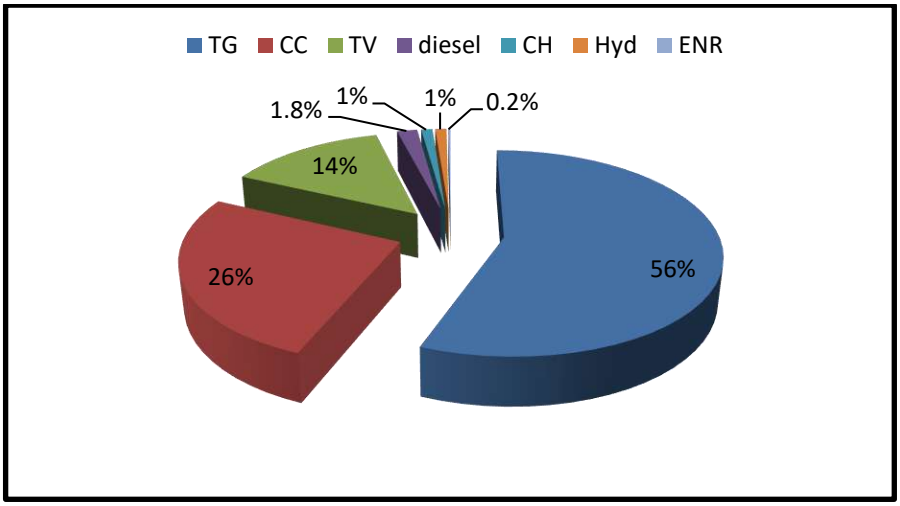


Figure III - 2: Puissance installée par type d'équipement [38].

III.3 Bilan énergétique nationale :

III.3.1 Production d'énergie primaire :

La production commerciale d'énergie primaire a renoué avec la croissance en 2016, mettant fin à la tendance en baisse observée sur plusieurs années. Elle a fortement augmenté (+7,3%) par rapport aux réalisations de 2015, pour atteindre 166,2 M Tep [27].

Cette croissance a été principalement réalisée par l'utilisation du gaz naturel, suivi par le pétrole brut, qui a compensé la baisse du condensat et GPL, comme indiqué dans le tableau ci-dessous:

Produit	Unités	2015	2016	Evolution	
				Quantité	(%)
Gaz naturel	K Tep	79 931	89 731	+9800	+12.3
	10^6 m^3	84 583	94 953		
Pétrole brut	K Tep	54 250	56 193	+1943	+3.6
	K Tonnes	49 184	50 945		
Condensat	K Tep	10 885	10 449	-436	-4.0
	K Tonnes	9 615	9 230		
GPL aux champs	K Tep	9 753	9 726	-27	-0.3
	K Tonnes	8265	8242		
Electricité primaire	K Tep	53	80	+27	+51.1
	GWh	223	336		
Combustibles solides : Bois	K Tep	6	6	-0.19	-3.1
	10^3 m^3	32	31		
Total	K Tep	154878	166184	+11306	+7.3

Tableau III - 2: Production d'énergie primaire [27].

Il est à noter la hausse importante (+51%) de la production d'électricité primaire (incluant la filière hydraulique), passée de 223 GWh à 336 GWh en 2016, suite à l'entrée en production de plusieurs centrales photovoltaïques réalisées dans le cadre du programme national des énergies renouvelables (EnR).

Ainsi, l'année 2016 a vu la mise en service de 13 centrales photovoltaïques d'une capacité totale de près de 180 MW ; ce qui a permis de porter la part de la production d'origine solaire et éolienne dans la production d'électricité primaire à près de 80% par rapporte outres énergie renouvelable [27].

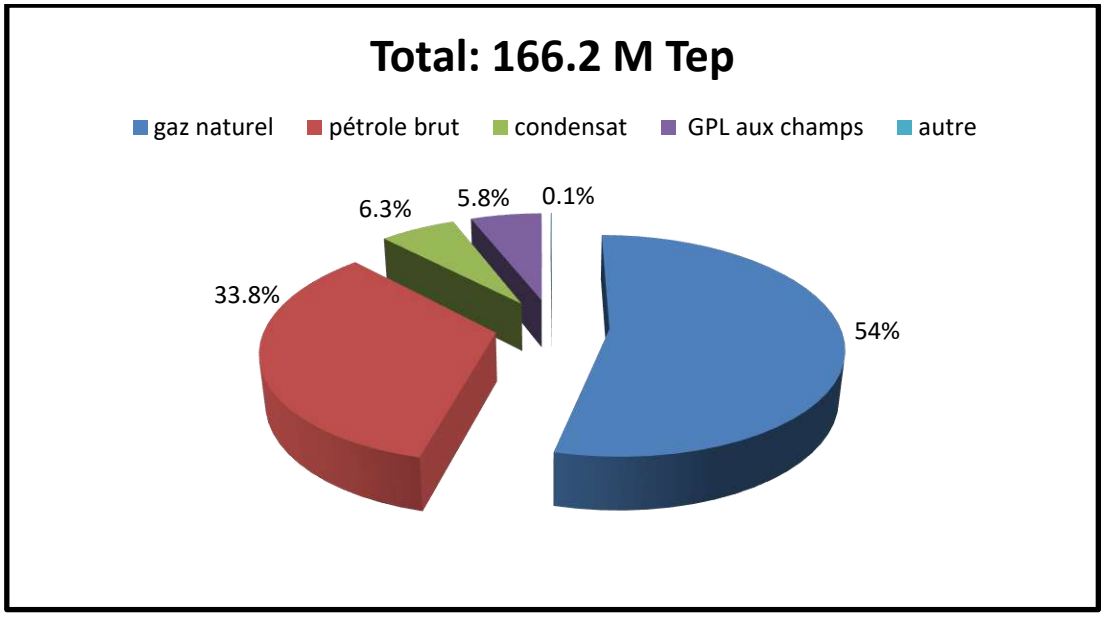


Figure III - 3: Structure de la production d'énergie primaire [27].

III.3.2 Production d'énergie dérivée :

La production d'énergie dérivée a légèrement diminué (-1,0%) à 63,1 M Tep, suite à la baisse de la production du gaz naturel liquéfié (-4,8%) et des produits pétroliers (-1,1%). Cette baisse a été en partie compensée par la hausse de production d'électricité (+3,0%) [27].

Produit	**Unités**	2015	2016	**Evolution**	
				Quantité	(%)
Produits pétroliers	K Tep	30 298	29 953	-345	-1.1
	K Tonnes	28 789	28 497		
Electricité thermique*	K Tep	16 362	16 860	+498	+3.0
	GWh	68 575	70 661		
GNL	K Tep	15 724	14 963	-762	-4.8
	10^6m^3	16 639	15 833		
GPL (Raffineries et Unités GNL)	K Tep	1 282	1 316	+34	+2.7
	K Tonnes	1 087	1 115		
Autres**	K Tep	58	-	-58	-100
	10^6m^3	61	-		
Total	K Tep	63 724	63 091	-633	-1.0

Tableau III - 3: Production d'énergie dérivée [27].

La structure de la production d'énergie dérivée reste dominée par les produits pétroliers avec près de 48,0%, comme illustré ci-dessous :

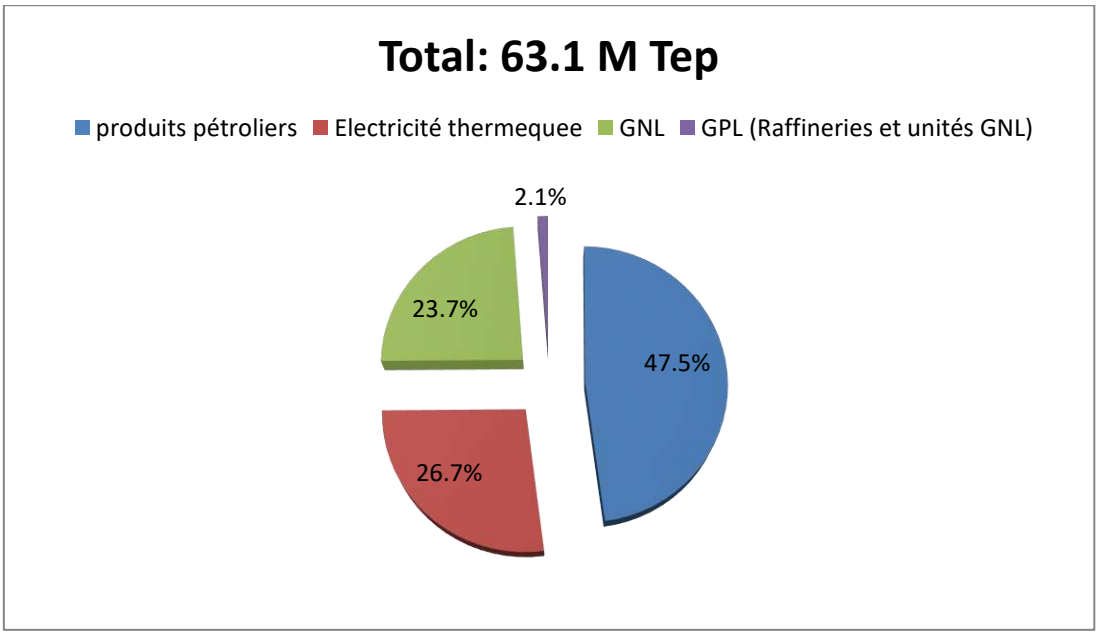


Figure III - 4: Structure de la production d'énergie dérivée [27].

III.4 La demande et la croissance de la demande énergétique par secteur :

Les relations entre la consommation d'énergie et la croissance économique ont été très peu étudiées dans les pays sous-développés et en développement, alors même que l'unanimité est faite sur la nécessité de les connaître afin de mener des politiques énergétiques efficaces. Cette nécessité s'est amplifiée récemment avec les crises énergétiques répétées que connaissent plusieurs régions et la hausse continue du cours de l'énergie en général et celui du pétrole en particulier.

Selon une étude américaine, le principal frein à la croissance économique réside dans la quantité d'énergie disponible. Une étude sur les liens entre croissance économique et quantité globale d'énergie disponible, publiée dans la revue «*BioScience*», établit une forte corrélation entre ces deux données à la fois sur un plan mondial mais également et à plus petite échelle, au sein d'un pays [28].

Si on prend à titre d'exemple la région du Maghreb, on peut constater une relation étroite entre consommation d'énergie et croissance économique. En effet, sous l'effet conjugué de la pression démographique et de la croissance économique, la demande ne cesse de s'accroitre.

Face à ce constat, le système énergétique de la région fait face à de fortes tensions qu'il s'agisse d'approvisionnement, de transport, de distribution, et le plus important de la hausse de la consommation [28].

III.4.1 La consommation d'énergie par secteur:

Les secteurs d'activités concernées sont respectivement :

- Le secteur Résidentiel.
- Le secteur Industrie.
- Le secteur Transport.
- Le secteur Tertiaire.
- Le secteur Agriculture.

III.4.1.1 Le Secteur Résidentiel:

Dans le secteur résidentiel ou ménages, les facteurs déterminants sont de nature démographique comme la population, nombre de ménages et le taux de possession. On distingue deux types d'usage dans ce secteur : Spécifique et thermique.

III.4.1.2 Le Secteur Industrie:

De manière générale, la demande d'énergie de chaque sous-secteur économique est déterminée par son niveau d'activité économique, évaluée par sa valeur ajoutée, et par l'intensité énergétique de chaque catégorie d'usage final de l'énergie. Le niveau d'activité économique de chaque sous-secteur est obtenu à partir des données spécifiées par l'utilisateur relatives au produit intérieur brut(PIB) total et à sa structure.

III.4.1.3 Le Secteur Transport:

La demande d'énergie de ce secteur est calculée directement en termes d'énergie finale, en fonction de la demande totale de transport.

Le taux de motorisation et la distance moyenne parcourue par une voiture par an sont des variables du scénario pour le calcul de la consommation énergétique.

De plus, 6 carburants différents sont admis pour le secteur Transport: Electricité, gaz - oïl, essence, GPL, bunker et le kérosène.

III.4.1.4 Le secteur Tertiaire:

Les paramètres du scénario et les équations qui caractérisent la consommation d'énergie du secteur tertiaire sont liés au niveau d'activité économique de ce secteur, la valeur ajoutée des sous-secteurs et la main d'œuvre du secteur.

Les catégories d'utilisation finale considérée dans le secteur service sont l'usage thermique (le chauffage, eau chaude sanitaire et cuisson), l'usage spécifique de l'électricité (climatisation, éclairage).

III.4.1.5 Le secteur Agriculture & Pèche:

- Agriculture : la demande d'énergie finale se calcule pour le matériel destiné pour l'irrigation des terres comme les tracteurs agricole, motopompe et électropompe.

- Pèche : Pour ce sous-secteur, on a les bateaux motorisé diesel.

A l'horizon 2030, les parts respectives du résidentiel, de l'industrie, du transport, du tertiaire et du secteur agriculture dans la demande d'énergie seraient de comme menterie dans le tableau suivant :

Secteur	2008	2015	2020	2025	2030
Le Secteur Résidentiel	1.66	1.42	1.48	1.57	1.67
Le Secteur Industrie	13.21	11.40	11.54	11.91	12.33
Secteur Transport	20.48	26.22	24.62	23.53	22.56
Le secteur Tertiaire	23.40	29.32	32.06	33.59	34.90
Le secteur Agriculture & Pèche	41.24	31.63	30.30	29.41	28.54
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tableau III - 4 : Evolution de la consommation finale par secteur en pourcentage à l'horizon 2030 [29].

Ces évolutions sectorielle globales et de long terme, cachent des évolutions constatées tant pour les déférents usages énergétiques au sein d'un même secteur ou pour déférents branches industriel que pour les déférents sous-périodes de projection ont était analysé auparavant.

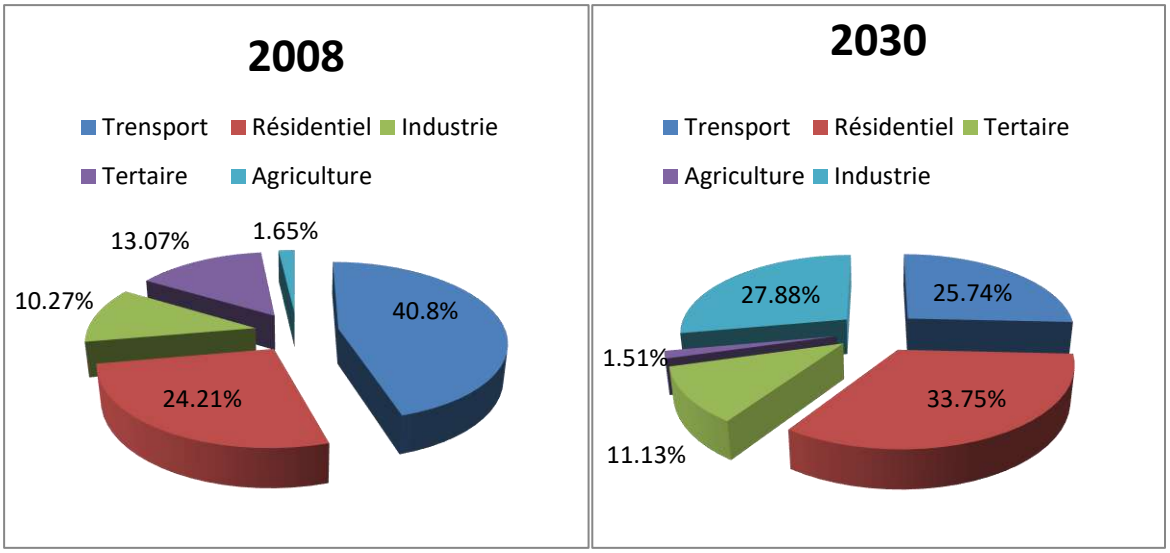


Figure III - 5 : Evolution de la consommation finale par secteur l'horizon 2030 [29].

III.5. Potentiel des énergies renouvelables en Algérie :

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011 et révisée en mai 2015 et placé au rang de priorité nationale en février 2016 lors du Conseil du Restreint Gouvernement.

L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables dans sa version actualisée, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent [30].

III.5.1 Potentiel Solaire:

Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m au Grand Sud (TAMENRASSET) [30].

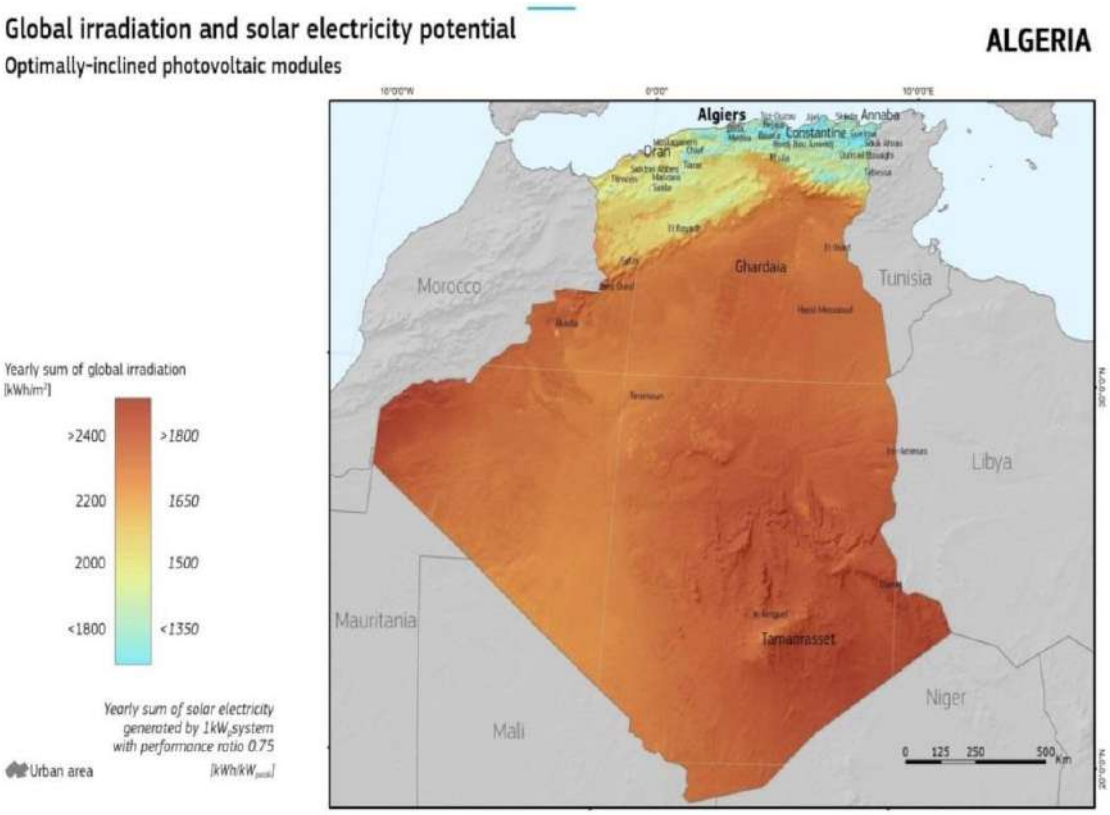


Figure III - 6: irradiation globale et potentiel électricité solaire [31].

III.5.2 Potentiel Eolien :

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaines de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien [30].

Le tableau suivant représente la vitesse moyenne du vent dans les principales régions algériennes :

Vitesse moyenne du vent (m/s)	**Nord**	**Hauts-Plateaux**	**Sahara**
	5à6	6à7	>8

Tableau III - 5: vitesse moyenne du vent en Algérie [31].

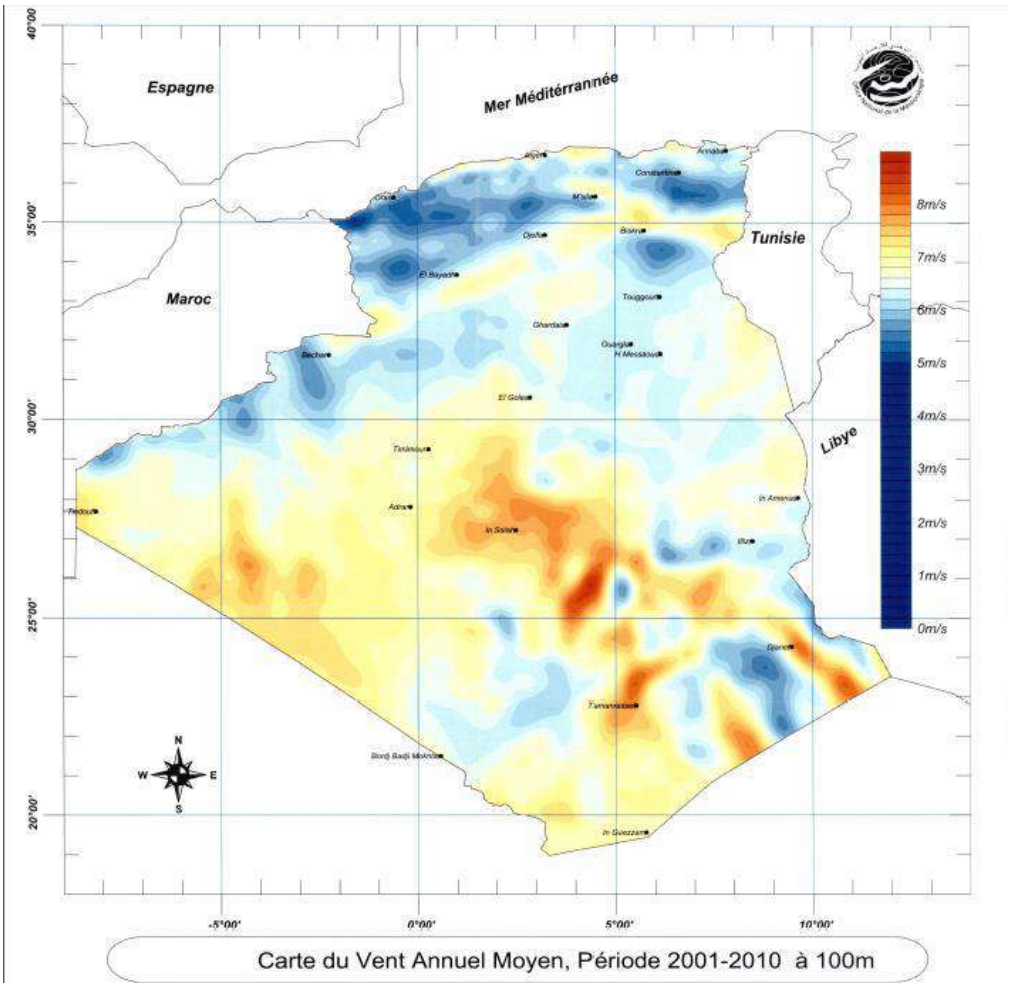


Figure III - 7: Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010) [31].

III.5.3 Potentiel de l'énergie nucléaire :

Pour que l'Algérie diversifie ses sources d'énergie afin de faire face à l'après-pétrole, l'énergie nucléaire est la seule source énergétique qui pourrait remplacer le pétrole et le gaz, sa matière première est abondante dans le pays, il suffit de la valoriser.

Depuis de longues années, l'Algérie a beaucoup investi dans le nucléaire. Elle dispose de deux réacteurs nucléaires : le réacteur nucléaire de Draria sur les hauteurs d'Alger d'une capacité de 3 mégawatts (MW) et construit par les Argentins en 1984, et le réacteur d'Aïn Oussara à 250 km au sud d'Alger construit par les Chinois, d'une capacité de 15 MW. Ces deux réacteurs sont régulièrement inspectés par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) dont l'Algérie est membre.

Selon certaines sources, l'Algérie dispose d'une réserve de 26 000 tonnes d'uranium et compte se doter d'une centrale nucléaire tous les cinq ans après sa première centrale dont l'acquisition est prévue probablement en 2020 [33].

III.5.4 Potentiel de l'énergie Géothermique :

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis d'identifier plus de deux cent (200) sources chaudes qui ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra [30].

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/100m.

- Zone de Relizane et Mascara
- Zone de Aïne Boucif et Sidi Aïssa
- Zone de Guelma et Djebel El Onk

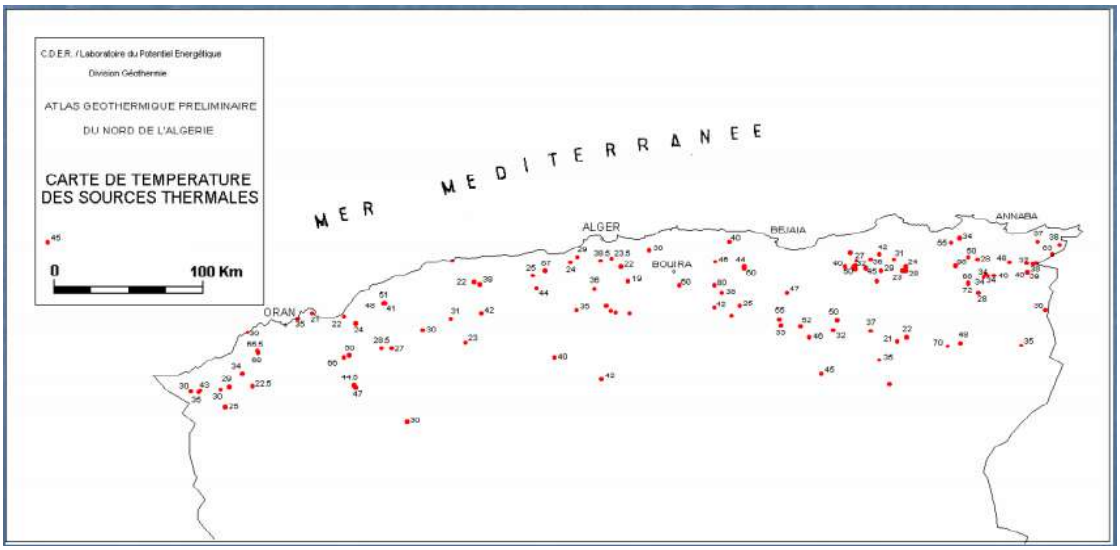


Figure III - 8: Carte de température des sources thermales [34].

III.5.5 Potentiel Hydraulique :

Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65milliards de m^3, mais finalement profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer.

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m3, dont environ 2/3 pour les ressources en surface.103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation [30].

III.5.6 Le Potentiel de la Biomasse :

- **Potentiel de la forêt :**

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes Equivalent Pétrole).Le potentiel récupérable est de l'ordre de 3,7 Millions de TEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10% [30].

- **Potentiel national des déchets ménagers et assimilés :**

05 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de TEP/an [32].

III.6 Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables :

De même Les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie [36].

III.6.1 Avantage :

- Plus les sources ne sont variées et renouvelables en même temps, plus l'indépendance énergétique n'est assurée.
- Décentralisation qui privilégie des petites unités de production locales.
- Facilité d'installer, d'utiliser et de combiner plusieurs sources en même temps.
- Pas d'émission de CO2 Pour les plus parts des méthodes.
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.

III.6.2 Inconvénients:

- Investissement important.
- L'installation doit s'intégrer dans l'environnement.
- Variabilité de la production de l'éolien qui dépend d'un vent aléatoire.

III.7 Potentiel de l'énergie solaire thermique en Algérie :

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 [35].

Dans le domaine de la concentration solaire, le programme national des énergies renouvelables prévoit des actions ambitieuses pour l'industrie des équipements du solaire thermique. Ces actions sont résumées comme suit [35] :

- La période 2011-2013, lancement des études pour la fabrication locale des composants des centrales thermodynamiques (miroirs, fluide caloporteur et block de puissance). Le taux d'intégration visé est de 7%.
- La période 2014-2020, en plus des actions de renforcement des capacités d'engineering, il est prévu :
  - La construction d'une usine de fabrication des miroirs,
  - La construction d'une usine de fabrication de fluide caloporteur et équipements de stockage,
  - La construction d'une usine de fabrication des équipements du bloc de puissance.
  - Le taux d'intégration visé est de 50%.

III.7.1 La demande en matière de chaleur du secteur industriel :

Comme il n'y a pas d'études détaillées sur la demande d'énergie industrielle dans la région MENA et la structure la demande d'énergie industrielle (distribution relative des formes d'énergie, températures, etc.) est attendue Pour être similaire entre les régions, cette section est basée sur des données européennes et allemandes. Et le terme « chaleur » est ici employé pour désigner l'énergie thermique finale. Il recouvre la notion d'usage thermique, à savoir le chauffage, mais aussi l'eau chaude sanitaire et la cuisson. Il ne prend pas en compte l'électricité spécifique [6].

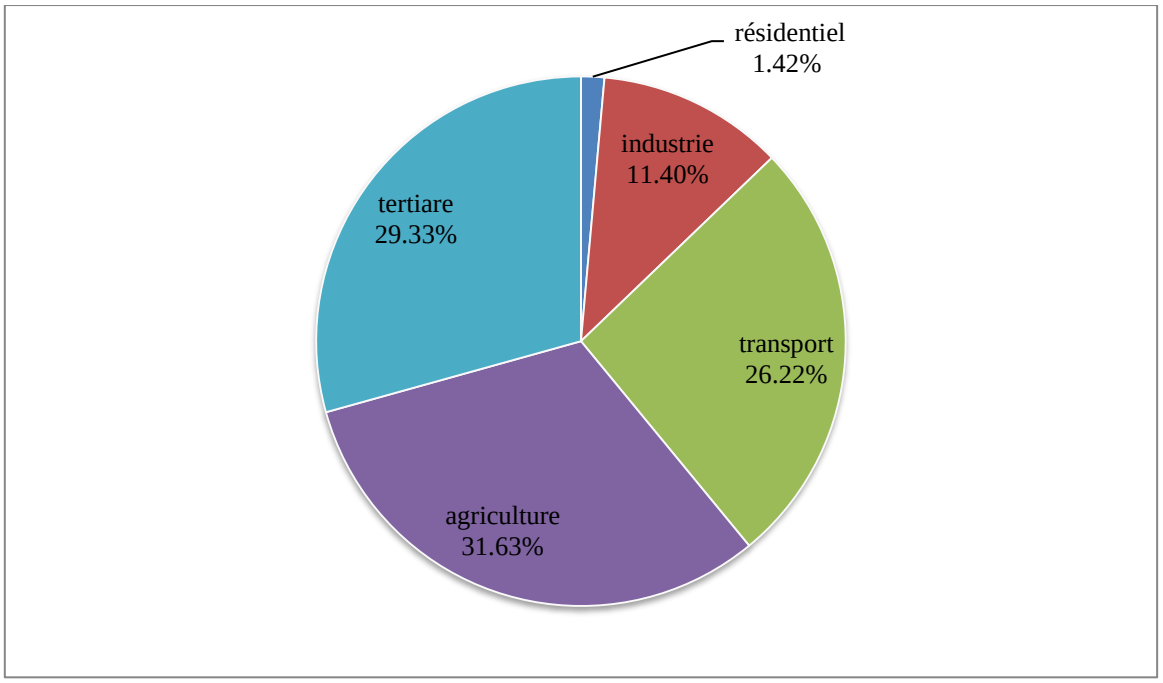


Figure III - 9: Consommation d'énergie dans différents secteurs (2015) [29].

L'industrie est la 4e consommatrice d'énergie après le secteur tertiaire, agriculture et le Transport. Cela correspond à une consommation de pourcentage 11.40% par rapporte les autres secteurs.

	Typiquement : industrie agro-alimentaire, papier-carton, chimie			Typiquement : industrie des métaux, verre, ciment, tuiles et briques		
T en :°C Type De chaleur	Très basses températures : 30	Basse température : 60	Moyenne température : 100	Haute température : 130	Haute température : 200	Très Haute température : 500
REJETS LIQUIDES	eaux usées résidentiel - tertiaire	eaux de refroidissement (compresseurs air et froid, four à induction, etc.) et lavage	eaux de refroidissement (pièces à haute température, moule de fonderie, etc.	purges de chaudières, condensats de vapeur, etc.		
REJETS GAZEUX	Air de conditionnement	Air chaud : de séchage, de compresseur (froid et air comprimé), de refroidissement de pièces	Buées	Vapeur de procédé ou de flashe	Essentiellement gaz de combustion (four industriel, chaudière, incinérateur, turbine, etc.)	
REJETS DIFFUS		Défauts d'isolation des canalisations, des parois et ouvertures non fermées (four, séchoir, etc.)	Refroidissement naturel des produits : métaux, céramique, etc.			Chaleur rayonnée (convoyage brame d'acier, etc.)

Tableau III - 6: les processus industriel qui demande la chaleur [40].

Chapitre IV

Etude de potentiel des systèmes à concentration linéaires de Fresnel en Algérie.

IV.1 Introduction

Au cours des dernières années, la recherche d'un substitut pour remplacer les sources d'énergie conventionnelles a augmenté l'importance des technologies d'énergie solaire thermique concentrée (CSTPT), tels que les technologies du Fresnel Linéaire et cylindro-parabolique. De nombreux indicateurs font de l'Algérie un pays idéal pour la mise en œuvre du CSTPT. De cette façon, le gouvernement de l'Algérie s'est engagé elle-même pour développer l'énergie solaire comme sa plus grande source d'énergie renouvelable; couvrir 20% du les besoins nationaux en électricité d'ici 2030 grâce aux énergies renouvelables et 35% en 2040 [41].

La majeure partie de l'énergie industrielle la demande est liée à la chaleur pour les processus industriels, qui peut être davantage différenciée par les températures. Une grande partie de la demande d'énergie pour les basses et moyennes températures peut être couverte par des capteurs solaires. Ainsi, la chaleur produite par le procédé solaire réduit non seulement les émissions de CO_2, mais réduit également les coûts de production et contribue ainsi à la compétitivité relative des producteurs.

IV.2 Topographie algérienne et son potentiel solaire :

Déterminer l'utilisation potentielle des technologies d'énergie thermique solaire concentrée (CSTPT) pour la production d'électricité en Algérie, il faut d'abord regarder les conditions géographiques et climatiques. La localisation géographique de l'Algérie présente plusieurs avantages pour l'utilisation extensive de l'énergie solaire. L'Algérie est située au centre de l'Afrique du Nord. Le Sahara représente 86% de la superficie totale du pays. Le climat est transitoire entre maritime (nord) et semi-aride à aride (haut plateaux et sud).

Selon une étude de l'Agence aérospatiale allemande (DLR), l'Algérie et avec 1.787.000 km^2de superficie non utilisée est le plus grand potentiel foncier à long terme pour la CSTPT. Le rayonnement solaire varie entre 5,6 kWh / m^2 et 7,2 kWh / m^2, ce qui correspond à 1 700 kWh / m^2 / an dans le nord et 2 650 kWh / m^2 / an dans le sud, il est considéré comme des régions les mieux isolées du monde, comme le montre la Figure IV - 1 . La moyenne la durée sur la quasi-totalité du territoire national dépasse 2 000 heures chaque année et peut atteindre

3 900 heures au Sahara. Le potentiel de production d'électricité par le CSTPT en Algérie est d'environ 170 000 TWh [41].

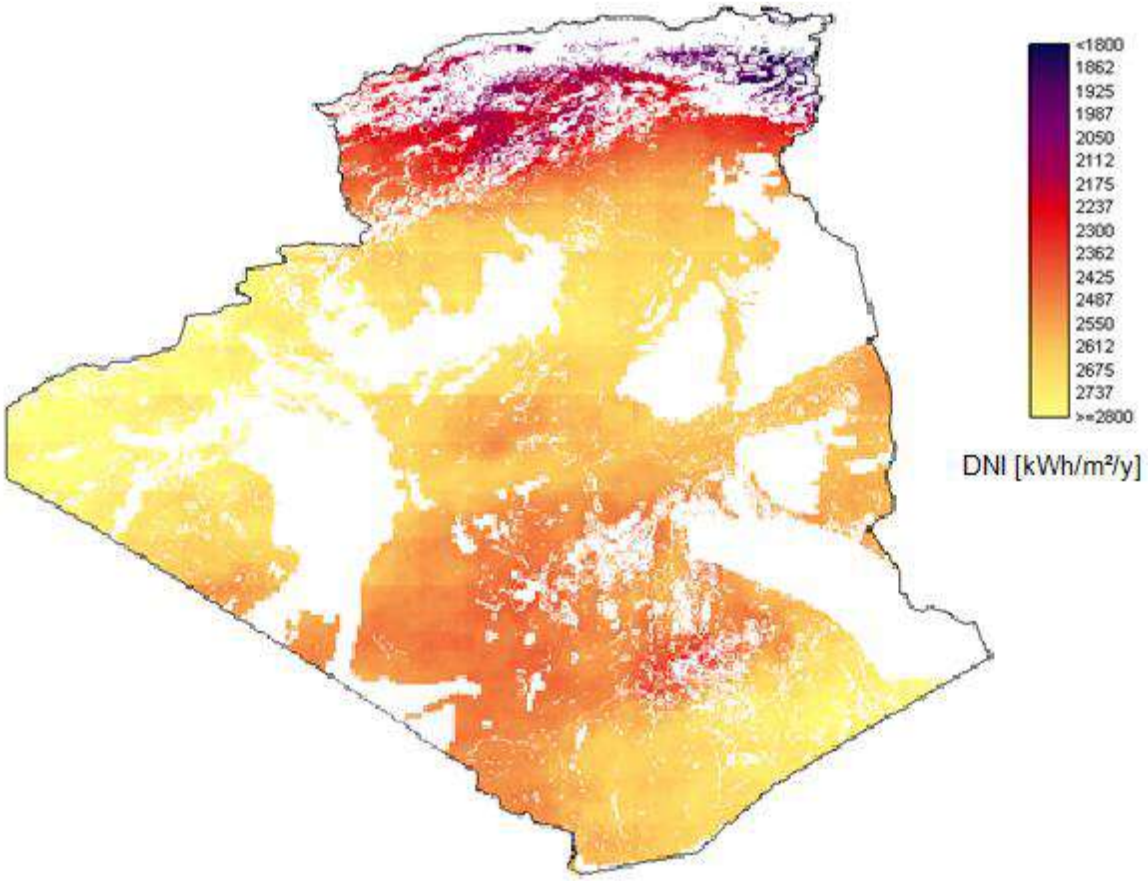


Figure IV - 1 : Carte solaire de l'Algérie [42].

L'étude des ressources solaires de Laboratoire national des énergies renouvelables(NREL) en 2012 a servi de base à l'estimation du potentiel d'énergie thermique technique pour SIPH, sous réserve de plusieurs modifications. Un système commercial PTC était encore supposé, mais sans stockage et avec un multiple solaire de 1,4. Pour déterminer le potentiel de production de chaleur, la formule ci-dessous a été utilisée [43]:

$$etatMWh_{th} = etat \sum [terrain\ disponible(Km^2) * 139.3MW_{TH}\ /Km^2 *$$

$$facteur\ de\ capacité\ (\%pour\ la\ classe\ DNI) * 8760heures\ par\ année] \qquad \text{(IV-1)}$$

Cette densité d'énergie a été débitée sur la base de la qualité de la ressource DNI pour la zone terrestre en question en utilisant une estimation du facteur de capacité. Le Tableau suivant

répertorie les facteurs de capacité alloués à la génération thermique par classe de ressources DNI.

Cylindro-parabolique, sans stockage, solaire multiple = 1.4. Densité de puissance thermique = 139,3 MW_{th} / km^2		
Classe DNI	**Ressource DNI (kWh / m^2 / jour)**	**Facteur de capacité**
1	5 - 6.25	0.199
2	6.25 - 7.25	0.248
3	7.25 - 7.5	0.277
4	7.5 - 7.75	0.284
5	≥ 7.75	0.295

Tableau IV - 1 : Densité de puissance thermique et facteur de capacité par classe DNI [43].

IV.3 Les applications des systèmes Fresnel dans les processus industriels :

La plupart des besoins énergétiques des procédés industriels sont inférieurs à 523 K, un niveau de température qui pourrait être facilement fourni par l'énergie solaire thermique (STE) [44]. Le tableau suivant résume la gamme de température des processus industriels potentiels. Dans le cas particulier d'Algérie, plusieurs des applications sont particulièrement intéressantes en nord, à savoir la réfrigération et le séchage des produits agricoles….etc.

Industrie	Processus	Plage de température (K)
Laitier	Stérilisation Séchage	373-393 393-453
Nourriture en boîte	Stérilisation	383-393
Production agricole	Séchage	353-473
Textile	Séchage Dégraisser	373-403 433-453
Papier	Eau de Javel	403-423
Chimie	Savons Caoutchouc synthétique Chaleur de processus Pétrole	473-533 423-473 393-453 373-423
Produits du bois	Préparation de la pâte	393-443
Désalinisation	Fluide caloporteur	373-523
Plastiques	Préparation Distillation Séparation Extension Mélange Séchage	393-413 413-423 473-493 413-433 453-473 393-423
Traitement thermique	Trempe moyenne	623-723
Réfrigération	Refroidisseur solaire double effet	393-463

Tableau IV - 2 : Plage de température des processus industriels potentiels [44].

Le champ d'application des technologies solaires est important car il permet des températures de refoulement du fluide caloporteur supérieures à 1200 K, entre 318 K et 673 K dans le cas de technologies de concentration solaire à focalisation linéaire. Le choix de l'une ou l'autre technologie dépend des exigences thermiques principalement associées à chaque processus industriel.

Récemment, plusieurs études portant sur l'analyse des possibilités de couplage d'une installation solaire à un procédé industriel ont été développées. Ces études identifient les améliorations nécessaires, les collecteurs utilisés dans les installations solaires chargées de générer de la chaleur industrielle, d'analyser le marché actuel et de compiler une série de recommandations basées sur les connaissances acquises dans les installations expérimentales. Les barrières qui entravent encore le développement des installations solaires telles que les coûts d'investissement élevés, le manque de financement public et les faibles coûts de l'énergie conventionnelle sont identifiées [44].

IV.4 Énergie solaire thermique

Énergie solaire thermique (STE) est un ensemble de technologies permettant d'exploiter l'énergie solaire pour une utilisation dans les secteurs industriels, résidentiels ou commerciaux. La génération d'énergie thermique à partir du rayonnement solaire est fortement recommandée car cette option atténue les changements climatiques et remplace les sources épuisables. En plus des avantages environnementaux déjà mentionnés, les technologies solaires sont liées à d'autres avantages liés à l'autosuffisance énergétique accrue de chaque pays, à l'accès à l'énergie nécessaire dans les zones défavorisées isolées et à l'effet de création d'emplois.

Les collecteurs d'énergie solaire thermique principalement utilisés sont la plaque plate (FP), le collecteur linéaire de Fresnel (LFC) et le collecteur cylindro-parabolique (PTC). Les deux collecteurs les plus utilisés pour les procédés industriels.

IV.4.1 Collecteur linéaire de Fresnel:

Le concept de LFC, (voir figure IV-3), est basé sur l'idée de simuler un concentrateur continu, en l'occurrence un collecteur cylindro-parabolique en tant qu'ensemble d'éléments, des rangées de miroirs correctement disposées sur un plan. Les problèmes liés à la construction de grands concentrateurs sont évités, ce qui permet de prendre des solutions à moindre coût. Les LFC sont donc une alternative économique aux collecteurs cylindro-paraboliques. Ce type de système est composé de longues rangées parallèles de miroirs de largeur relativement faible qui peuvent tourner autour de leur axe longitudinal. Ces miroirs concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur central fixe suspendu à une certaine hauteur. Cette géométrie permet

deux récepteurs ou plus en parallèle, relativement proches les uns des autres, permettant ainsi le partage des rangs des miroirs par deux des récepteurs. Cette configuration optimise l'utilisation du terrain et minimise les blocages entre les rangées de miroirs. L'élément principal de cette technologie est le tube absorbeur, qui est essentiellement similaire à celui utilisé dans les systèmes collecteurs paraboliques.



Figure IV - 2 : Collecteur linéaire de Fresnel (LFC). Source: AREVA solar [44].

IV.4.2 Collecteur cylinro-parabolique :

Collecteur cylindro-parabolique (PTC) est l'une des technologies CSP les plus matures, PTC est constitué d'une série de réflecteurs paraboliques qui concentrent le rayonnement solaire sur les tubes de réception contenant le fluide caloporteur qui est chauffé tout au long du processus. Ces capteurs sont placés en rangées parallèles qui constituent le champ solaire aligné dans un axe nord-sud ou est-ouest. Les récepteurs ont un revêtement spécial pour maximiser l'absorption d'énergie, minimiser la ré-irradiation infrarouge et travailler dans une enveloppe en verre sous vide pour éviter les pertes de chaleur par convection. De nos jours, la plupart des systèmes sont utilisés pour obtenir de l'énergie électrique. Dans ces cas, la chaleur solaire est déplacée par un fluide caloporteur circulant dans le tube récepteur et transférée à un générateur de vapeur pour produire la vapeur surchauffée qui alimente la turbine.. Les miroirs et les récepteurs suivent la trajectoire du soleil le long d'un seul axe. Un réseau de miroirs peut mesurer jusqu'à 100 m de long avec une ouverture incurvée de 5-6 m.



Figure IV - 3 : Collecteur cylindro-parabolique. Source: Enerstar [44].

IV.5 Configuration d'une unité industrielle

Le système solaire fournit l'énergie thermique nécessaire pour faire fonctionner une unité industrielle. La source d'énergie conventionnelle de l'unité fonctionne comme un système d'alimentation auxiliaire dans la nouvelle configuration. Sa fonction est de remplacer le nouveau système lorsque les transitoires du rayonnement solaire ne permettent pas de répondre aux besoins du processus industriel. La caractérisation de ce processus industriel n'est pas le sujet de cet article mais ses besoins; en particulier la température de travail détermine le plus technologie solaire appropriée. L'usine analysée principalement composée d'un champ solaire, d'un échangeur de chaleur et d'un système de stockage d'énergie thermique (figure IV-5) [44].

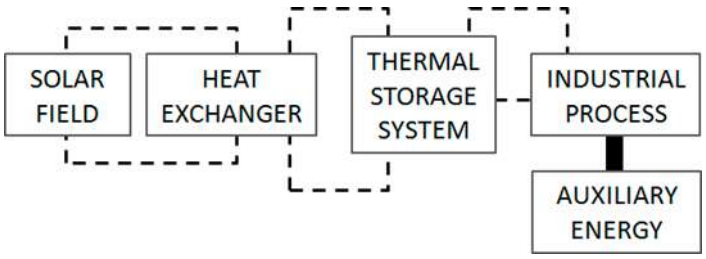


Figure IV - 4 : Configuration de l'unité industrielle analysée [44].

Le système de stockage d'énergie thermique est considéré comme infini, en d'autres termes, toute l'énergie générée est utilisée. La partie solaire s'appuie également sur un système de contrôle qui gère le fonctionnement de l'installation en fonction des conditions météorologiques. Le champ solaire est chargé de capturer le rayonnement solaire et d'élever la température du fluide caloporteur. Pour couvrir toute la plage de température.

IV.6 Paramètres économiques :

La LCOH est définie comme une métrique pratique pour l'estimation du coût à vie d'un système de capteurs solaires pour les applications de chaleur industrielle. Le LCOH est défini de manière analogue au LCOE, qui se réfère classiquement à l'énergie électrique. Dans sa forme la plus simple, la LCOH est définie comme:

$$LCOH = \frac{(coût\ total\ du\ projet\ installé)*(FCR)+(annuel\ O\&M)}{génération\ thermique\ annuelle} \qquad \text{(IV-2)}$$

Où le FCR est le taux de redevance fixe. Le FCR dépend d'une série de paramètres financiers pouvant avoir une influence significative sur le LCOH, et inclut le coût moyen pondéré du capital (WACC) et le financement de la construction [43].

Le tableau suivant résume les coûts d'investissement (C_I), les coûts d'exploitation et de maintenance (C_{OM}) et les coûts de remplacement (C_R) liés à chacune des technologies analysées. C_I est calculé sur la base de la superficie utilisée alors que les deux autres coûts sont calculés en pourcentage de C_I [44].

Coûts			
technologie	C_I	C_{OM}	C_R
	€/m^2	%C_I	%C_I
LFC	425	5.0	10.0
PTC	560	5.5	10.0

Tableau IV - 3 : Coûts de la technologie solaire [44].

IV.7 Etude des rendements de systèmes solaires a concentration linéaire de Fresnel pour déférents sites algériens :

Pour évaluer l'énergie thermique disponible à la sortie du champ solaire, les courbes d'efficacité de chaque technologie sont requises. Les courbes d'efficacité associées à la meilleure technologie disponible ont été sélectionnées. L'expression générale des courbes d'efficacité est la suivante [44]:

$$\eta_{sf} = \eta_0 - (c_1 + c_2 * \Delta T) * (\Delta T / G_T) \qquad \text{(IV-3)}$$

Où η_{sf}: efficacité du champ solaire instantané.

η_0: efficacité optique.

c_1: coefficient de perte de chaleur du premier ordre ($W / K^2 . m^2$).

c_2: coefficient de perte de chaleur du second ordre ($W / K^2 . m^2$).

ΔT: différence entre la température moyenne du fluide et la température ambiante (K).

G_T: rayonnement solaire incident (W / m^2).

- **Les Coefficients de courbes d'efficacité de système Fresnel :**

η_0= 0.667, c_1= 0.1020, c_2= 0.0002.

- **Pour différents sites en Algérie :**

On prend T du fluide de 293K jusqu'à 633K.

IV.7.1 Alger :

Avec G_T =4600 Wh/m^2 et T_{amb} = 25°C= 298k.

Température du fluide(K)	293	333	373	413	453	493	533	573	613	633
η_{sf}	0.667	0.666	0.665	0.662	0.658	0.653	0.646	0.639	0.630	0.625

Tableau IV - 4 : efficacité du champ solaire instantané pour sites d'Alger.

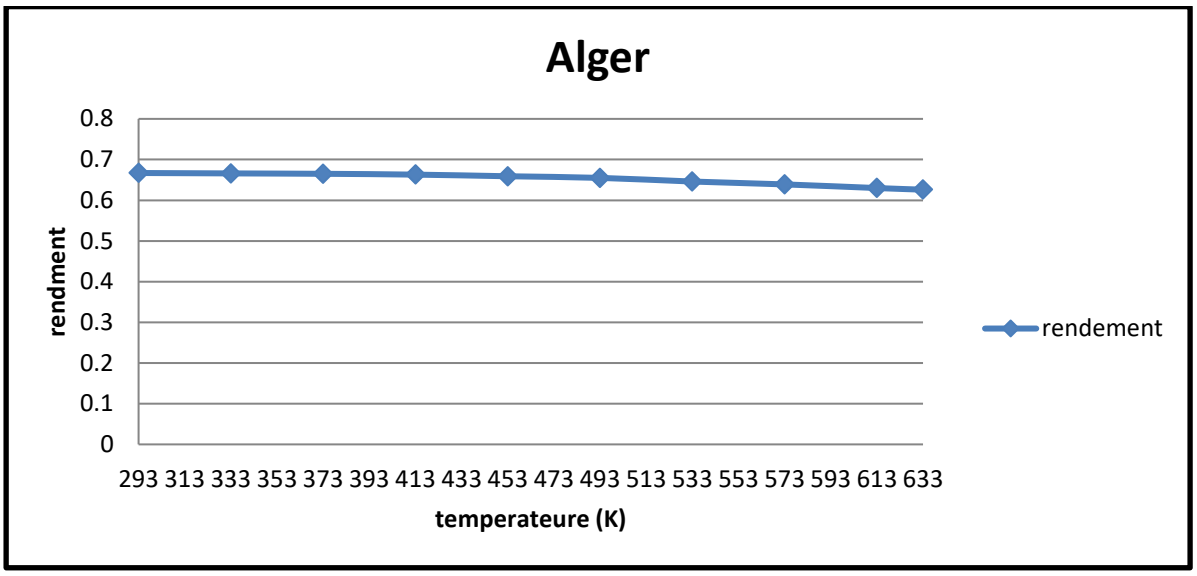


Figure IV - 5: Courbes d'efficacité de sites Alger.

IV.7.2 Médéa :

Avec G_T= 5196 Wh/m^{2}et T_{amb}=28°C = 301k.

Température du fluide(K)	293	333	373	413	453	493	533	573	613	633
η_{sf}	0.667	0.666	0.665	0.663	0.659	0.655	0.646	0.639	0.630	0.626

Tableau IV - 5 : efficacité du champ solaire instantané pour sites de Médéa

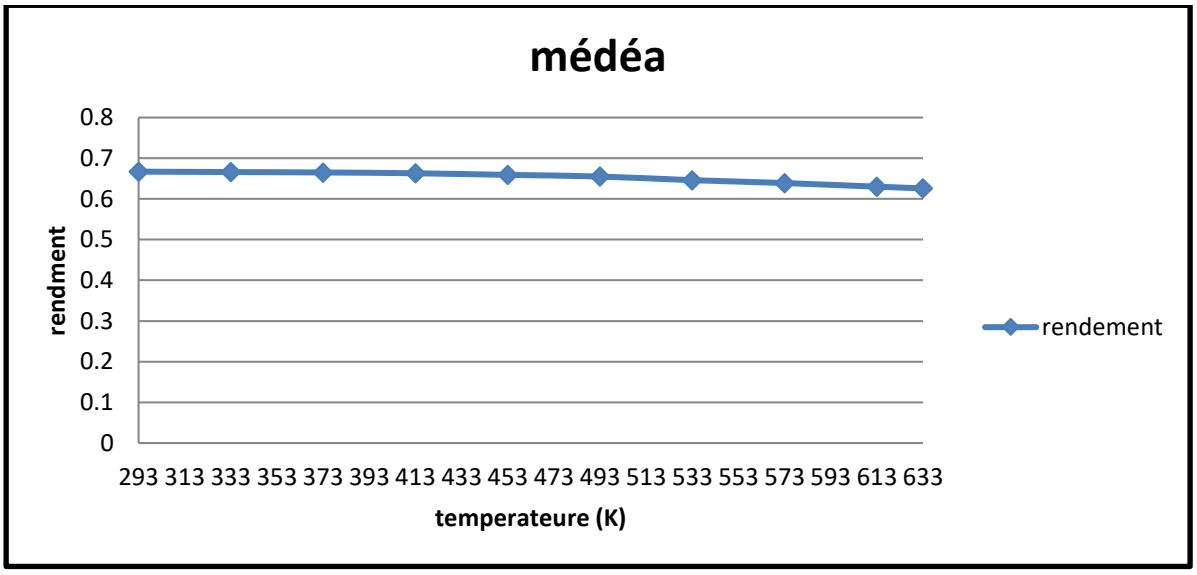


Figure IV - 6 : Courbes d'efficacité de sites Médéa.

IV.7.3 Ghardaïa :

Avec G_T = 5892 Wh/m^2 et T_{amb}= 33°C = 306k.

Température du fluide (K)	293	333	373	413	453	493	533	573	613	633
η_{sf}	0.667	0.666	0.665	0.663	0.660	0.656	0.651	0.646	0.640	0.636

Tableau IV - 6 : efficacité du champ solaire instantané pour sites de Ghardaïa.

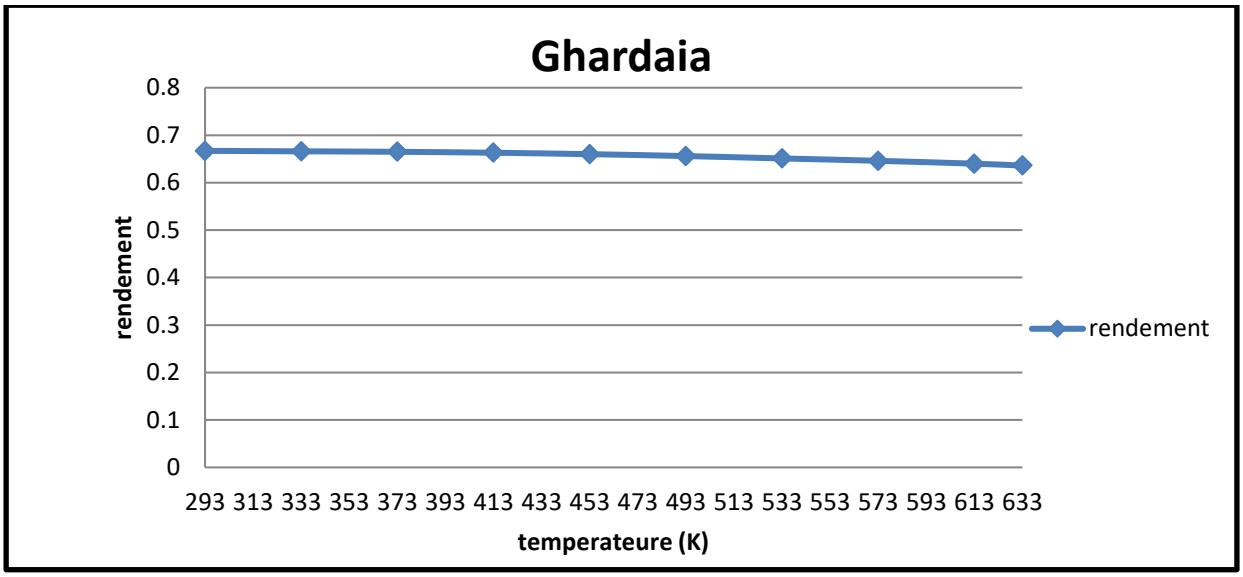


Figure IV - 7: Courbes d'efficacité de sites Ghardaïa

IV.7.4 Adrar :

Avec G_T= 6020Wh/m^2 et T_{amb}= 38°C = 311k.

Température du fluide	293	333	373	413	453	493	533	573	613	633
η_{sf}	0.667	0.667	0.666	0.664	0.661	0.658	0.653	0.648	0.641	0.638

Tableau IV - 7 : efficacité du champ solaire instantané pour sites d'Adrar.

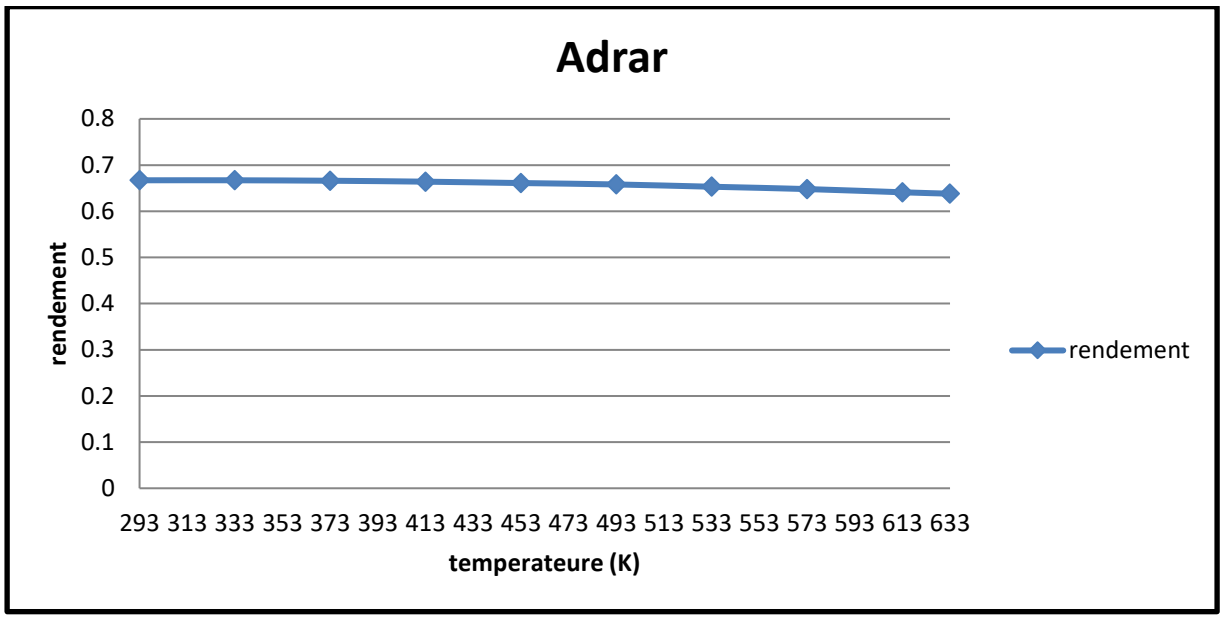


Figure IV - 8 : Courbes d'efficacité de sites Adrar.

Conclusion général

Conclusion général

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la technologie solaire thermodynamique, basée sur le concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel. Cette technologie est encore jeune et en pleine évolution. Les performances des systèmes existants s'améliorent de plus en plus et les premières centrales commerciales apparaissent. L'expérience et le savoir-faire dans cette technologie progresse donc rapidement, mais beaucoup reste à faire.

L'intérêt pour cette technologie est du à sa conception simple, qui permet de réduire les coûts. Les applications vont de la grande échelle pour la production d'électricité, à des installations de petite et moyenne puissances pour le bâtiment ou l'industrie, notamment en cogénération.

L'étude que nous avons réalisée sur les centrales solaires à concentrateur linéaire de Fresnel nous a permis de connaître le potentiel de l'utilisation des systèmes solaires a concentration linéaire de Fresnel dans la production de chaleur en Algérie.

L'Algérie a de très grandes opportunités d'opter pour l'installation des centrales solaires à Concentrateur de Fresnel vu les niveaux élevés de rayonnement solaire notamment au sud du pays. L'étude effectuée est une étude comparative pour voir l'effet de l'augmentation de la température du fluide caloporteur sur le rendement d'une centrale solaire a concentration linéaire de Fresnel avec quartes sites choisis qui sont une wilaya côtière « Alger », une wilaya des hauts plateaux « Médéa », une wilaya du Sahara central « Ghardaïa » et enfin une wilaya de l'extrême sud algérien en l'occurrence la wilaya de Adrar.

Nous avons étudié l'efficacité du champ de Miroirs de Fresnel pour la température du fluide utilisé, l'efficacité du champ varie contrairement à la température de la région et au rayonnement incident, Enfin, pour les sites étudiés, le meilleur site à choisir pour installer une centrale de ce type sera le site de Adrar suivi Ghardaïa, Médéa et enfin celui Alger.

References

[1]: Ahmed Kayad Abdourazak*, Abderafi Souad, Potentialities of using Linear Fresnel technology for solar energy development in Djibouti, 2014.

[2]: Concentrating solar power – drivers and opportunities for cost-competitive electricity Jim Hinkley, Bryan Curtin, Jenny Hayward, Alex Wonhas (CSIRO) Rod Boyd, Charles Grima, Amir Tadros, Ross Hall, Kevin Naicker, Adeeb Mikhail (Aurecon Australia Pty Ltd) March 2011.

[3]: Matti Lubkoll, Paul Gauché and Alan C Brent, localisation potential of linear fresnel csp in south Africa, may 2012.

[4]: François Veynandt Cogénération hélio thermodynamique avec concentrateur linéaire de Fresnel : modélisation de l'ensemble du procédé ; thèse 1er Décembre 2011.

[5] : Les Centrales Solaires à Concentration, Quoilin Sylvain *Ingénieur Civil Electromécanicien/Energéticien, Mai 2007.*

[6]: By Martin Haagen, Master Thesis the Potential of Fresnel Reflectors for Process Heat Generation in the MENA Region, Kassel, February 2012.

[7]: ENER MENA Advanced CSP Teaching Materials, Chapter 6: Linear Fresnel Technology.

[8]: Hamidatou Abderrezzak et Bouregba Seddik, simulation d'un système CSP (cylindro-parabolique) à production d'électricité, Mémoire, mai 2017.

[9] : Mr. Mohamed Lamine YOUSFI, Performances technico-économiques de centrales cylindro-paraboliques de puissance, Mémoire de Magister.

[10] : Hamdi Mounir, Étude expérimentale d'un concentrateur cylindro-parabolique, mémoire 2012.

[11] : Imad Eddine Meriche, Simulation et Modélisation d'Installation de Type Solaire thermodynamique Hybride, THÈSE, mars 2017.

[12] : YAMEGUEU NGUEWO Daniel, contribution a la conception des centrales solaires thermodynamiques de troisième génération : couplage et optimisation des technologies

existantes, laboratoire énergie solaire & économie d'énergie (lésée) institut international d'ingenierie de l'eau et de l'environnement (2ie), Juin 2009.

[13] : Hamani Nadjette, Modélisation du flux solaire incident et de la température de sortie dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration du rayonnement solaire incident. MEMOIRE, 2005.

[14] : jean jacques bezian, modélisation dynamique et régulation des centrales solaire thermodynamiques linéaire a génération direct de vapeur, thèse avril 2016.

[15] : TLV spécialiste de la vapeur : https://www.tlv.com/global/FR/steam-theory/flash-steam.html, mars 2018.

[16]: TECNICO LISBOA, António Ascenção Castro, Integration of a concentrating solar thermal system in an expanded cork agglomerate production line, November 2016.

[17]: Rémi DINSENMEYER, Étude des écoulements avec changement de phase : application à l'évaporation directe dans les centrales solaires à concentration, THÈSE, janvier 2015.

[18] : BOUTGHAN CHERIFA, AMELIORATION DES PERFORMANCES D'UN COLLECTEUR SOLAIRE, MEMOIRE, 11 /2012.

[19] : Soteris A. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, Department of Mechanical Engineering, Higher Technical Institute.

[20]: Dr Martin Viessmann, Technical guide, Steam boilers viessmann climate of innovation mars 2011.

[21]: Edited by Keith Lovegrove and Wes Stein, Concentrating solar power technology, liver page 340, First published 2012, Woodhead Publishing Limited.

[22]: Walter Short, Daniel J. Packey, and Thomas Holt, A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies, March 1995.

[23]: R. Gabbriellia, P. Castratarob, F. Del Medicob, M. Di Palob, B. Lenzob, Levelized cost of heat for linear Fresnel concentrated solar systems, Solar PACES 2013.

[24]: PRESENTED BY Jared Moore, Cost Effectiveness of CO2 Mitigation Technologies and Policies in the Electricity Sector, December 2014.

[25]: Mohamed Tahar Mabrouk, Production optimale d'énergie pour une communauté à petite échelle : Application à l'optimisation d'une centrale solaire hybride produisant électricité et chaleur, le 05 Novembre 2015.

[26]: Aiying Rong*, Risto Lahdelma, Role of Polygeneration in Sustainable Energy System Development Challenges and opportunities from optimization viewpoints, 21/9/2015.

[27]: Ministère de l'Energie, bilan énergétique national 2016 Edition 2017.

[28]: Mostefa BELMOKADDEM, Yassine Zakaria GHOUALI, Mohamed Seghir GUELLIL, consommation d'énergie et croissance économique: essai d'analyse par le recours à la cointegration en panel, 2014.

[29]: Lyes BERRACHED, Etude Prospective de la Demande d'Energie Finale pour l'Algérie à l'Horizon 2030**,** 30 Octobre 2011.

[30]: ministre d'énergie, http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-l-energie

[31] : Ministère de l'Energie, Les énergies renouvelables en Algérie, Berlin, 16 Février 2016.

[32]: agence national des déchets, Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie 2014.

[33] : Énergie en Algérie, https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergienen Algérie, avril 2018.

[34]: Mr. boubekeur bairi, cadre à la direction des énergies nouvelles et renouvelables, cooperation algéro- italiano sur les énergies renouvelables / milan 22-23 mai 2007.

[35] : Dr Abderrahmane HAMIDAT, Le solaire thermique en Algérie: Histoire et Perspectives, Directeur de la Division Solaire Thermique et Géothermie E-mail : hamidat@cder.dz, Bulletin des Énergies Renouvelables - N° 22 2012.

[36]: Dr Ali Smai, Mohamed Lamine Zahi, Les Potentialités De L'Algérie En Energies Renouvelables. Recherches économiques et managériale – N° 91 - Juin 2016.

[37]: http://www.premier-ministre.gov.dz/ressources/front/files/pdf/politiques/energie.pdf.

[38] : http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=electricite-et-gaz.

[39] : sonelgaz, rapport d'activité et compte sociaux consolidés 2016

[40] : agence d'environnement et de la maitrise d'énergie, La chaleur fatale Industrielle,

[41] : Mohamed Abbas, Zoubir Belgroun and Nachida Kasbadji Merzouk, Techno economic performances of a dry cooling solar tower power plant under Algerian climate, *2014.*

[42]:https://www.google.dz/search?q=Direct+normal+irradiation+in+algeria&rlz=1C1RLNS_frDZ792DZ792&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiQ_Zvf0KPbAhULuBQKHfowDAYQ_AUICigB.

[43]: Parthiv Kurup and Craig Turchi, Initial Investigation into the Potential of CSP Industrial Process Heat for the Southwest United States, November 2015.

[44]: Isidoro Lillo, Elena Pérez, Sara Moreno and Manuel Silva, Process Heat Generation Potential from Solar Concentration Technologies in Latin America: The Case of Argentina, article, Published: 17 March 2017.