République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université MOULOUD MAMMERI TIZI OUZOU
Faculté de génie de la construction
Département génie mécanique

Mémoire de fin d'études

En Vue De L'option Du Diplôme D'état De master 2 en énergétique : énergies renouvelables

Thème

Simulation et optimisation des échangeurs thermiques dans une tour solaire

Encadré par :

M^{r} : MEDJKANE GH.

Présenté par :

BELKACHE Idir

2017/2018

AVANT D'ENTAMER NOTRE RAPPORT, JE TIENS À REMERCIER MON ENCADRANT M. MEDJKANE GHANEM POUR LE TEMPS QU'IL M'A CONSACRÉ ET POUR LES PRÉCIEUSES INFORMATIONS QU'IL M'A PRODIGUÉES AVEC INTÉRÊT ET COMPRÉHENSION.
JE TIENS À REMERCIER AUSSI M. LAURENT THEIRY POUR SON AIDE DANS LA SIMULATION DU LOGICIEL ET SES PRÉCIEUX CONSEILS.
MES REMERCIEMENTS VONT À M. OUIKEM YACINE RESPONSABLE DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT CHEZ SONELGAZ ET À TOUT LE PERSONNEL
QUE NOUS AVONS CONTACTÉ DURANT NOTRE STAGE AU SEIN DE L'ENTREPRISE, AUPRÈS DESQUELLES NOUS AVONS TROUVÉ L'ACCUEIL CHALEUREUX, L'AIDE ET L'ASSISTANCE DONT NOUS AVONS BESOIN.
NOUS ADRESSONS AUSSI NOS REMERCIEMENTS AUX MEMBRES DES JURYS POUR AVOIR BIEN VOULU JUGERCE TRAVAIL.
SANS OUBLIER, JE REMERCIE TOUS LES PROFESSEURS DE LA FACULTÉ DE GÉNIE DE LA CONSTRUCTION DE L'UNIVERSITÉ MOULOUD MAAMERI TIZIOUZOU , ET PARTICULIÈREMENT CEUX DU MASTER SPÉCIALISÉ ENERGIES RENOUVELABLES POUR LEUR AIDE ET LEURS PRÉCIEUX CONSEILS ET POUR L'INTÉRÊT QU'ILS PORTENT À NOTRE FORMATION.
ENFIN, NOS REMERCIEMENTS À TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN AU BON DÉROULEMENT DE CE PROJET.

Liste des figures :

Figure 1 : effet de serre 10

Figure 2 : potentiel de l'Algérie en énergie solaire 12

Figure 3 : potentiel de l'Algérie dans l'énergie éolienne 13

Figure 4 : carte d'idendité du soleil 15

Figure6 :. Coordonnées horaire 17

Figure. 7 :.Azimut du soleil 19

Figure8 : .Coordonnées horizontales 19

Figure. 9 : Angle incident.....20

Figure. 10 : Rayonnement solaire 20

Figure. 11 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.....21

Figure. 12 : Rayonnement solaire 24

Figure 13 : irradiation solaire annuel 26

FIGURE 14 : Meilleurs emplacement pour l'énergie solaire thermique 26

Figure 15 : énergie solaire photovoltaïque.....27

Figure 16 : centrale cylindro-parabolique 27

Figure 17 :dishstirling.....28

figure 18 : tour solaire.....28

Figure 19 : schéma de principe d'une tour solaire à effet de cheminée 31

Figure 20 : schéma de principe d'une tour réfléchissante.....31

Figure 21 : principe de fonctionnement d'une tour solaire.....32

Figure 22 : champ d'héliostat 32

Figure 23 : les principaux paramètres influant sur le rendement de l'héliostat.....35

Figure 24 : installation fausse 36

Figure 25 : installation correcte 36

Figure 26 : rendement des héliostats en fonction de leurs positions 38

Figure 27 : principe de concentration 39

Figure 28 : bilan énergétique pour un absorbeur chauffé par la lumière solaire.....40

Figure 29 : schéma de bilan thermique.....42

Figure 30: cycle de RANKINE en vapeur humide.....44

Figure 31 : cycle d'une turbine à vapeur 45

Figure 32 : cycle réel de RANKINE 45

Figure 33 : schéma de simulation du cycle de RANKINE 47

Figure 34 : schéma du Cycle de vapeur surchauffée dans thermoptim.....48

Figure 35 : rayonnement direct mensuel et annuel.....51

Figure 36 : Mapp de distribution des Héliostats 52

Figure 37 : énergie thermique absorbée du récepteur.....53

Figure 38 : efficacité du récepteur 54

Figure 39 : puissance nette produite 54

Figure 40 : consommation d'énergie par un héliostat 55

Figure 41 : schéma d'installation de centrale solaire.....56

Figure 42: rayonnement solaire direct annuel de Tamanrasset 57

Figure 43: schéma de l'installation d'une tour solaire 58

Figure 44 : schéma de simulation d'une centrale solaire alimentée par un récepteur à air...58

Figure 45 : graphique de variation de température du récepteur et des composantes de la chaudière « cas de l'air 59

Figure 46 :Graphique de variation de puissance des turbines « cas de l'air 59

Figure 47 : schéma de simulation d'une centrale solaire alimentée par un récepteur à eau .60

Figure 48 : graphique de variation de température du récepteur et des composantes de la chaudière « cas de l'eau 60

Figure 49 : Graphique de variation de puissance des turbines « cas de l'eau 61

Figure 50 : Graphique de température des deux récepteurs.....61

Figure 51: Graphique de variation de pression du deux récepteur en fonction de temps 62

LES TABLEAUX :

Tableau 1 : tableau récapitulatif des points du cycle de rankine……..48

Tableau 2 : tableau récapulatif des données du cycle à vapeur surchauffée ……49

Tableau 3: tableau comparatif entres les différents cycles thermodynamique……50

TABLEAU 4 : TABLEAU COMPARATIF DES DEUX RECEPTEURS…….....62

Sommaire

1- Introduction
2- C'est quoi l'effet de serre ?
3- Que devons nous faire ?
4- Les énergies renouvelables

- L'éolien
- La petite hydroélectricité
- La biomasse
- La géothermie
- Le solaire photovoltaïque
- Le solaire thermique

5-le potentiel de l'Algérie dans les énergies renouvelables
6-Notions générales sur le gisement solaire

- Généralités sur Le soleil
- Les projections solaires
    1. La tour solaire
    2. Tour solaire à effet de cheminée
    3. Tour solaire réfléchissante
    4. Tour solaire à concentration

Tour solaire à concentration

1. Principe de fonctionnement
2. Les éléments intervenants dans l'opération
3. Cycles thermodynamiques

- Simulation thermotim
- Simulation d'une tour solaire avec SAM
- SIMULATION des deux récepteurs sous TRNSYS

1-recepteur à eau

2-recepteur à air

Conclusion

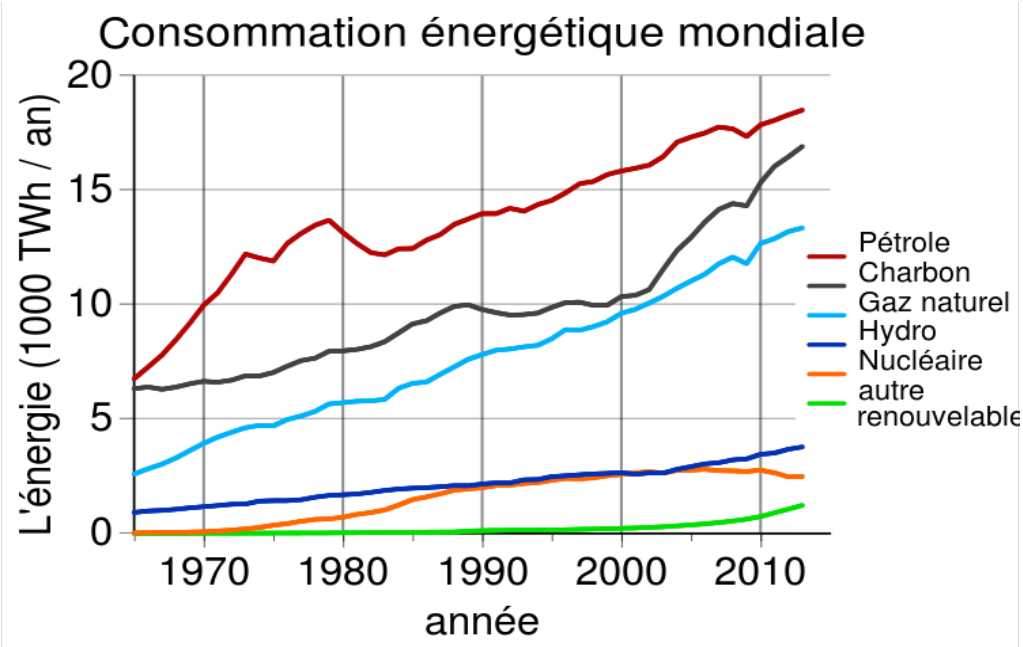
Introduction générale

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du **XVIIIe** siècle, puis du pétrole au milieu du **XXe** siècle. Après le premier choc pétrolier de 1973, quelques pays optent pour une nouvelle énergie, le nucléaire, contrairement aux autres pays du globe qui continuent d'exploiter les ressources fossiles en priorité.

Le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique. Le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique.

Dans son scénario de référence, l'**EIA**(Energy information administration) estime que la consommation mondiale d'énergie pourrait fortement croître dans les prochaines décennies : elle pourrait passer de **549 milliards** de MBtu (le « British Thermal Unit » est une unité d'énergie fréquemment employée dans le monde anglo-saxon[1]) en 2012 à **629 milliards** de MBtu en 2020 et **815 milliards** de MBtu en 2040, soit une hausse de **48%** en moins de trois décennies.

Cette hausse proviendrait essentiellement des pays en voie de développement, sous l'effet de leur croissance économique et démographique, on parle des pays asiatiques et de l'Afrique. Et encore La demande énergétique des États-Unis et de l'Europe serait encore 2,4 fois plus élevée que celle de l'Afrique en 2040 selon l'EIA, avec une population pourtant 5 fois plus faible d'après les dernières projections de l'ONU.



Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'importation de source d'énergies fossiles, motivée par des considérations économiques. D'autres facteurs comme le caractère limité de nos réserves fossiles, et l'indépendance énergétique nationale, les émissions de CO_2 n'ont pas été prises en compte ; Ce dernier engendre Le réchauffement de la planète qui s'explique par l'augmentation de la part des gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, protoxyde d'azote,…) dans l'atmosphère.

C’est quoi l’effet de serre ?

L’effet de serre naturel est un phénomène qui permet à la Terre d'être à la bonne température. Sans l'effet de serre, il ferait moins 18 degrés. Le soleil envoie ses rayons sur la Terre, qui entrent dans l'atmosphère, atteignent le sol et les océans en les réchauffant. Ces derniers renvoient de la chaleur dans l'air. Une partie repart dans l'espace, mais une partie reste dans l'atmosphère et repart vers le sol grâce aux gaz à effet de serre.

On parle d'effet de serre anthropique (c'est-à-dire dû à l'homme) par opposition à l'effet de serre naturel, nécessaire à l'équilibre écologique sur Terre. Ce dernier est dû au rejet massif de gaz à effet de serre, principalement lié aux activités humaines et plus particulièrement industrielles depuis la fin du XIXème siècle.

Ainsi, la Terre se réchauffe dangereusement, au détriment des glaciers qui fondent et des dérèglements climatiques qui s'accentuent (tornades, inondations, canicules...).

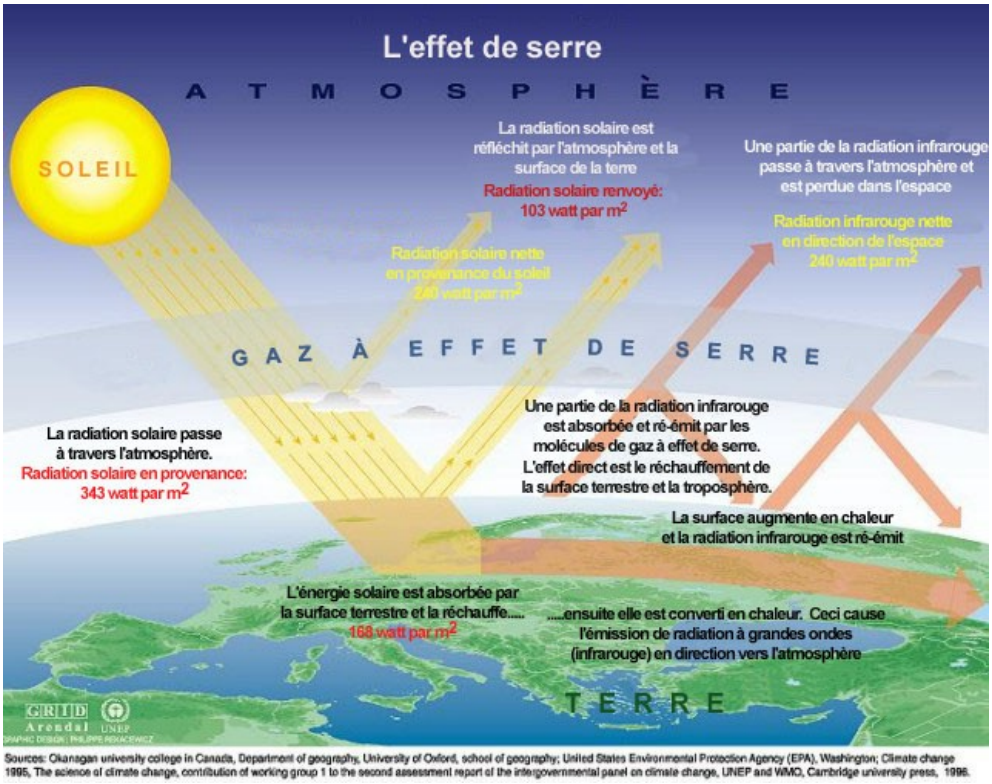


Figure 1 : effet de serre

Un accroissement de la concentration de gaz à effet de serre entraîne une plus grande opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge et, par conséquent, un rayonnement effectif vers l'espace à partir d'une altitude plus élevée et à une température plus basse. Il en résulte un forçage radiatif, un déséquilibre qui ne peut être compensé que par une hausse de la température du système surface-troposphère. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre renforcé. Ce phénomène représente une menace d’une grande ampleur pour notre planète, déjà que, tous les modèles mis en place par les météorologues et autres spécialistes prédisent que les températures devraient augmenter entre 1.5°C et 6°C au cours du **XXIème** siècle. Or de faibles changements de température peuvent avoir des conséquences de grande ampleur que ce soit au niveau du climat (augmentation du niveau de la mer,

différenciations climatiques plus fortes, plus grande variabilité du climat,…), qu'au niveau de la biodiversité (importante diminution des glaciers alpins, migration ou extinction d'espèces végétales ou animales,…). Ces changements vont se traduire notamment par un accroissement des risques pour l'homme : aridification de certaines zones provoquant des problèmes agricoles et alimentaires, accroissement de l'intensité des grands phénomènes météorologiques et des risques (inondations, coulées de boue,…), résurgence de maladies telles que le paludisme, …

Que devons nous faire ?

La Communauté internationale prend conscience de l'importance du danger que représente l'effet de serre et adopte des Conventions cadrées sur le changement climatique, en engageant les pays industrialisés à mettre en œuvre des mesures efficaces et durables visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les pays en développement quant à eux ne prendront aucun engagement de limitation de leurs émissions, soucieux de ne pas compromettre le développement de leurs secteurs économiques ; ce qui nous met dans l'obligation d'adopter d'autres nouvelles perspectives et solutions pour lutter contre ce phénomène. Au premier rang des solutions figurent l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables qui font l'objet d'attentes importantes dans le monde. Les énergies renouvelables apparaissent dans ce contexte comme alternative intéressante pour préserver à la fois le confort des êtres humains et la qualité de l'air.

Chapitre 1 :

1 /Les énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables; Ce sont des énergies inépuisables. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité.

- **L'éolien** : Les aérogénérateurs, mis en mouvement par le vent, fabriquent des dizaines de millions de mégawatheures. Utile dans les sites isolés, cette électricité alimente aussi les grands réseaux de distribution. Les éoliennes mécaniques servent à pomper de l'eau dans de nombreux pays.
- **La petite hydroélectricité :** Elle désigne les centrales ne dépassant pas 10 MW de puissance. Des turbines installées sur les cours d'eau utilisent la force motrice des chutes pour générer de l'électricité. Celle-ci est injectée dans le réseau ou alimente des sites qui n'y sont pas raccordés. Les petites centrales avec les grands barrages et les usines marémotrices forment la filière hydraulique, deuxième source d'énergie renouvelable dans le monde.

- **La biomasse :** (masse des végétaux) réunit le bois, la paille, les rafles de maïs, le biogaz et les biocarburants : Le bois énergie représente 14 % de la consommation énergétique mondiale. Issu des déchets de la forêt ou des industries du bois, il est brûlé pour produire de la chaleur. Le biogaz est issu de la fermentation des déchets organiques. Sa combustion produit de la chaleur, mais également de l'électricité par cogénération. Les biocarburants proviennent de plantes cultivées (tournesol, betterave, colza…). Le biodiesel (ou ester méthylique d'huile végétale, EMHV), l'éthanol, et son dérivé, l'éthyle-tertio-butyle-éther, l'ETBE sont les plus courants. Ils sont mélangés à de l'essence ou à du gazole.
- **La géothermie :** Cette énergie utilise la chaleur du sous-sol. Avec une température moyenne ou faible, on chauffe des locaux, alors qu'une tempéra - ture élevée permet de produire de l'électricité par vapeur interposée.
- **Le solaire photovoltaïque :** Des modules solaires produisent de l'électricité à partir de la lumière du soleil. Ils alimentent des sites isolés ou le réseau de distribution général. L'intégration à l'architecture est l'avenir du photovoltaïque dans les pays industrialisés.
- **Le solaire thermique** : Les capteurs solaires produisent de l'eau chaude sanitaire. Ils peuvent être aussi utilisés pour le chauffage, idéalement par le sol. Plusieurs dizaines de millions de mètres carrés de capteurs sont installés dans le monde. Les capteurs solaires dits "haute température" produisent de l'électricité par vapeur interposée : quelques grandes centrales de ce type existent dans le monde.

2/ Le potentiel de l'Algérie dans les énergies renouvelables :

L'Algérie est un pays où les énergies fossiles sont disponibles en abondance. Dixième réserve mondiale de gaz, troisième réserve africaine de pétrole, l'avenir énergétique de ce pays semble assuré, mais aussi dans les énergies renouvelables, L'Algérie recèle un potentiel en la matière parmi les plus grands au monde.Les potentialités importantes sont:

- L'Energie Solaire.
- L'Energie Eolienne.
- L'Energie Géothermique.
- La Bioénergie.

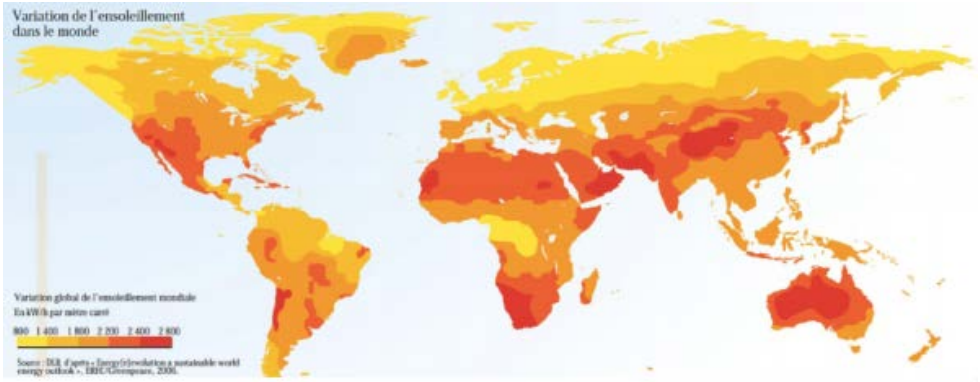


Figure2 : potentiel de l'Algérie en énergie solaire

1. L’Algérie est parmi les pays les mieux dotés en ressources solaires au monde.
2. L’Algérie reçoit près de 3000 heures d’ensoleillement par an et une irradiation¬ variant entre 4 et 7 kWh/m2/jour

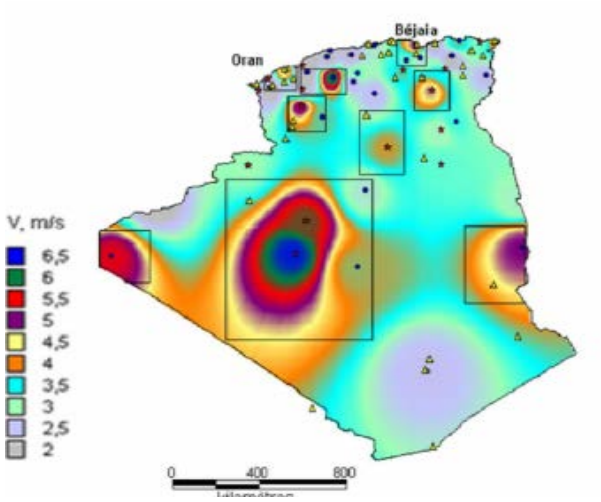


Figure3 : potentiel de l’Algérie dans l’énergie éolienne

- **37 Twh/an.**
- **1 Twh sur les cotes.**
- **4,5 Twh dans les montagnes.**
- **31,5 Twh dans le Sahara.**

Et pour la géothermie :

240 sources thermales.

- **65°C dans la région de l’Ouest,**
- **80°C dans la région Centre,**
- **94°C pour la région de l’Est.**
- **50°C en moyenne dans le Sud.**

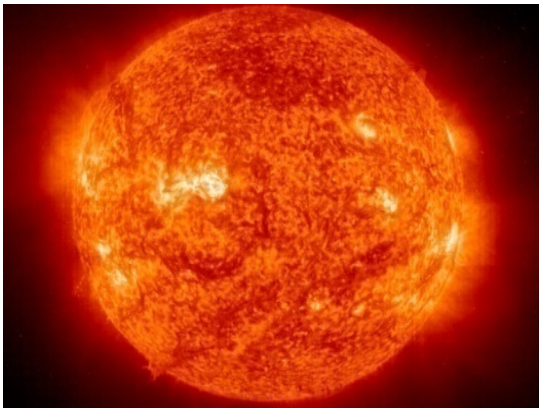
De nombreuses énergies non polluantes, ou renouvelables, ou abondantes partout a lasurface du globe pourraient pourtant être utilisées par l'homme. Entre autres, on distinguel'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire. Mais l'énergie éolienne n'est pasassez rentable, au sens qu’elle ne permet pas de produire beaucoup d'énergie par unité de surface.
L'énergie hydroélectrique a un bon rendement mais, un fort impact écologique et humain, et elle n'est pas disponible partout, et la plupart des espaces qui lui sont propices sont déjà satures de barrages.
L'énergie solaire, elle est disponible partout à la surface du globe, en quantité variantes, eta un bon rendement grâce a la technologie actuelle. Elle est de plus facile à exploiter. Ellesemble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir.C’est en 2006, avec l’inauguration de la centrale PS10 de 11 MW prés de Séville enEspagne qu’est donne un nouveau départ a la filière. L’annéesuivante, c’est au tour des Etats-Unis de mettre en service Nevada Solari

One, une centrale cylindro-parabolique de 64 MW. Lerythme des constructions s'accélère ensuite et c'est ainsi qu'en 2009, cinq centrales solairesthermodynamiques de forte puissance (PS20, Andosol 2, Puertollano, Entresol 1, La Risqua One) commencent a injecter du courant sur le réseauélectrique espagnol, portant a plus de 700 MW lacapacité totale des centrales solaires thermodynamiques en fonctionnement dans le monde.Aux cotes des développeurs industriels (Solar Millenium, Abengoa, Acciona,Iberdrola,…) responsables de ces projets de grande ampleur, de nouveaux acteurs de la filièreproposent aujourd'hui des technologies innovantes pour des centrales de taille moindre (eSolar,AUSRA, NovatecBiosol, AORA, KraftanlagenMunchen…), montrant une volonté globale departiciper activement au boom de développement de la filière dans le monde.

1/Généralités sur Le soleil

Le soleil

Le soleil (Sol en latin, Hélios en grec) est l'étoile du système solaire, c'est autour de luique gravite la Terre et les autres planètes. Le soleil bien avant l'apparition du premier homme surla terre a peu prés quatre milliards d'années, cette étoile de l'univers inondait déjà de lumièretoutes les planètes. Les rayons du soleil sont source de vie, ils nous fournissent la chaleur et lalumière. Une faible partie du rayonnement solaire parvient jusqu'a la surface de la terre, le reste
est réfléchi dans l'atmosphère.
Le Soleil se compose de 74 % d'hydrogène, de 24 % d'hélium et d'une fractiond'éléments plus lourds. Sa température superficielle moyenne est estiméea 5.800°K. La surfacelumineuse habituellement visible, ou photosphère, est d'environ 100 km d'épaisseur. La distancemoyenne de la Terre au Soleil est voisine de 150 millions de km. Le rayonnement solaire met environ 8 minutes pour nous parvenir.
Le soleil est un réacteur à fusion nucléaire qui fonctionne depuis 5 milliards d'années.
Par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, il émet ainsi d'énormes quantités d'énergie dans l'espace (sa puissance est estimée à 63 500 kW/m²). Ces radiations s'échappent dans toutes les directions et voyagent à travers l'espace à la vitesse constante de 300 000 km à la seconde, dénommée **vitesse de la lumière**.



Voici une carte d'identité du soleil :

Carte d'identité du Soleil		
Âge	4,6 milliards d'années	
Diamètre équatorial	1 392 530 km	
Circonférence	4 372 544 km	
Distance par rapport à la Terre	149 598 000 km	
Composition (élements/ pourcentage)	Hydrogène	73,46%
	Hélium	24,85%
	Oxygène	0,77%
	Carbone	0,29%
	Fer	0,16%
	Néon	0,12%
	Azote	0,09%
	Silicium	0,07%
	Magnésium	0,05%
	Soufre	0,04%
	Autres éléments	0,01%
Température	Noyau	15 000 000 K
	Zone radiative	1 500 000 K
	Zone de convection et photosphère	6 000 K
Densité (eau=1)	1,41	

Figure4 : carte d'idendité du soleil.

2/ Les projections solaires :

La forme sphérique de la terre, sa rotation, l'inclinaison de son axe de rotation, son mouvement de rotation autour du soleil, déterminent la distribution du rayonnement solaire. Le rayonnement solaire qui atteint une région de la terre dépend de sa latitude, de la saison et de l'heure de la journée.
Durant une année, le soleil va se lever et se coucher a des points différents de l'horizon décrivant chaque 24h une trajectoire dont l'évolution progressive, sous nos latitudes fixera les saisons.
Pendant les mois d'été, l'hémisphère nord est tourné vers le soleil, les jours alors sont plus longs que les nuits dans l'hémisphère nord et le rayonnement incident se rapproche de la verticale. Pendant les mois d'hiver, la situation est inversée, l'hémisphère nord voit la durée d'insolation décroitre et le soleil monté moins haut dans le ciel, tandis que l'ete règne sur l'hémisphère sud.

II. Coordonnées géographiques terrestre

On repère un point sur la surface de la terre par ces coordonnées :

II.1. Altitude h : L'altitude est l'élévation d'un lieu pas rapport au niveau de la mer, mesuré en mètre (m)

II.2. Longitude α : La longitude d'un lieu donné est l'angle formé par le méridien d'origine (méridien de GREENWICH), elle est comptée de 0° à 180°, positivement vers l'est et négativement vers l'ouest.

II.3. Latitude ϕ : Une latitude donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie entre 0° et 90°, positivement vers le pole Nord et négativement vers le pole Sud.

Figure. 5 : Coordonnés géographiques terrestre

III. Position du soleil

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées :

III.1. Coordonnées horaire :

Les coordonnées horaires sont liées à l'heure de l'observation et n'on aucune relation avec la position d'un observateur sur la terre. Elles ont comme plan de référence ; le plan de l'équateur.

Les coordonnées horaires sont au nombre de deux :

III.1.1. La déclinaison du soleil δ

La déclinaison est l'angle que fait la direction d'observation du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Elle est exprimée en degrés (°), minute (') et seconde (") d'arc. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial pas rapport au plan écliptique.

En considérant la déclinaison comme constante sur une journée, l'équation de Kopernic fournit la relation qui relie ces deux grandeurs **δ**

$$\boldsymbol{\delta = 23.45\left[\sin\frac{2\pi(284+d)}{365}\right]}$$

D : est le numéro du jour de l'année à partir de premier Janvier.

La déclinaison solaire varie de **-23.45°** au solstice d'hiver à **23.45°** au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes, et cette variation entraine des variations de la hauteur du soleil pour un même site.

III.1.2. Angle horaire du soleil (ω, H)

L'angle horaire étant l'angle ou l'arc sur l'équateur dans le sens rétrograde à partir du plan vertical du lieu passant par le sud jusqu'au plan méridien passant pas le centre du soleil. Il mesure la course du soleil dans le ciel. L'angle horaire définit le temps solaire vrai TVS, il est midi **TSV** si **ω=0**. Exprimé en après-midi et augmente de **15°** pas heur (un tour de **360°** en 24heurs). L'angle horaire **ω(°)** est donné par la formule suivante :

ω=15(TVS-12)

TVS : est temps solaire vrai en heure, se calcule par l'équation suivante :

$$TVS=TU+\frac{L}{15}+E_T$$

$$E_T=9.8\sin(2B)-7.53\cos B-1.5\sin B$$

$$B=\frac{2\pi(n-81)}{365}$$

TU : est le temps universel du méridien de GREENWICH (GTM).

Cette formule n'est pas valable pour les heures de lever et de coucher du soleil, il faut ainsi déterminer l'angle solaire du coucher, et au lever qui dépendent de la déclinaison et de la latitude du lieu

$$\omega_0= cos^{-1}(-\tan\varphi\tan\delta)$$

L'angle solaire au coucher est tout simplement l'opposé de l'angle solaire au levé.

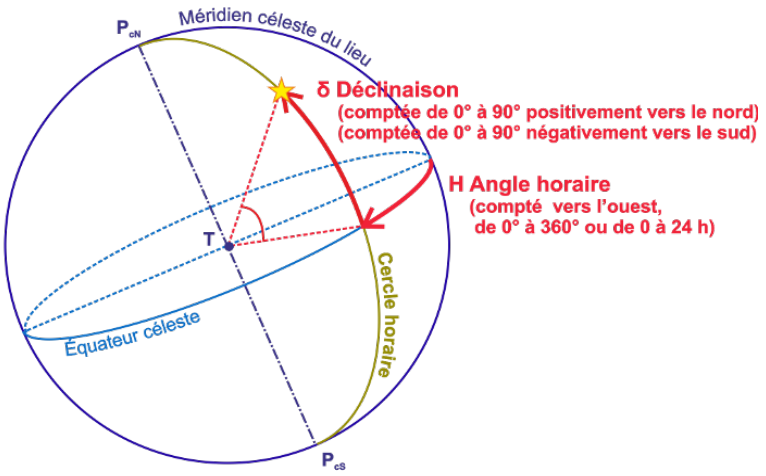


Figure6 :. Coordonnées horaire

III.2. Coordonnées horizontale

Les coordonnées horizontales dépendent du lieu d'observation. Elles ont comme plan de référence le plan horizontal, perpendiculaire à la verticale du lieu. Un objet est repéré dans ce système de coordonnées pas ces composantes :

III.2.1. Hauteur du soleil (γ, H)

La hauteur angulaire du soleil, communément appelée hauteur du soleil ou élévation du soleil, est l'angle compris entre la direction apparente du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu considéré. Sa valeur est nulle au lever ou au coucher du soleil et maximale lorsque le soleil est à son zénith. Elle varie au cours de la journée en fonction de la déclinaison **δ** de l'angle horaire **ω**, et de la latitude **ϕ**. De façon telle que :

$$\sin\gamma = \cos\delta\cos\omega\cos\varphi + \sin\delta\sin\varphi$$

III.2.2. Azimut du soleil (χ,A)

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sue le plan horizontal et la direction Sud ou Nord. Il est mesuré commençant par le Nord au par le Sud, soit vers l'Est soit vers l'Ouest, à travers un axe de 360° (l'azimute est compris entre -180°≤≤180°).
Dans l'hémisphère Nord, l'origine des azimuts correspond à la direction du Sud. L'angle azimutal est comté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est.

$$\sin\chi = \frac{\cos\delta\cos\omega\sin\varphi - \sin\delta\cos\varphi}{\cos\gamma}$$

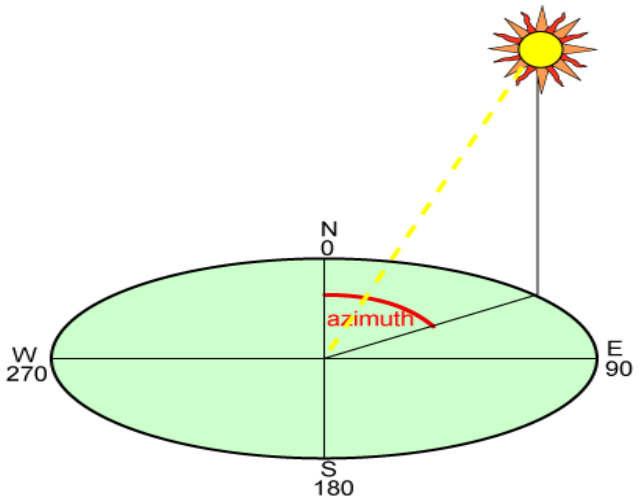


Figure. 7 :.Azimut du soleil

III.2.3. Angle zénithal θ_z

C'est l'angle entre le zénith local et la ligne joignant l'observateur et le soleil. Il varie de 0 à 19°

$$\cos \theta z = \cos \delta \cos \omega \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi$$

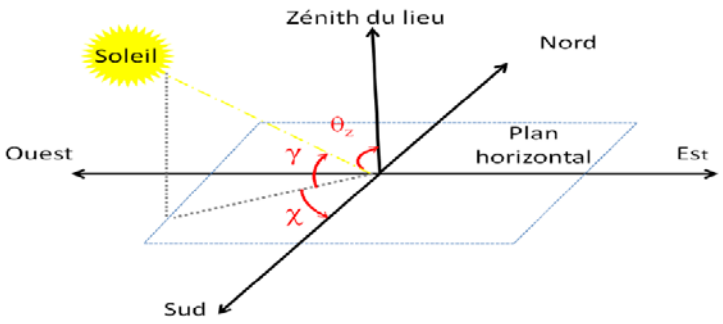


Figure8 : .Coordonnées horizontales

III.2.4. Angle incident

C'est l'angle formé par la normale du plan et les rayons du soleil.

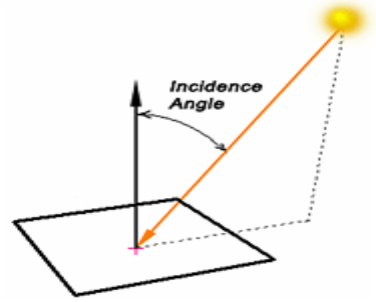


Figure. 9 : Angle incident

IV. Rayonnement solaire

Le soleil émet en permanence, dans toutes les directions de l'espace, des rayonnements électromagnétique composés de « **grains** » de lumière appelés photons. Ces rayonnements se propagent à la vitesse de la lumière **C**, il lui faut donc, en moyenne ; 499 secondes ; soit 8minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère, l'énergie, $\mathbf{E_{PH}}$, de chaque photon est directement liée à la longueur de l'onde λ

$$E_{ph}=\frac{hc}{\lambda}$$

Ou h est la constante de Planck, $\mathbf{h=6.62.10^{-34}j.s.}$

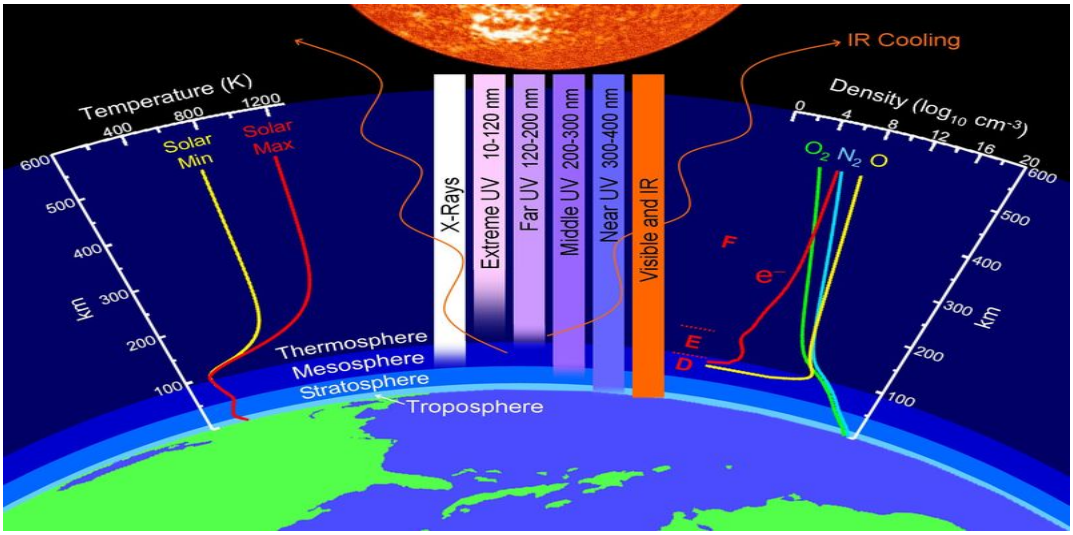


Figure. 10 : Rayonnement solaire

IV.2. Rayonnement extraterrestre (hors atmosphère)

Le rayonnement solaire extraterrestre couvre un très large domaine de longueur d'ondes. Il ne dépend d'aucun paramètre météorologique, mais il est fonction de quelques paramètres astronomique er géographique tels que : la latitude du lieu (**ϕ**), la déclinaison solaire (**δ**), et l'angle horaire au coucher du soleil (**ω**). Sur une surface horizontale, et pour le jour **n**, le rayonnement extraterrestre $\mathbf{G_0}$ (MJ. m^{-2}.$jour^{-1}$) est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$G_0=\frac{24*60}{\pi}G_{SC}\left[1+0.034\cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right)\right]\left[\omega_0\sin\varphi\sin\delta+\cos\varphi\sin\delta\sin\omega_0\right]$$

$\mathbf{G_{SC}}$ **:** est la constante solaire égale à **0.0082MJ.m^{-2}.mn^{-1}**
n : est numéro du jour à partir du premier Janvier.

IV.3. Rayonnement solaire en atmosphère terrestre

Le rayonnement reçu sur l'atmosphère terrestre n'occupe qu'une faible portion du spectre d'ondes électromagnétique solaire. Il est caractérisé par des longueurs d'ondes comprises entre 0.2 et 2.5µm.il inclut le domaine di visible (ondes lumineuses de 0.4 à 0.8 µm).
Les capteurs d'énergie solaire, qui correspondent aux cellules solaire devront donc être compatible avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme d'électrons

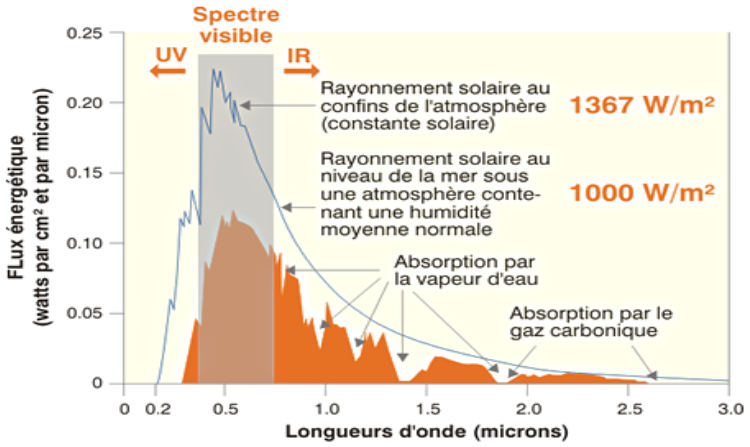


Figure. 11 : Répartition spectrale du rayonnement solaire

V. Indice de clarté

On appelle indice de clarté $\mathbf{k_T}$ le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre

$$K_T = G/G_0$$

Ou **G** est l'irradiation solaire reçu sur un plan horizontal.

La moyenne mensuelle de l'indice de clarté $\mathbf{K_T}$ varie selon les endroits et les saisons et varie généralement entre 0.3 (pour des régions ou des saisons pluvieuses) et 0.8 (pour des saisons ou des climats secs et ensoleillés).

VI. Irradiation solaire

L'irradiation solaire exprime la quantité d'énergie reçue, au niveau du sol, par unité de surface. Ses unités usuelles sont le **J/m²**, **J/cm²**, **Wh/m²** ou bien **KWh/m²**.ii

Elle dépend de nombreux facteurs, dont principalement la couverture nuageuse, la durée du jour, l'instant considéré dans la journée, l'orientation et l'inclinaison de la surface, la latitude du lieu, son degré de pollution et la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variation dans l'espace et le temps de l'irradiation solaire. Dans les régions du globe comprises entre 40° Nord et Sud, l'énergie globale annuelle reçue par une surface horizontale est comprise entre 1400 et 2500 KWh/m^2

VII. Durée d'isolation

La durée d'isolation correspond à la durée pendent la quelle le rayonnement solaire direct reçu sur un plan normal dépasse u seuil fixé par la convention à $120W.m^{-2}$.
En absence permanente des nuages, la durée de l'isolation est pratiquement égale à la durée du jour, qui s'appelle aussi la durée astronomique ou théorique du jour, elle est définit par :

$$S_0 = \frac{2}{15}\omega_0$$

ω_0 :est égale à l'angle horaire au coucher du soleil(°).
S_0 :la durée du jour(h).

VIII. Rayonnement solaire arrivant au sol

Le calcul et les mesures par satellite montrent que la terre qui est située à environ 150 millions de kilomètres du soleil, reçoit de sa part un rayonnement d'une puissance moyenne de 1361W/m^2, c'est la puissance reçue par une unité de surface qui serait perpendiculaire aux rayonnements juste au-dessus de l'atmosphère terrestre. En traversant l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est absorbé ou diffusé, on distingue plusieurs composants :

VIII.1. Rayonnement direct

C'est le rayonnement reçu directement du soleil, ce sont les rayons UV du Soleil, c'est ce type de rayonnement qui est utilisé dans le système à concentration (four solaire, centrales solaires thermodynamique et photovoltaïque)

VIII.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffusé par les différents gaz constituant l'atmosphère, des rayons lumineux issus du Soleil traversent les nuages et se diffusent sur toute la surface de la Terre, il contribue à l'éclairement mais ne peut pas être concentré (à l'inverse du rayonnement direct).

VIII.3. Rayonnement réfléchi

C'est la partie du rayonnement réfléchie par la Terre appelle aussi **albédo.**

VIII.4. Rayonnement global

C'est la somme du rayonnement direct et diffus, c'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaire thermique et photovoltaïque (système sans concentration)

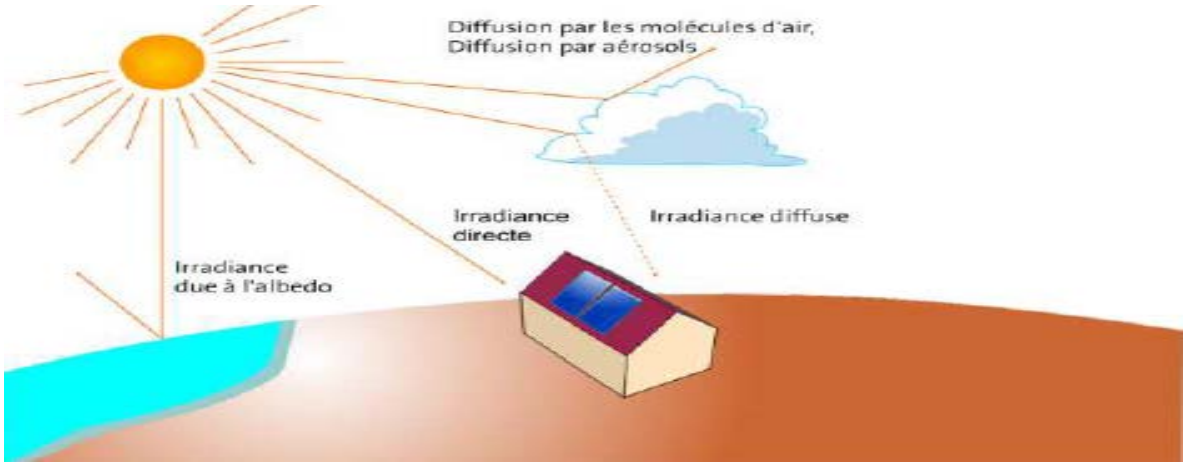


Figure. 12 : Rayonnement solaire

Rayonnement global = rayonnement direct + rayonnement diffus + albédo

IX. Rayonnement solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme surtout dans le Sud du pays, la durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (H/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m2/an)	1700	1900	2650

L'énergie solaire est disponible sur l'ensemble du globe terrestre à différente intensité, elle est entièrement renouvelable et inépuisable, ce pendant cette énergie reste dépendante des conditions météorologique qui rend son exploitation difficile, et son apport est variable au gré des jours et des saisons

L’ensoleillement annuel du site d’implantation étant en première approximation proportionnel à la production électrique et donc inversement proportionnel au coût de l’électricité, une étude soignée de la ressource solaire sur le lieu d’implantation de toute installation solaire est indispensable en préalable à tout projet. Après une brève introduction sur la ressource solaire dans le monde, nous verrons quelles sont les grandeurs météorologiques nécessaires à l’évaluation des performances des centrales solaires, où les trouver et quelle précision en attendre.

1/ L’énergie solaire :

L’utilisation de l’énergie solaire est un fait très ancien. L’énergie solaire est à l’origine de la vie sur Terre: les premiers organismes photosynthétiques l'utilisaient déjà il y a 3,6 milliards d'années pour produire leur matière organique. et cette exploitation s’est développée au fur et à mesure pendant le temps, jusqu’à ce qu’elle devient un enjeux économique et facteur de richesse.

L’énergie solaire

L’énergie solaire transmise par ensoleillement, rend possible la vie sur terre par apport de chaleur et de lumière. Le rayonnement du soleil est responsable des climats et de la plupart des phénomènes météorologiques observés sur notre planète. Le soleil n’a pas une surface bien définie comme celle de la terre, sa composition faite essentiellement de gaz dont la température est très élevée, est a l’origine de l’activité intense de toutes ses couches, ce qui nous parait comme étant sa surface est une couche de son atmosphère, la photosphère, qu’on appelle aussi sphère de lumière, elle représente la partie visible du soleil ou celle qui émet la lumière.

En plus, le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée dans le monde. La quantité d’énergie libérée par le soleil est captée par la planète terre en une heure, pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Cette grande capacité énergétique, est une source d’énergie propre et inépuisable.

Une grande partie du continent africain fait partie des régions les plus prometteuses pour l'implantation des technologies solaires thermodynamiques car se trouvant dans la ceinture solaire, c’est a dire les régions ou l’ensoleillement normale directe excède 2000 kWh/m2/an; il s’agit des régions telle que l’Algérie.

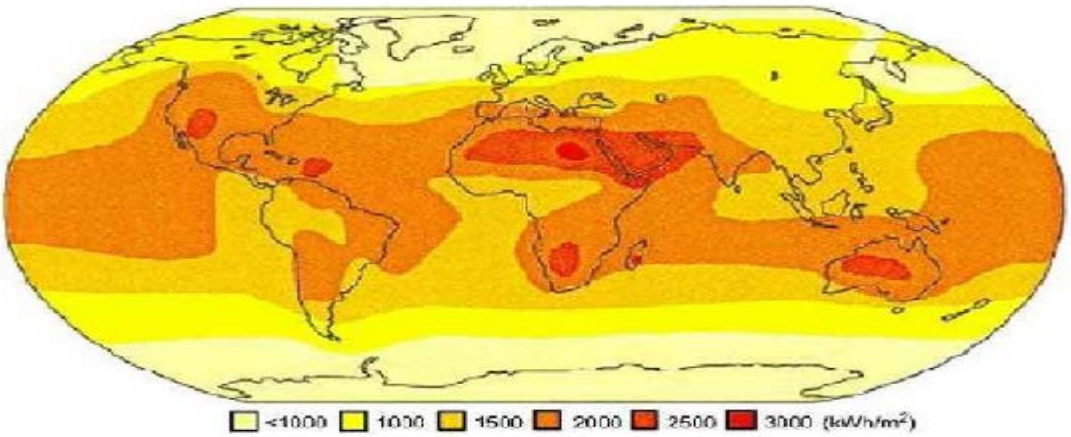


Figure 13 : irradiation solaire annuel

Selon une autre source, l'ensoleillement qui frappe les régions sous les points noirs présentés sur la figure I-3 pourrait alimenter en énergie le monde entier : si elles étaient installées dans les zones marquées par les six points sur la carte, des cellules solaires avec un rendement de conversion de seulement 8 % produiraient, en moyenne, 18 TW d'énergie électrique. C'est plus que l'énergie totale actuellement disponible grâce a toutes les sources d'énergie principales, y compris le charbon, le pétrole, le gaz, le nucléaire et l'hydraulique. En remarque que l'Algérie est l'une de ces six régions, ce qui montre l'importance de l'investissement dans le domaine de l'énergie solaire.

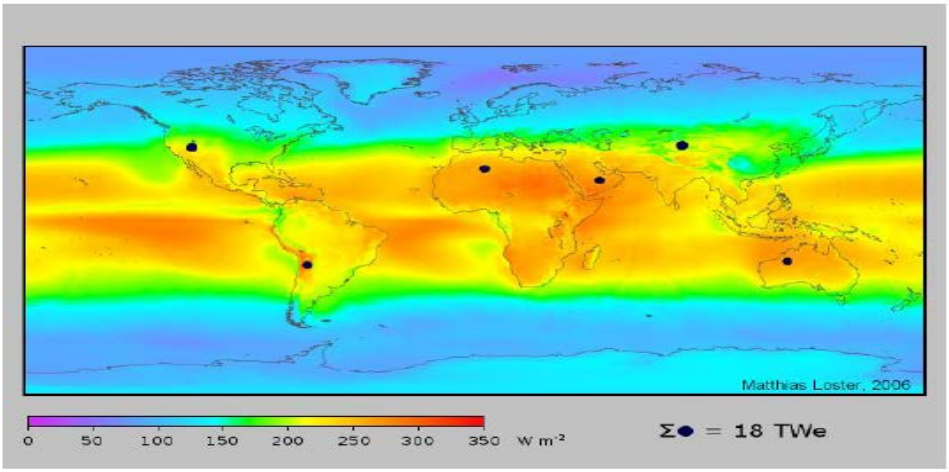


FIGURE 14 : Meilleurs emplacement pour l'énergie solaire thermique

L'exploitation de l'énergie solaire se fait par de différentes technologies,

- **Le solaire photovoltaique :**

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solairesphotovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source (le soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain.

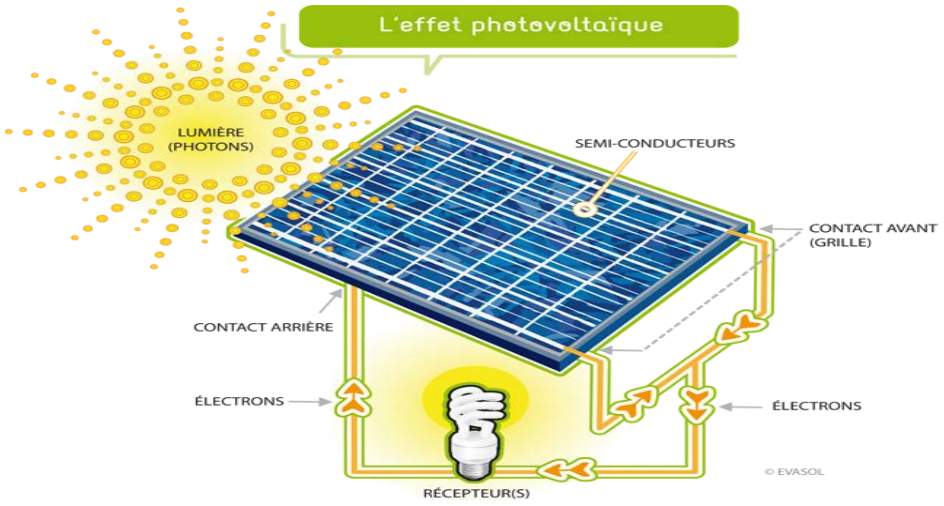


Figure 15 : énergie solaire photovoltaïque

- **L'énergie solaire thermodynamique :**

Cette filière consiste a exploiter l'énergie thermique du soleil provenant par rayonnement, en le concentrant vers des points récepteurs, ou vers des lignes réceptrices**.**

Voici les figures explicatives des principes de fonctionnement

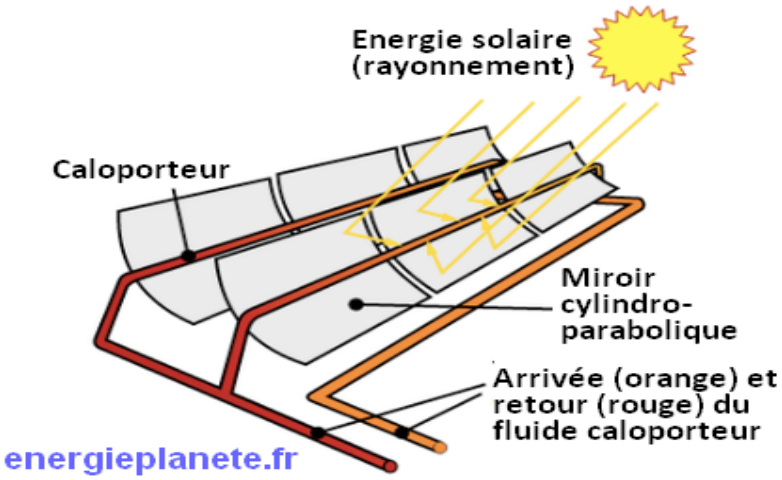
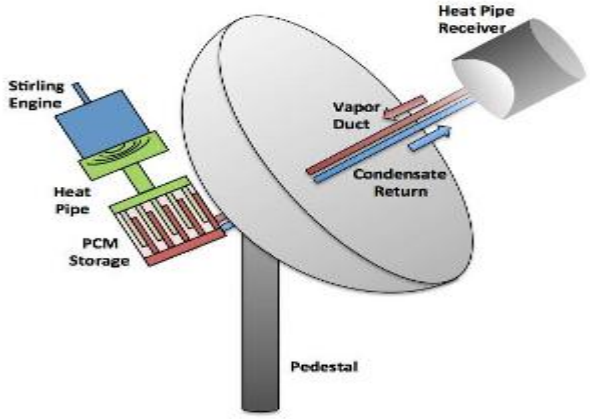


Figure 16 : centrale cylindro-parabolique



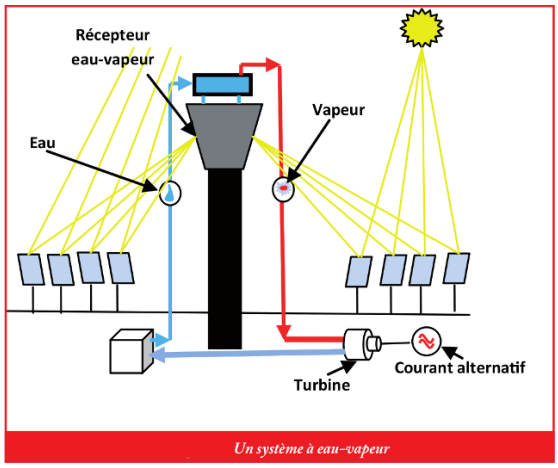


Figure17 :dishstirling **figure 18 : tour solaire**

Contrairement aux systèmes solaires plans (photovoltaïque, capteurs thermiques pour chauffage et eau chaude sanitaire) qui tirent profit du rayonnement solaire global, la ressource utilisée par les centrales solaires thermodynamiques est le rayonnement solaire

direct (DNI), ce qui induit deux conséquences pour les centrales solaires thermodynamiques :

- La nature de l'intermittence (fréquence, amplitude) est différente de celle observée dans le cas de l'ensoleillement global. On peut s'attendre à une plus forte amplitude, les coupures de flux liées aux passages nuageux sont plus brutales.

- La distribution de la ressource (cartographie du DNI) introduit des différences remarquables par rapport à l'utilisation PV ou solaire thermique.

Chapitre 2:

1/ La tour solaire :

Introduction :

Les réseaux paraboliques et Fresnel linéaire sont des systèmes de concentration de lignes, qui Signifie que l'irradiation solaire directe est concentrée sur la longueur d'un tube récepteur. Cela incline que le taux de concentration n'est pas aussi élevé que si le rayonnement était concentré Sur un seul point. Les systèmes Dish / Stirling et la technologie de la tour solaire sont classés comme Systèmes de concentration ponctuelle. Les deux atteignent des rapports de concentration très élevés (Dish / Stirling Les systèmes les plus élevés) et, par conséquent, les deux systèmes ont plus de potentiel pour atteindre Des températures élevées du fluide de travail que les systèmes de concentration de ligne. Un fluide de travail élevé La température, cependant, n'est pas le seul critère qui décide si un système solaire sera Réussi sur le marché ou non. Les centrales à énergie parabolique sont les systèmes solaires qui ont été construits le plus dans le monde et sont en exploitation commerciale le plus long moment de tout. En comparaison, beaucoup moins de centrales à énergie solaire ont été construites. Cependant, De nombreux concepts de tours solaires utilisant différents types de récepteurs et fluides fonctionnels ont étédémontrés et, par exemple, la première centrale électrique à tour commerciale d'usine en utilisant Le sel fondu sous forme de fluide caloporteur, **Gemasolar**, a été construite récemment. **Table 1** Compare les caractéristiques des quatre technologies d'énergie solaire concentriques actuelles.

Concentration Method	line concentrating system		point concentrating system	
Technology	**Parabolic Trough**	**Linear Fresnel**	**Central Receiver**	**Parabolic Dish**
State of the Art	commercial	pre-commercial	demonstrated and first commercialisation	demonstrated
Cost of Solar Field (€/m²)	200 – 250	150 – 200	250 – 300	> 350
Typical Unit Size (MW)	5 – 200	1 – 200	10 – 100	0.010
Construction Requirements	demanding	simple	demanding	moderate
Operating Temperature	390 – 550	270 – 550	550 – 1000	800 – 900
Heat Transfer Fluid	synthetic oil, water/steam	synthetic oil, water/steam	air, molten salt, water/steam	air
Thermodynamic Power Cycle	Rankine	Rankine	Brayton, Rankine	Stirling, Brayton
Power Unit	steam turbine	steam turbine	gas turbine, steam turbine	Stirling engine
Experience	high	low	moderate	moderate
Reliability	high	unknown	moderate	high
Thermal Storage Media	molten salt, concrete, PCM	molten salt, concrete, PCM	molten salt, ceramics, PCM	molten salt, ceramics, PCM
Combination with Desalination	simple	simple	simple	Simple
Integration to the Environment	difficult	simple	moderate	Moderate
Operation requirements	demanding	simple	demanding	Simple
Land Requirement	high	low	high	Moderate

Une centrale à tour à énergie solaire est constituée d'un grand nombre de rétroviseurs qui concentrent fortement l'irradiation solaire concentrée sur un absorbeur, appelé récepteur, qui se trouve au sommet de la tour. Le type de focalisation n'est «point focal" ou "concentration ponctuelle". Différentes technologies de récepteur existent et divers fluides de travail ont été appliqués ces dernières années.

Méthode de travail générale: Le récepteur transforme le rayonnement concentré en chaleur et transfère la chaleur à un fluide de travail. Le fluide de travail peut être soit un fluide de transfert de chaleur, qui, en tant que moyen intermédiaire, est utilisé Pour évaporer de l'eau dans une chaudière d'un cycle de vapeur ou le fluide de travail peut être de l'eau et de la vapeur, on parle du cycle direct, qui est ensuite évaporé dans le récepteur. La production d'électricité est le principal Objectif de la technologie de la tour solaire. Les applications secondaires de CSP sont également d'un grand intérêt, comme La production d'hydrogène ou le dessalement de l'eau de mer (en utilisant l'énergie libérée par le condenseur).

Dans cette technologie, on trouve trois types de tour solaire,

- Tour solaire à effet de cheminée.
- Tour solaire réfléchissante.
- Tour solaire a concentration.

- ## Tour solaire à effet de cheminée :

Une tour solaire est une centrale àénergie renouvelable, construite de manière a canaliser l'air chauffe par le soleil afin d'actionner des turbines pour produire de l'électricité. Le colonel Isidore Cabanes en a conçu le premier prototype en 1903. La première centrale à l'échelle a été construite en Espagne (Manzanares) par l'ingénieur allemand Jorg Schlich en 1981.

L'ingénieurfrançais Edgard Nazaré (1914-1998) en a proposé un modèleamélioré dansles années 1950 sous le terme ≪ centrale aérothermique≫ ou ≪ tour a vortex ≫, et sous la formed'une tour métallique (brevet de 1956 et 1964) confinant un cyclone artificiel par différence thermique dont la puissance étaitcapté par des éoliennesencastrées en périphérie de la tour.

Le principe de la cheminée

Les cheminées solaires sont des centrales électriques qui utilisent la force d'un courantd'air ascendant. L'air est chauffé par effet de serre dans un collecteur exposé au soleil. Sa masse volumique baisse et l'air est accélère et amène vers le milieu du collecteur, ou il monte dans la cheminée en passant par des turbines. Celles-ci transforment l'énergie de l'écoulement en énergiemécanique et actionnent des générateurs pour produire de l'électricité.

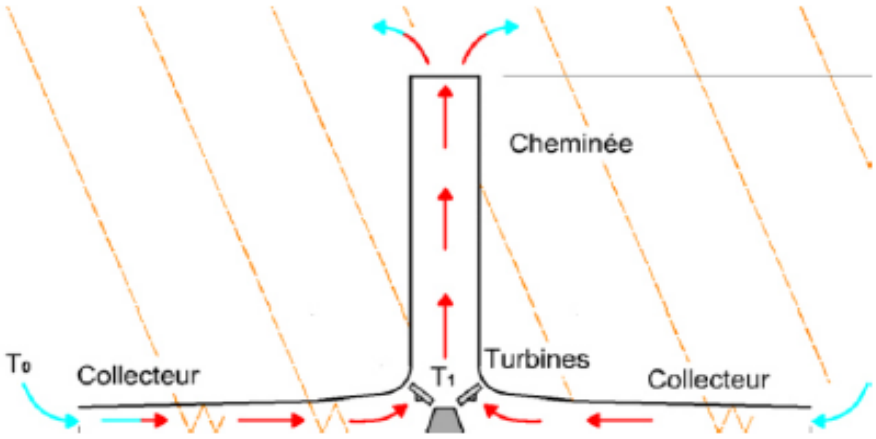


Figure 19 : schéma de principe d'une tour solaire à effet de cheminée

- ## Tour solaire réfléchissante :

Les bases de ce concept, aussi appelé en anglais Reflective Tower, Beam-Down, ou SCOT (pour Solar Concentration Off-Tower), ont été définies dès 1976 [27]. Il consiste à installer un réflecteur hyperboloïde au sommet de la tour pour rediriger le flux solaire concentré vers le pied de la tour, à la manière d'un télescope Cassegrain, comme représenté sur la Figure 2.15.

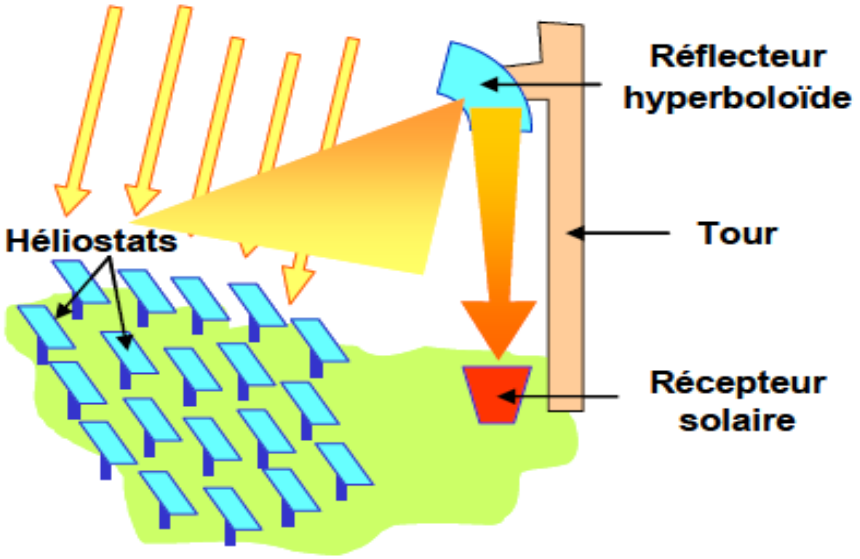


Figure 20 : schéma de principe d'une tour réfléchissante

Malgré d'importantes pertes par réflexion et les faibles concentrations en pied de tour, il présente de nombreux avantages :

- le rendement du récepteur est élevé quelle que soit la configuration du champ, grâce à un faible angle de vue,
- la distribution de flux sur l'absorbeur est stable dans le temps, ce qui permet un contrôle simplifié des héliostats et des températures du récepteur,
- les principaux composants de la centrale sont situés au sol (récepteur, stockage, GTA,…), ce qui permet d'éviter une tour massive et chère ainsi que d'importantes pertes thermique.

- ## Tour solaire a concentration :

D'une superficie pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de mètres carrés, les centrales solaires à tour sont une filière de la solaire thermodynamique.

L'énergie rayonnée par le soleil est transformée en chaleur à température élevée, puis en énergie mécanique (et électrique) à travers un cycle thermodynamique.

Plusieurs centaines ou milliers de miroirs sont positionnés autour d'une tour.
On appelle ces miroirs « héliostats » (en grec : qui fixe le soleil) ; Situés au sol, ces héliostats sont orientables. Les rayons du soleil sont ainsi en permanence réfléchis en direction d'un point unique au sommet de la tour. Le rayonnement solaire est directement concentré sur un absorbeur qui transforme le rayonnement en chaleur à haute température.

Généralement, un fluide caloporteur (des sels fondus) circule au sommet de la tour. Chauffé par les rayons, celui-ci transfère son énergie à un circuit d'eau. La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité.

On caractérise la performance du système par le chiffre de sa « concentration » qui est le rapport de la surface de collecte sur la surface du capteur.

Schéma expliquant le principe de fonctionnement d'une tour solaire :

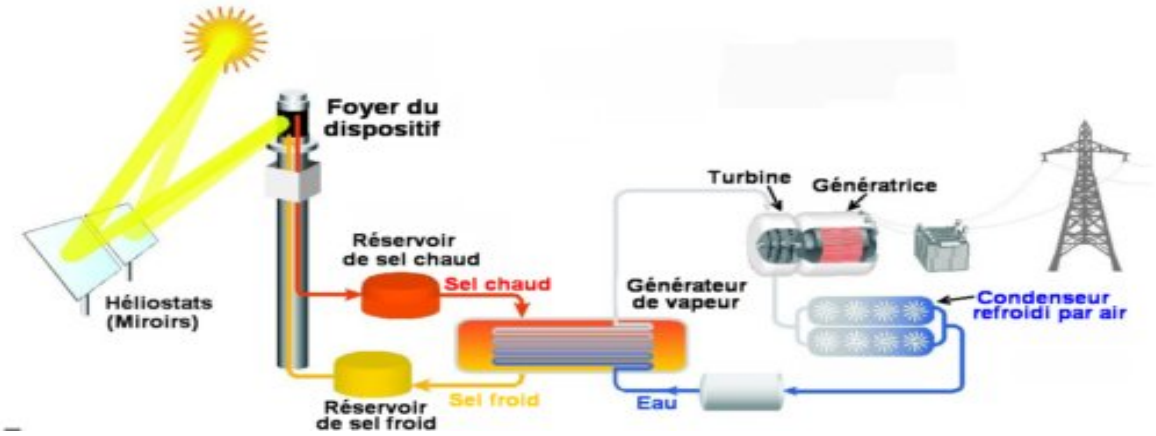


Figure 21 : principe de fonctionnement d'une tour solaire

Les deux types de tour solaire (tour réfléchissante et tour à effet de cheminée), ne seront pas l'objet de notre travail, on s'intéressera beaucoup plus aux tours solaires à concentration qui sont très répandues dans le monde. (iii)

La tour solaire à concentration :

1/ Les éléments intervenants dans l'opération :

Tous les systèmes cités dans la partie précédente sont constitués des mêmes composants ou sous-systèmes, spécifiques aux centrales solaires (concentrateur, récepteur, stockage thermique) ou non (cycles thermodynamiques), dont les caractéristiques vont être détaillées dans cette partie. (I)

1. Les concentrateurs (les héliostats) :

Les héliostats sont des assemblages de miroirs motorisés qui suivent le soleil qui se déplace continument toute la journée en azimut et en élévation de façon à réfléchir ses rayons sur le récepteur solaire.(xi)

- **Un champ d'héliostat**se compose de plusieurs centaines d'héliostats implanté au pied de la tour. Leur fonction est de faire la réflexion de rayonnement solaire capté en le focalisant vers l'entrée du récepteur. L'énergie captée par les héliostats sera donc concentrée en haut de la tour.

Figure 22 : champ d'héliostat

Les héliostats peuvent être classés en série ou en parallèle. Selon le montage des actionneurs, on remarque l'existence de trois types, ce sont :

a) Héliostat de mouvement azimut élévation
b) Héliostat de mouvement aligné cible
c) Héliostat de mouvement parallèle

Tous ces concepts ont été proposés pour la tour d'énergie solaire à échelle d'utilité, et jusqu'à présent, le mouvement azimut-élévation est le concept standard et le seul qui a été mis en œuvre dans des projets plus importants.

- **Les positions de l'héliostat** :

Les héliostats d'une solaire à tour reflètent le rayonnement solaire incident direct sur leur surface de miroir et le concentrent sur un récepteur situé jusqu'à **1 Km** de distance. La surface de la cible du récepteur est faible par rapport à la distance des héliostats, et cela, exige une grande précision sur la forme du miroir et du système de poursuite.

Les charges pendant la phase d'opération, qui définissent le design du mécanisme de poursuite de l'héliostat sont principalement déterminées par les charges dues au vent pendant le fonctionnement. Les charges de tempête pour les héliostats en position « stow »

définissent généralement la conception de la structure. Les fortes charges de tempêtes peuvent être évitées par une position d'arrêt avec le miroir au niveau du sol. Les positions « suivi » et « stow » peuvent être distinguées comme suit :

- **Suivi** : l'angle azimutal et d'élévation de l'héliostat est suivi en fonction de sa position dans le champ et les angles solaires, Pour maintenir l'efficacité optique à des niveaux élevés, les déformations et déviations du système de suivi ne doivent pas dépasser des petites tolérances.
- **Stow** : l'héliostat est situé dans une position « protégée », qui fournit au vent une surface d'attaque minimale. Cette position est prise une fois que la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible en opération. Les charges maximales se produisent à des vitesses de vent élevées, ce qui explique la conception de la structure de telle sorte qu'aucune défaillance totale n'est prévue en cas de tempête.
- **L'angle Héliostat/Récepteur** :

L'angleentre l'héliostat et la tour engendre une modification de la forme de la tache solaire sur la cible ainsi que des pertes supplémentaires dues à l'accroissement des pertes par effet cosinus en comparaison avec un héliostat dans l'axe du récepteur. En effet, les héliostats de centrales solaires à tour ne pointent pas le soleil mais sont orientés de sorte à renvoyer le flux solaire vers le récepteur situé en haut de la tour solaire. Offrant ainsi une surface apparente de miroir inférieur à la surface réelle de miroir. Les pertes par effet cosinus sont calculées à partir de l'angle entre le vecteur normal à l'héliostat et le vecteur solaire.

- **Paramètres influant sur le rendement de l'héliostat :**

Les paramètres influant sur le rendement de l'héliostat dans le flux solaire concentré sur le récepteur sont :

- La hauteur du récepteur.
- La forme des héliostats du champ.
- Les dimensions des héliostats du champ
- La précision de pointage des héliostats
- L'état de surface des héliostats
- La qualité du réglage des facettes des héliostats
- L'angle d'inclinaison de la cible
- Le dénivelé du champ d'héliostats
- La position des héliostats dans le champ
- La position du soleil dans le ciel en fonction de l'heure et du jour de l'étude
- La qualité de l'atmosphère

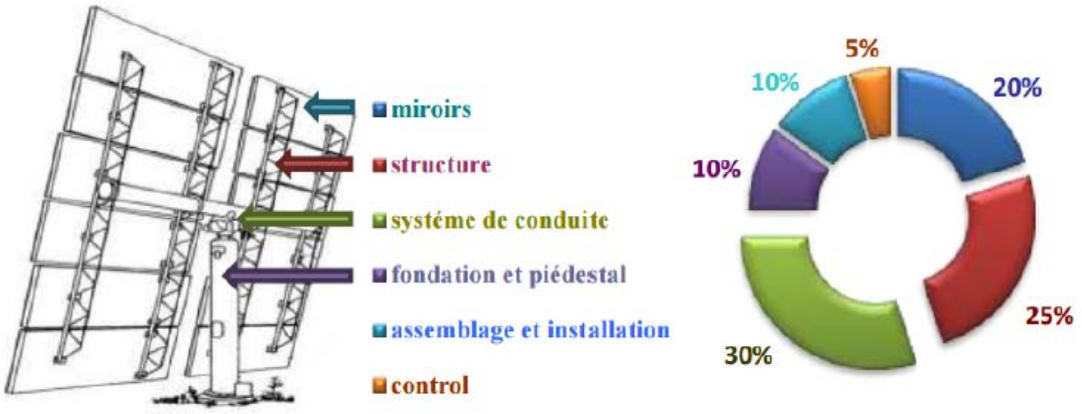


Figure 23 : les principaux paramètres influant sur le rendement de l'héliostat

- **Erreurs des héliostats :**

Ce sont des imperfections de la surface réfléchissante des miroirs qui causent l'élargissement de la tache solaire sur le plan focal d'un concentrateur héliostats tour. Elles se devisent en quatre grandes catégories :

- **Les erreurs de pointage :** sont issues des erreurs dues aux actionneurs, d'une part à cause du jeu dans les moteurs, et d'autre part, à cause du temps de rafraichissement des calculs de position effectués à un intervalle de quelques secondes.ces erreurs entrainent un décalage du centre de la tache par rapport à son point de visée théorique (le centre du récepteur)
- **Les erreurs de réglage** des miroirs sont commises au montage des modules qui constituent la surface réflectrice de l'héliostat.
- **Les erreurs de courbure** reflètent les approximations sur la focale des facettes des héliostats.
- **Les erreurs microscopiques** sont dues aux imperfections de la surface du miroir, parfois appelées ondulations.

Dans l'implantation des héliostats, il est impératif d'éviter toutes sortes de blocage, c'est-à-dire, il y'a une distance minimale entre deux héliostats à respecter, comme la figure suivante le montre

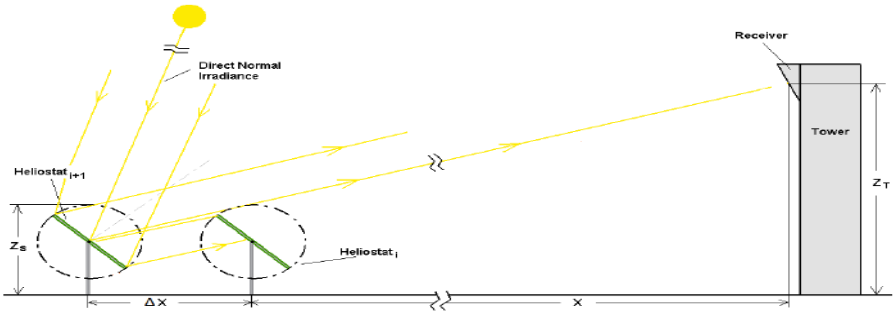


Figure24 : installation fausse

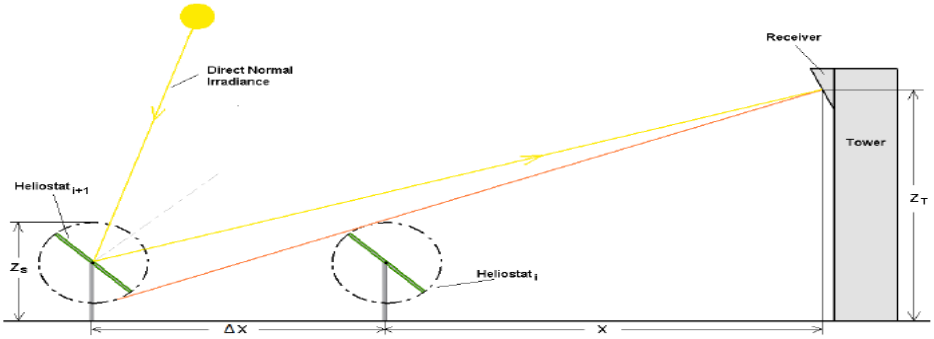


Figure25 : installation correcte

Le tableau suivant montre les différentes pertes :

Effets de perte des héliostats	Symbole	Valeur typique
Blocage	$R_{B.S}$	**0.98…0.99**
cosinus	R_C	**0.70…0.95**
erreurs de surface et des inexactitudes de suivi	R_F	**0.90…0.99**
Charge du vent et mouvement de la tour	$R_{W.T}$	**0.93…0.97**
Réflexion	R_R	**0.80…0.95**
Taux de défaut Héliostat	R_{FAIL}	**0.98…1.00**

On donne l'équation l'efficacité globale du champ de l'héliostat par :

$$R_{SF} = R_{B.S} * R_C * R_F * R_{W.T} * R_R * R_{FAIL}$$

Les valeurs typiques de l'efficacité des champs d'héliostat se situent dans la gamme des :

($0.55<R_{SF}<0.80$)

Le champ d'héliostat reflète et dirige une puissance de rayonnement utilisable au destinataire, qui est calculée avec l'équation suivante :

$$Q_{use.SF} = A_{SF} * R_{SF} * G_D \quad (W) \quad \text{(vii)}$$

Ou : A_{SF} : la surface total du champ d'héliostat (m^2)
R_{SF} : rendement des héliostats
G_D : l'irradiation normal direct (W/m^2)

L'efficacité de chaque héliostat dépend de son implantation, comme la figure le montre, le rendement diminue a chaque fois qu'on s'éloigne de la tour,

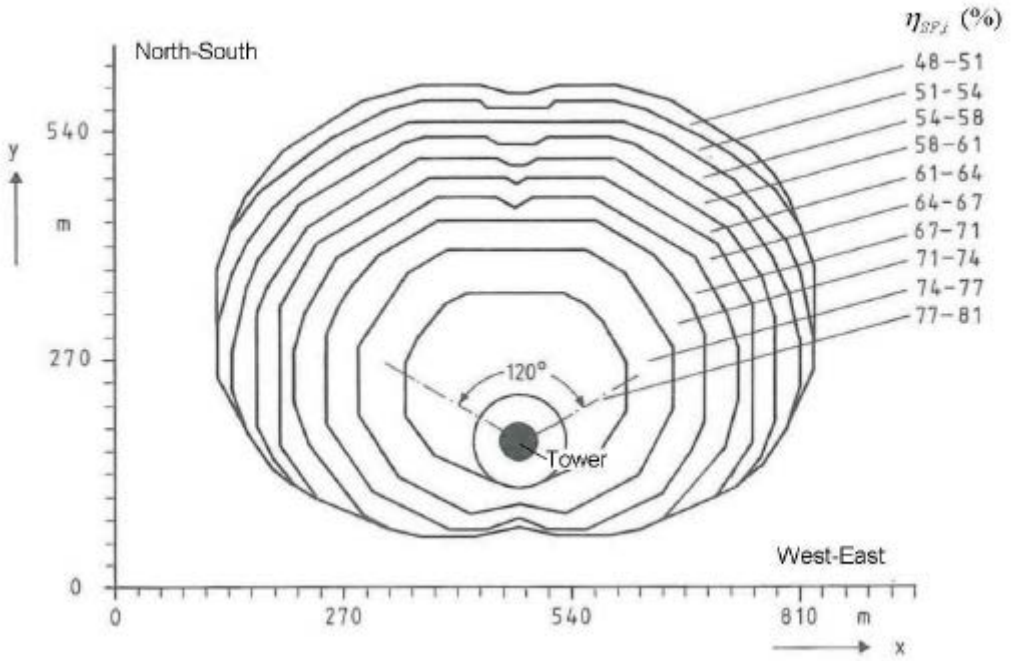


Figure 26 : rendement des héliostats en fonction de leurs positions

2. Le récepteur (l'absorbeur) :

On désigne par solaire thermodynamique, l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celles-ci en énergie mécanique et électrique à travers un cycle thermodynamique. Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre **200°C** et **2000°C**, avec un rendement supérieur à **70%.** Cette chaleur primaire peut ensuite être utilisée dans des procédés de transformation ou de synthèse de matériaux ou bien être convertie en vecteur énergétique comme l'électricité ou l'hydrogène.

Ces techniques sont encore, pour l'essentiel, dans un état expérimental.

La centrale solaire à tour est constituée de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. L'avantage de cette technologie est que les pertes à l'ambiance sont inférieures car la surface exposée est limitée.

2/ Principe de concentration :

Pour transformer le rayonnement solaire en chaleur, il suffit en principe de le réceptionner sur une plaque noire. Mais, un tel capteur, même s'il est parfaitement absorbant, il doit supporter les pertes que son propre échauffement qui provoque au profit de l'air ambiant. Ces pertes sont en premières approximation proportionnelle à cet échauffement et à la surface développée.

Pour travailler à température élevée, ce qui est nécessaire pour alimenter un cycle thermodynamique performant, il faut diminuer fortement la surface de réception pour maintenir en proportion, ces pertes à un niveau raisonnable. C'est ce que l'on fait en disposant devant le récepteur des miroirs <héliostats>qui concentrent **sur** celui-ci le rayonnement capté sur une surface bien supérieure. On caractérise la performance du système par le chiffre de sa concentration qui est le rapport de la surface de collecte sur la surface du capteur.

CC(performance) = la surface de collecte / la surface du capteur

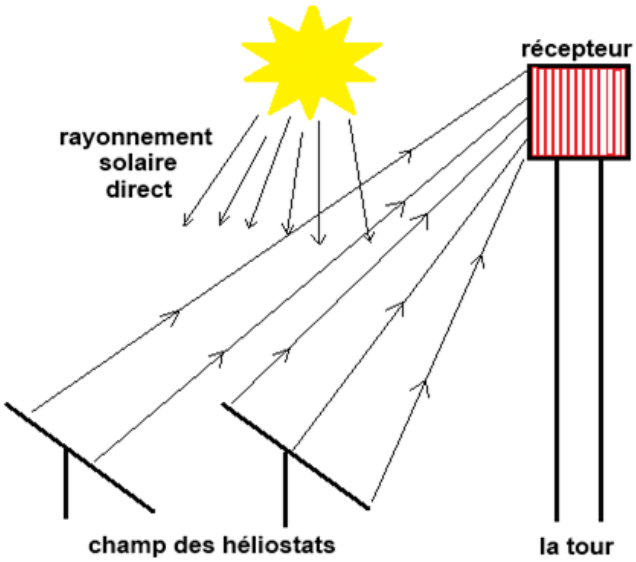


Figure 27 : principe de concentration

Toute installation des centrales solaires à tour doit remplir les mêmes fonctions pour transformer l'énergie du rayonnement incident en énergie électrique avec la meilleure efficacité possible. On les examine ci-après dans l'ordre suivant :

- La concentration du rayonnement sur l'entrée du récepteur.
- Son absorption sur les parois du récepteur et la transformation de son énergie en chaleur.
- Le transport et éventuellement le stockage de cette chaleur.
- Sa délivrance à un cycle thermodynamique associé à un alternateur pour la production d'électricité.

Le récepteur est le composant qui doit convertir la lumière du soleil en chaleur fournie au milieu de transfert. Il est exposé aux conditions environnementales dures (gradients de la température, poussière, pluie, humidité…).

Etude thermique du récepteur :

Ce travail consiste à modéliser deux types d'absorbeur (récepteur à air, récepteur à eau) ;

Une centrale solaire thermique emploie l'énergie de la lumière du soleil ; puis la convertit en chaleur et puis en électricité au moyen d'un processus thermodynamique. Par conséquent, l'absorbeur est chauffé par l'énergie déposée par la lumière du soleil, cette énergie calorifique doit être extraite pour actionner le cycle de conversion.

En termes de flux, le bilan énergétique est :

$$Q_{sol} + Q_{pro} + Q_{amb} + Q_{per} = 0 \qquad \textbf{(ii)}$$

- Q_{sol} : le flux d'énergie solaire
- Q_{pro} : le flux fourni au processus
- Q_{amb} : le flux provenant de l'ambiant
- Q_{per} : les processus de perte

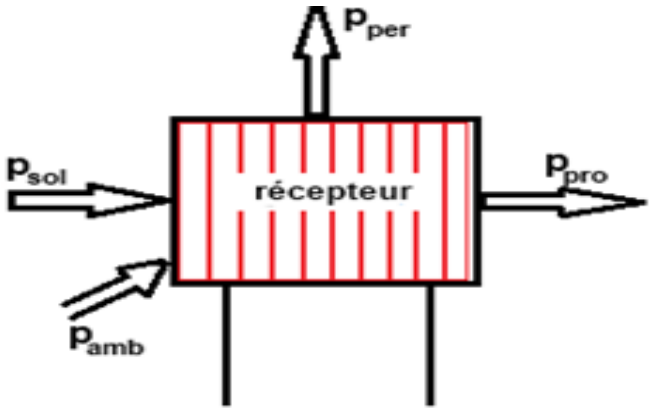


Figure28 : bilan énergétique pour un absorbeur chauffé par la lumière solaire

Etude thermique d'un capteur solaire à eau :

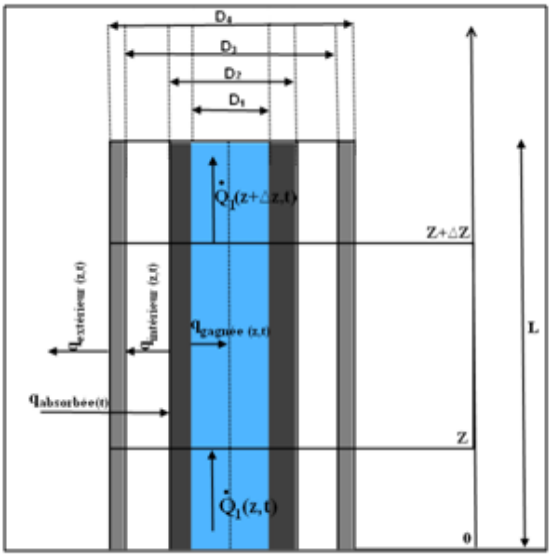


Figure : schéma de bilan thermique

On commence par l'étudedubilan énergétique thermique du fluide caloporteur (**eau**), qui nous amène à résoudre une équation a différentiel partiel de température ; la distance le long du tube absorbeur est notée par **Z**,

a/ . Le transfert thermique à l'environnement du au rayonnement peut s'exprimer par :

$$\mathbf{q_{extérieur,rayonnement} = \varepsilon\sigma\pi D_4\left(T_3^4 - T_{amb}^4\right)}$$

- **ε**: L'émissivité de verre du couvert
- **σ** : Coefficient de Stefan Boltzmann
- **T_3** : température de tube de verre

b/. transfert thermique entre l'absorbeur et l'enveloppe du verre

$$\mathbf{q_{intérieur\ ,rayonnement} = \frac{\sigma\pi D_2\left(T_2^4 - T_3^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\left(\frac{D_2}{D_3}\right)}}$$

- **E_{abs}** : l'émissivité de l'absorbeur, elle dépend de sa température.
- **T_2** : température de l'absorbeur.

c/. Transfert thermique entre l'absorbeur et l'eau :

$$\mathbf{q_{gagnée} = h_1\pi D_1(T_2 - T_1)}$$

h_1 : coefficient de transfert de chaleur à l'intérieur de l'absorbeur.

T_1 : température de l'eau.

Etude thermique d'un capteur solaire à air :

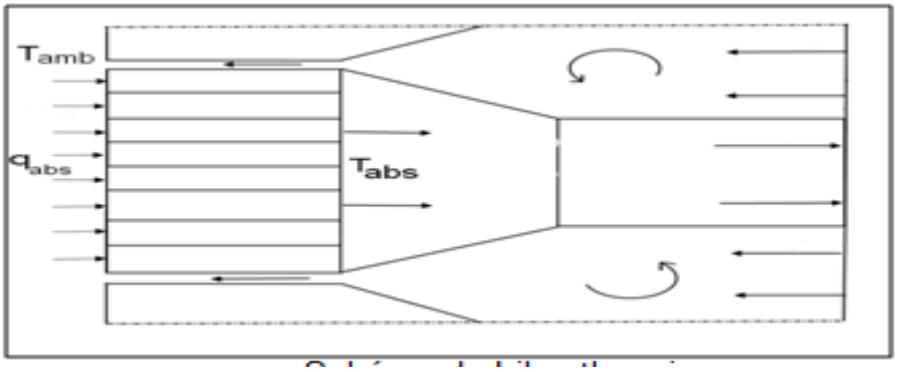


Figure 29 : schéma de bilan thermique

Les transferts de chaleur sont principalement par rayonnement et la convection et peuvent être écrits sous une forme simplifiée comme suit ;

$$\mathbf{q_{absorbé} = \varepsilon\sigma T^4_{absorbé} + h(T_{absorbé} - T_{amb})} \quad \textbf{(iii)}$$

- **ε :** Coefficient d'émissivité du matériau d'absorbeur
- **σ :** Constante de Stefan Boltzmann
- **h :** Coefficient de transfert de chaleur par convection

<u>La partie simulation nous permettra de comparer entre les deux types de récepteurs,</u>

3. Les sels fondus : fluide caloporteur

Un fluide caloporteur (lit. porte-chaleur) est un fluide chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Le terme « caloporteur » est synonyme de « caloriporteur ».

Ces fluides interviennent dans les échangeurs de chaleur, par exemple les systèmes de refroidissement des moteurs thermiques (tel un moteur de voiture), les réfrigérateurs, les chaudières, les climatiseurs, les capteurs solaires thermiques, les radiateurs des circuits électriques (cas des transformateurs électriques de forte puissance) ou électroniques, les centrales électriques thermiques au charbon, au fioul, au gaz ou nucléaires, les échangeurs de chaleur d'eaux usées.

Chaque fluide caloporteur est choisi en fonction de ses propriétés physico-chimiques, telles la viscosité, la capacité thermique volumique, la chaleur latente de vaporisation (ou de liquéfaction) en cas de changement de phase, la conductivité thermique, les propriétés anticorrosives, son coût et il doit être assez inoffensif pour le milieu.

On utilise fréquemment les sels fondus comme fluide caloporteur,

Dans la partie simulation thermoptim, on s'est contenté d'éliminer les sels fondus, comme fluide caloporteur, et de travailler avec l'eau directement, sans intermédiaire.

4. Turbines à vapeur :

Les cycles des turbines à vapeur utilisent un fluide compressible, qui change d'état au cours du cycle. Le changement d'état de la vapeurgénère des variations importantes de l'enthalpiequi permet de transformerde grandes quantités de chaleur en travail. Dans une turbine la vapeur estdétendue de façon continue dans un système de roues à aubes. Cette propriétépermet de fonctionner avec des débits importants et de pousser la détentesans l'effet de troncature, comme dans les machines alternatives.

Cycle théorique d'une machine à vapeur : cycle de Rankine

Le cycle de base d'une turbine à vapeur (cycle théorique comportant un changement d'état) est un cycle de Rankine qui se déroule totalement en vapeur humide. Ce cycle comporte :

1. deux isobares (changement d'état isotherme)
2. deux adiabatiques ;

C'est un cycle de Carnot (rectangle dans le diagramme (T □S)), appliqué aux vapeurs condensables :

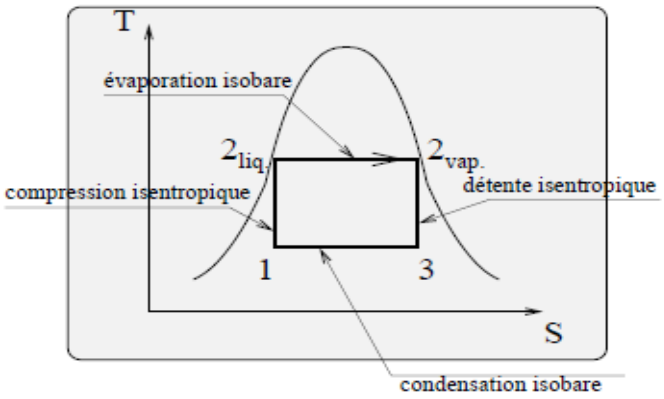


Figure 30: cycle de RANKINE en vapeur humide

Les éléments constitutifs d'une machine à vapeur :

- une chaudière.
- Une turbine.
- Un condenseur.
- Une pompe de circulation.

Remarque :

Pratiquement, ce cycle est difficilement réalisable car :

-Il est difficile de comprimer de façon isentropique un mélange à deux phases ($1 \rightarrow 2_{liq}$) ;

-il est difficile de contrôler la condensation ($3 \rightarrow 1$) pour parvenir précisément au point 1 (titre de vapeur $0<X_1<1$) ;

-les ailettes de la turbine risquent d'être rapidement érodées par les gouttelettes liquide qui apparaissent lors de la détente.

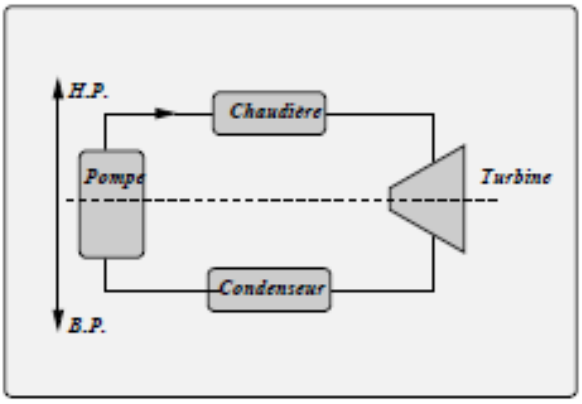


Figure 31 : cycle d'une turbine à vapeur

Remarque :

De plus le cycle réel doit vérifier les propriétés suivantes :

1. La surface du cycle dans le diagramme (**T –S**) doit être maximale. Cette surface représente le bilan de la chaleur échangée, soit le travail total : $\mathbf{W_{det} + W_{comp}}$;
2. Le travail de compression doit être minimal.

Dans le cycle réel, la vapeur humide issue de la turbine est totalement condensée (déplacement du point $1 \rightarrow 1_{liq}$). Le liquide subit une compression isentropique jusqu'à la pression de vaporisation (point 2), puis est vaporisé à pression constante jusqu'au point 2_{liq}.

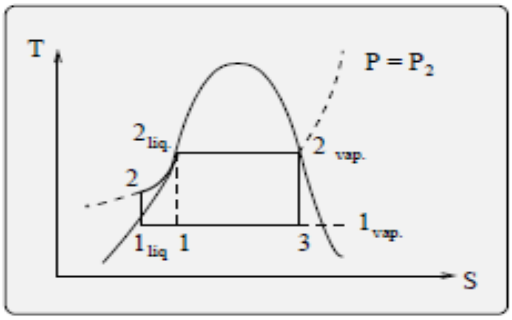


Figure32 : cycle réel de RANKINE.

Remarque :

Dans ces conditions, le travail W_{comp}est très faible devant W_{det}, car la compression d'un liquide incompressible demande peu d'énergie. Ce n'est pas le cas pour les gaz dont le volume massique es beaucoup plus élevé.

Cycle de RANKINE : bilan énergétique

- **Chaudière** $q_{chaud} = h_{2vap} - h_2$
- **Condenseur** $q_{cond} = h_{1liq} - h_3$
- **Pompe** $w_{pomp} = h_2 - h_{1liq}$
- **Turbine** $w_{turb} = h_3 - h_{2vap}$

D'après le premier principe :

$$q_{chaud} + q_{cond} + w_{pomp} + w_{turb} = 0$$

Chapitre 3 :

1/. Simulation des cycles thermodynamiques avec thermoptim

1.1/ Présentation du logiciel :

Le progiciel Thermoptim fournit un environnement de modélisation intégrant de manière profondément interconnectée un éditeur de schémas / écran synoptiquedes diagrammes interactifs , des fonctions de simulation et une méthode d'optimisation basée sur la méthode dupincement. Son objectif est double : faciliter et sécuriser la modélisation des technologies de conversion de l'énergie.

1.2/ La simulation :

Dans cette partie, on a simulé les différents cycles thermodynamiques les plus fréquents dans les industries géantes, pour pouvoir les comparer par rapport a leurs efficacités,

Remarque : pour les données IMPUTS du logiciel, on a pris les résultats fournis du logiciel TRNSYS, on tient à préciser que le composant solaire est considéré comme chaudière pour alimenter le cycle thermodynamique.

le logiciel nous donne à la fin deux tableaux, le premier contenant toute les données de chaque point du cycle, et le deuxième nous donne l'énergie utile et payante et aussi l'efficacité qui est le rapport entre les deux.

L'efficacité du cycle est le rapport de l'énergie utile sur l'énergie payante

1. **Cycle de base de RANKINE :**

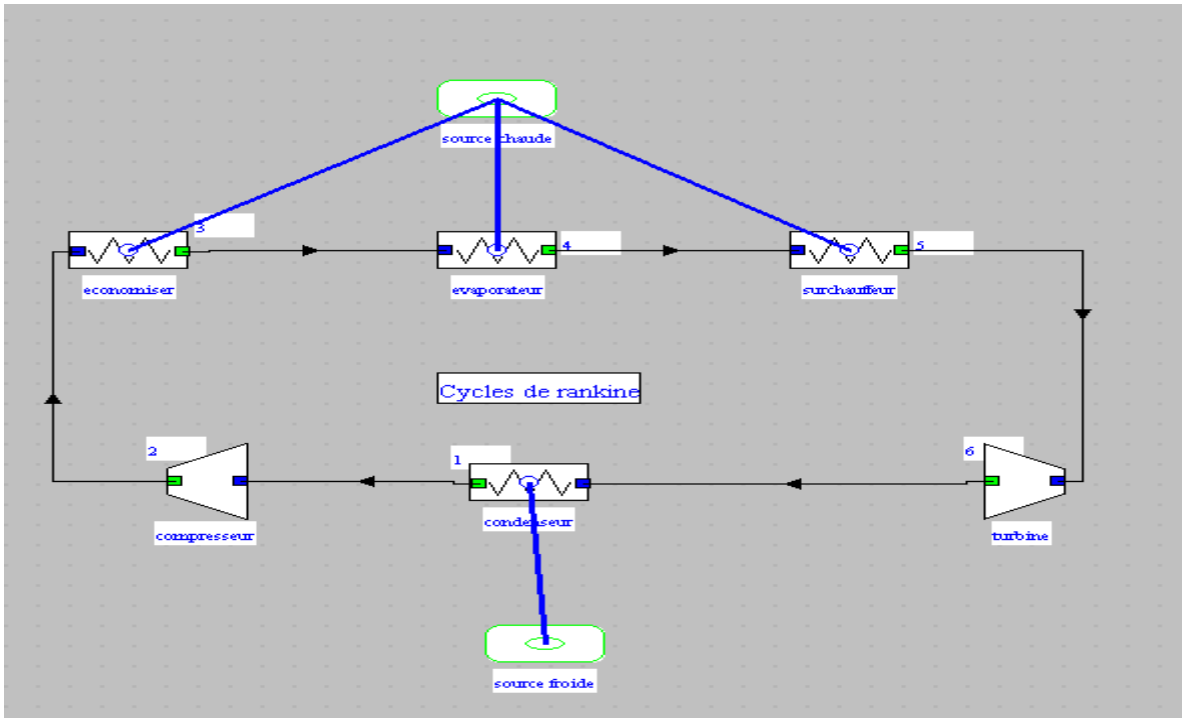


Figure 33 : schéma de simulation du cycle de RANKINE.

Le tableau :

nom	nom corps	T (°C)	P (bar)	titre	h (kJ/kg)	s (kJ/kg/K)
1	Eau	19,74	0,026	0	82,87	1,023545
2	Eau	19,89	157	0	97,75	3,635487
3	Eau	346,21	157	1	1643,2	3,986571
4	Eau	346,21	157	1	2564,2	4,325641
5	Eau	530,75	157	1	3457,32	6,328854
6	Eau	20,21	0,026	0,793	2129,21	0,732564

Tableau 1 : tableau récapitulatif des points du cycle de rankine

ET LE BILAN :

efficacité	énergie payante	énergie utile
0,36179	3782,25	1398,66

2. Cycles à vapeur surchauffée cycle de HIRN :

Dans le cycle à surchauffe, on utilise une source chaude à plus haute température puisque la température de la source chaude est alors supérieure a la température critique. Cela amène à effectuer le changement de phase à une température inférieure à la température critique puis à surchauffer la vapeur à une température supérieure à celle de l'équilibre liquide-vapeur. Ce cycle à vapeur surchauffée possède deux avantages essentiels par rapport au cycle de base de RANKINE :

- La surchauffe augmente la température d'utilisation d'une partie de la chaleur de la source chaude.
- La surchauffe permet d'effectuer un cycle sec (pas de vapeur humide dans la machine motrice), si la surchauffe à été choisie de telle sorte qu'en fin de détente on se trouve sur la courbe vapeur saturante à la température du condenseur.

La méthode d'obtenir de la vapeur surchauffée est d'envoyer la vapeur sèche en sortie de générateur de vapeur dans un surchauffeur ou la vapeur est portée, à pression constante, à une température plus élevée.

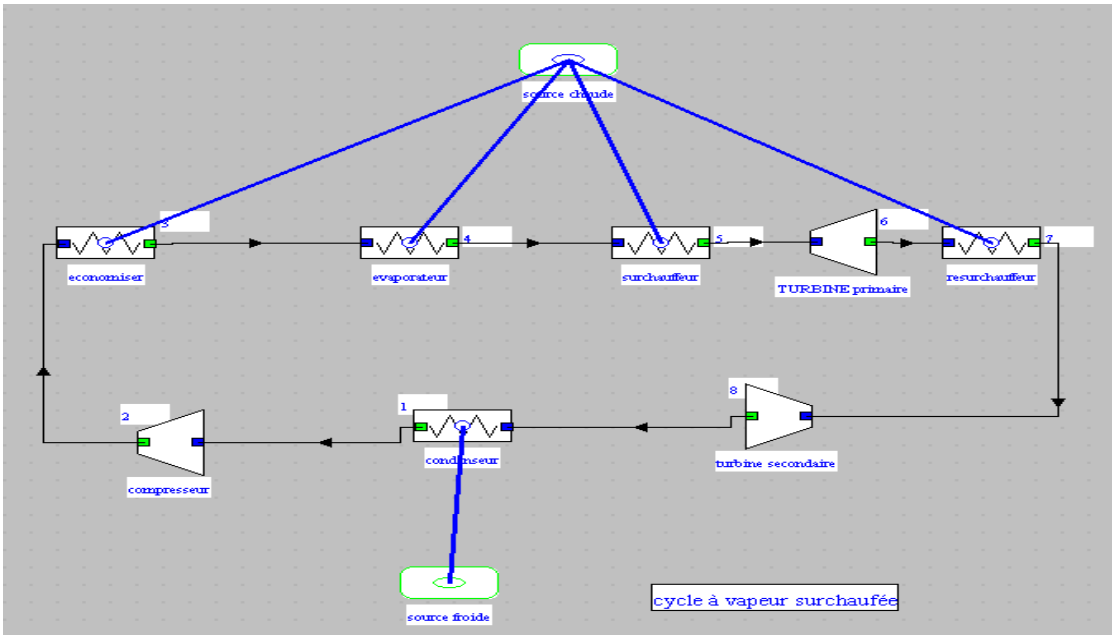


Figure34 : schéma du Cycle de vapeur surchauffée dans thermoptim

Le tableau :

nom	nom corps	T (°C)	P (bar)	titre	h (kJ/kg)	s (kJ/kg/K)
1	eau	20,12	0,023	0	82,75	0,39298677
2	eau	21,85	165	0	99,3	3,2480233
3	eau	346,46	165	1	1678,2	3,2480233
4	eau	346,21	165	1	2568,14	3,2480233
5	eau	550,36	165	1	3451,32	5,80725286
6	eau	217,32	10	1	2843,21	0,39298677
7	eau	550,75	10	1	3620,14	4,259872
8	eau	20,12	0,023	0,9178	2517,88	1,895693

Tableau 2 : tableau récapulatif des données du cycle à vapeur surchauffée

Bilan

efficacité	énergie payante	énergie utile
0,42811	3987,23	1724,99

Comparaison entre les différents cucles thermodynamique :

cycle thermodynamique	cycle de RANKINE	cycle à vapeur surchauffée	cycle à vapeur surchauffée	cycle à vapeur a régénération	cycle supercritique à vapeur	cycle moteur à vapeur et a contre pression
Efficacité	0,36179	0,42811	0,44681	0,61774	0,66174	1

Tableau 3: tableau comparatif entres les différents cycles thermodynamique.

Remarque :

Avec les cycles a vapeur, le rendement est toujours inférieur à 0,6, ce qui signifie que presque la moitié de l'énergie primaire est perdue, or, il est possible de valoriser tout ou partie de la chaleur rejetée à la source froide, c'est la cogénération dans laquelle on génère de l'électricité et de la chaleur à moyenne température.

Ce qui est le cas dans le cycle moteur à vapeur et à contre pression.

2/ Simulation d'une tour solaire à concentration :

Résumé : Le présent travail a pour objectif la simulation d'une centrale solaire thermodynamique à tour, ce type de centrales disposent tout un champ solaire afin d'assurer l'énergie thermique nécessaire pour le fonctionnement du bloc de puissance (turbine à vapeur), alors le champ des Héliostats réoriente le rayonnement solaire direct vers un récepteur situé au sommet d'une tour. Nous avons simulé cette centrale pour la région de TAMMENRASSET, ou les données radiométrique et météorologiques sont issue directement du logiciel **METEONORM 7**. La simulation des performances énergétiques est effectuée par le logiciel **SAM** (**SYSTEM ADVISOR MODEL**).

L'énergie solaire qui utilise les centralesCSP est mesurée comme l'irradiance directe normale (**DNI**), qui est l'énergie reçue sur une surface suivi perpendiculaire aux rayons du soleil. Elle peut être mesurée avec un pyrheliométer.

Un **pyrhéliomètre** est un instrument destiné à mesurer l'irradiance solaire directe. Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi pointé vers le Soleil. Ainsi cet instrument ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil, à l'exclusion de celui issu du ciel ou de la Terre.

La lumière du Soleil pénètre dans l'instrument par une fenêtre et est ensuite dirigée sur la thermopile qui convertit la chaleur en un signal électrique qui est enregistré. Celui-ci est ensuite converti en une mesure équivalente exprimée en watts par mètre carré.

En Algérie, plusieurs sites identifiés pour accueillir des centrale CSP (zones considérées les plus aptes à y recevoir), sont les sites de Naama, Bechar, Adrar et Tamanrasset.

Une centrale solaire à tour consiste en un champ de réflecteurs de poursuite à deux axes (héliostats) qui concentrent la lumière sur un récepteur central situé en haut de la tour. Le fluide actif se trouvant dans le récepteur est chauffféà 500-1000°C, puis utilisé comme source de chaleur pour un système de production ou de stockage d'énergie.
Les technologies des tours solaires définies par le fluide de transfert (caloporteur) et le cycle de conversion thermodynamique utilisé. La disponibilité d'un stockage thermique de forte capacité est un élément majeur à prendre en considération pour évaluer les différentes technologies.

2.1/ Description du travail effectué :

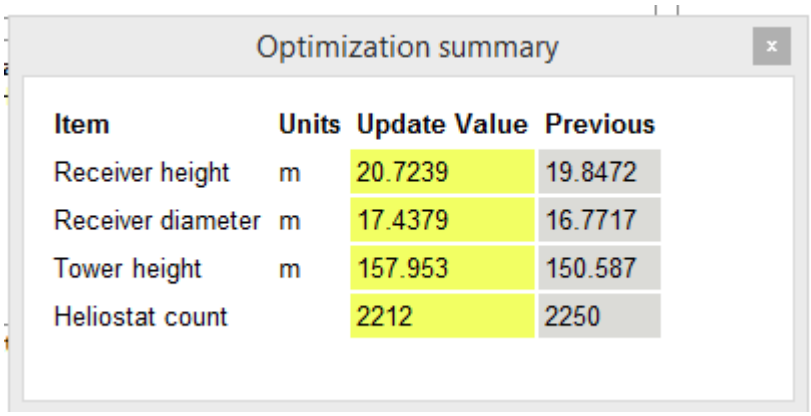
Nous avons utilisé le logiciel SAM pour la simulation d'une centrale solaire à tour, dont l fluide qui circule dans le récepteur est la vapeur sans stockage thermique. L'installation est fonctionnée seulement lorsque le soleil est présent.

Pour les données météorologiques, on a utilisé les données métronome de la région de Tamanrasset, la région située à l'extrême sud du Sahara algérien,

On propose ces caractéristiques :

- **Hauteur de la tour : 157.72 m**
- **Hauteur du récepteur : 20.72 m**
- **Diamètre du récepteur : 17.43 m**
- **Hauteur de la chaudière:9.07 m**
- **Hauteur de la surchauffeur :7.37 m**

- **Hauteur du réchauffeur : 4.26 m**
- **Champ des héliostats : envergure = 148 m**

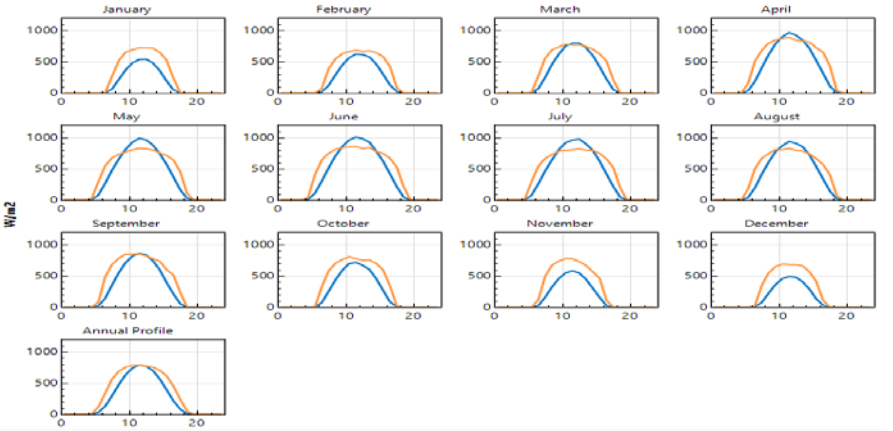


Optimization summary

Item	Units	Update Value	Previous
Receiver height	m	20.7239	19.8472
Receiver diameter	m	17.4379	16.7717
Tower height	m	157.953	150.587
Heliostat count		2212	2250

Rayonnement direct :

Les deux figures montrent l'allure et les valeurs du rayonnement solaire direct pour chaque mois de janvier à décembre ainsi que la moyenne annuelle ;



Geographic site parameters for Tamanrasset_MN71mod.SIT (under

Geographical Coordinates | Météo mensuelle | Carte intéractive

Site Tamanrasset (Algérie)

Source des donn MeteoNorm 7.1 station (modified by user)

	Irrad. Glob. kWh/m².ms	Diffus kWh/m².ms	Tempér. °C	Vit. vent m/s
Janvier	157.5	30.2	13.0	3.09
Février	167.2	32.6	15.5	3.39
Mars	221.5	35.0	19.6	3.90
Avril	229.9	50.9	23.9	4.20
Mai	239.0	55.7	27.8	4.40
Juin	221.8	58.8	29.1	4.10
Juillet	239.8	57.6	30.1	4.40
Août	219.8	62.0	29.4	3.79
Septembre	197.7	54.6	27.6	3.59
Octobre	182.7	47.3	23.8	3.40
Novembre	158.4	33.5	17.9	2.59
Décembre	147.1	33.5	14.8	2.50
Année	**2382.4**	**551.7**	**22.7**	**3.6**

Figure 35 : rayonnement direct mensuel et annuel

SAM fait des prédictions de performance et le cout des estimations d'énergie pour les projets de centrales raccordées au réseau basés sur les couts d'installation et de fonctionnement et les paramètres de conception du système que vous spécifiez comme intrants pour le modèle ;

Le logiciel SAM, nous permet d'avoir une distribution optimale des héliostats autour de la tour, cette distribution qui joue un rôle très important afin de maximiser le rendement des concentrateurs ;

Cette distribution des concentrateurs est en fonction de leur géométrie ainsi que par rapport à la hauteur et le diamètre du récepteur ; dans notre cas étudié, nous avons choisie le modèle d'Héliostats **ATS H150** d'une superficie de **148 m^2** ; le nombre des Héliostats calculé selon la puissance électrique net demandée est de **1135** en circule autour du récepteur.La figure ci-dessous montre la Mapp de distribution :

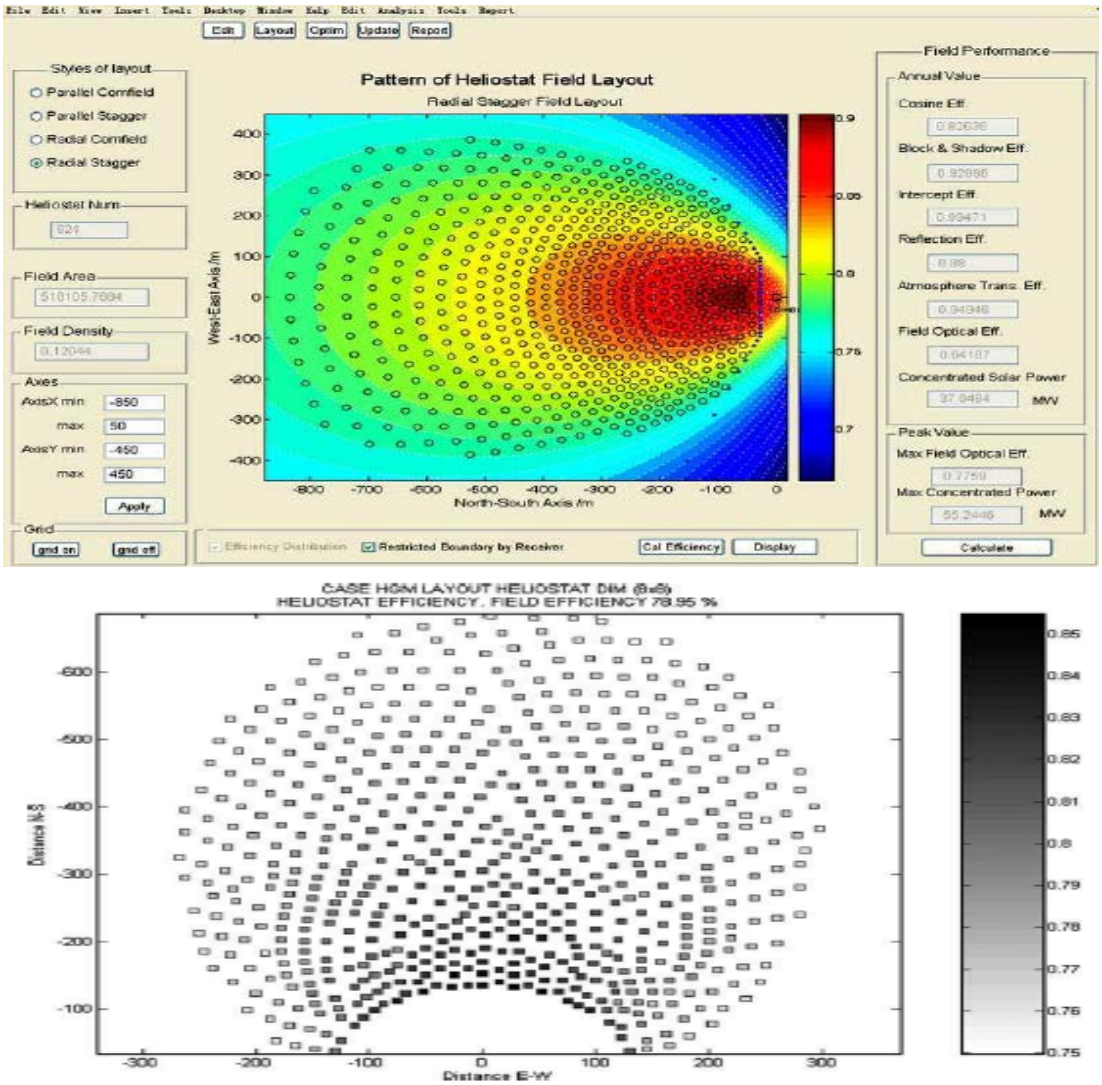


Figure 36 : Mapp de distribution des Héliostats

Ces deux figures montrent que le champ solaire concentré par les Héliostats est devisé en sections réparties uniformément d'un cercle appelés zones ; les lignes de la table de zones précisent la position radiale de chaque zone par rapport à la tour.

La zone la plus proche de la tour se voit attribuer un maximum de réflexion, cette dernière se diminue au fur et à mesure en s'éloignant de la tour.

Remarque : le nombre d'héliostats délivré par le logiciel SAM est une valeur non entière, car il convertit la valeur d'une zone de surface de miroir pour chaque zone qui est équivalente à la surface totale en miroir de l'ensemble de la zone héliostats.

2.2/ Discussion des résultats délivrés par le logiciel SAM :

1. Energie thermique absorbée :

La figure ci-dessous montre la variation de la puissance absorbée par le récepteur, on a tracé la moyenne mensuelle ainsi que la moyenne annuelle comme montre la figure, la valeur de la puissance absorbée par le récepteur est maximale au midi solaire qui atteint **60 MWH**.

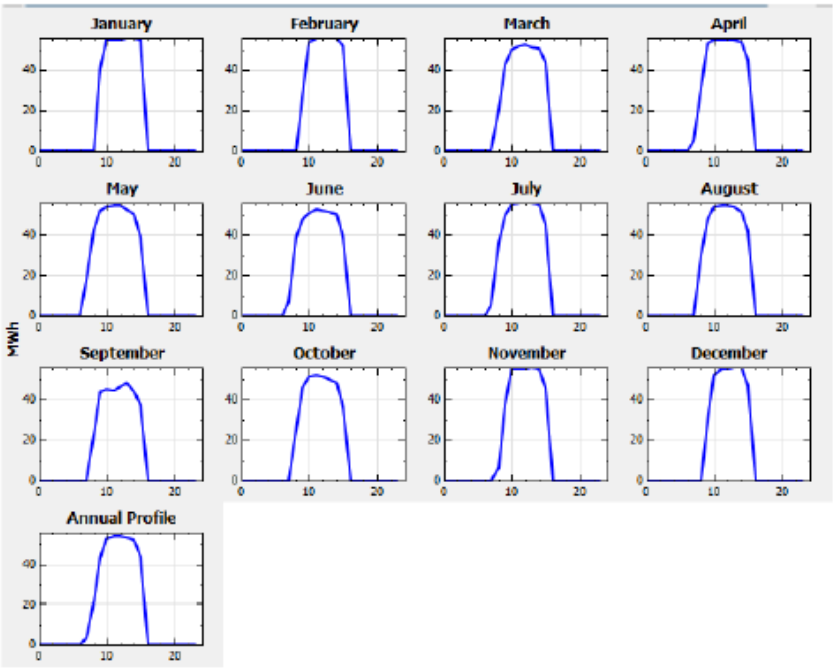


Figure37 : énergie thermique absorbée du récepteur

2. Efficacité du récepteur :

Dans la centrale à tour, l'efficacité du récepteur est liée directement au rayonnement et la température ambiante, au couché et levé du soleil, l'efficacité est nulle à cause de l'absence de rayonnement solaire, mais cette efficacité atteint une valeur maximale de **80 %** au midi solaire.

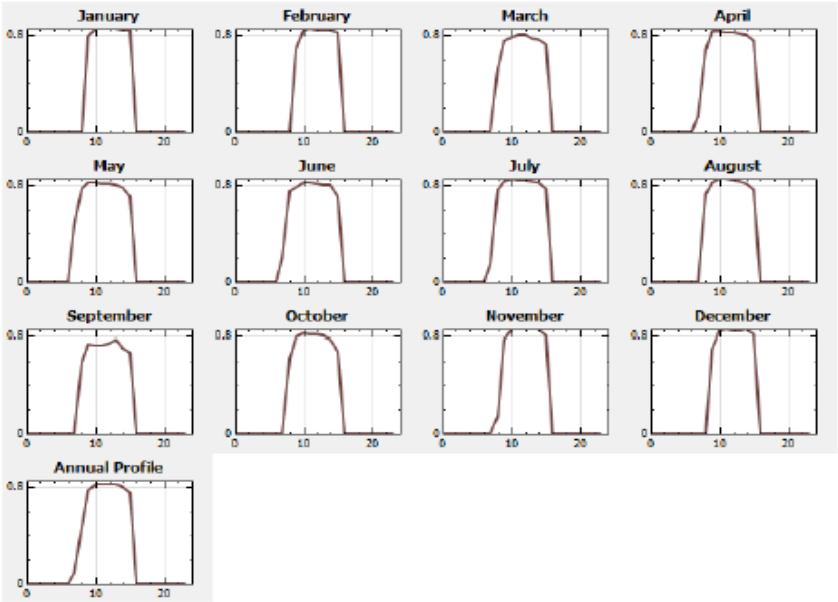


Figure38 :efficacité du récepteur

3. La puissance nette produite :

La figure suivante représente l'allure de la puissance nette produite par la turbine à vapeur pendant le jour type pour chaque moi ainsi pour la moyenne annuelle.

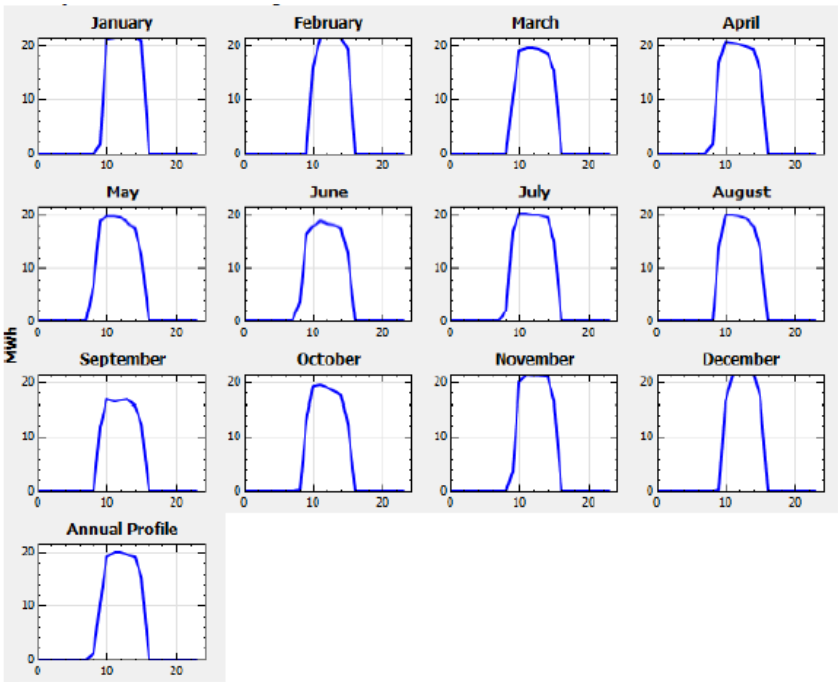


Figure 39 : puissance nette produite

4. Consommation en énergie pour les héliostats :

Dans une centrale à tour, chaque héliostat est équipé d'un moteur électrique ou bien des vérins hydrauliques commandés par des programmes afin de poursuivre le soleil en élévation et en azimut, pour réfléchir les rayons solaires à la cible qui est le récepteur afin de chauffer le fluide caloporteur,

Dans notre cas étudié, l'héliostat avec une surface de **148 m^2** qui pèse**5000 kg** nécessite des puissances non négligeables notamment au démarragecomme la figure ci-dessous le montre :

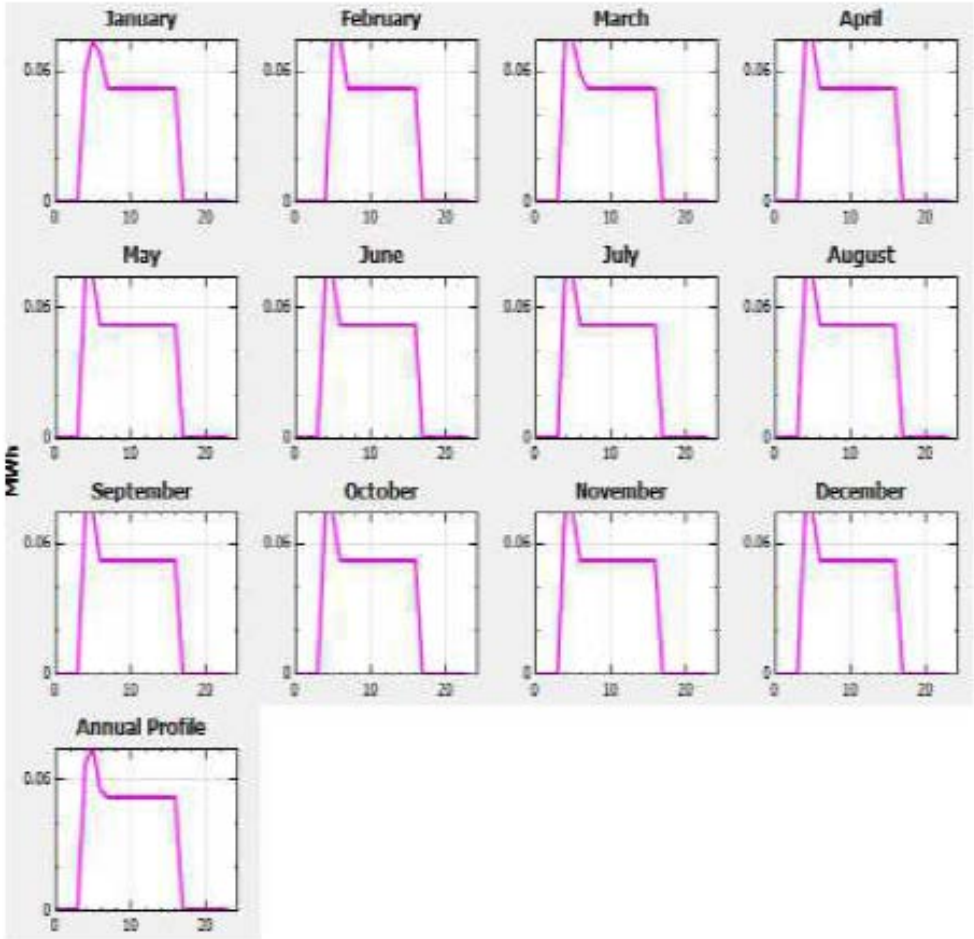


Figure 40 : consommation d'énergie par un héliostat

2.3/ Conclusion :

L'objectif consiste à la prédiction des performances d'une centrale solaire à tour par SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL),

On a appliqué l'étude pour la zone de TAMMENRASSET qui représente une zone saharienne aride, ou le climat est adaptable pour les applications solaires à concentration.

Les résultats obtenus montrent plusieurs freins empêchant l'exploitation des centrales solaires à tour à cause du cout d'investissement qui est très élevé, notamment les champs des héliostats (50% du prix de la centrale). Donc il faut mener les recherches afin de trouver des solutions efficaces sur le plan économique.

3/ Simulation des deux types de récepteur sous TRNSYS :

3.1/ Présentation du logiciel :

Le logiciel de simulation **TRNSYS<transient system simulation tool**>, est un environnement complet et extensible, conçu pour simuler le comportement des systèmes transitoires. Bien que la grande majorité des simulations soient axée sur l'évaluation des performances des systèmes d'énergie thermique et électrique, TRNSYS peut également être utilisé pour modéliser d'autres systèmes dynamiques tels que les flux de trafic ou les processus biologiques.

La bibliothèque**STEC<solar thermal electric components >,** est une collection de modèles TRNSYS spécialement développée pour simuler la production d'électricité solaire thermique. Il s'agit d'un supplément à la TRNSYS standard.

Nous présentons la simulation, d'une centrale thermique à tour solaire sur le site de Tamanrasset.

Nous avons étudié l'effet de la nature du récepteur sur la performance de la centrale. A cette fin, nous avons d'abord considéré une centrale munie d'un récepteur à air. Par la suite, un récepteur à eau.

Le modèle initial représenté dans la figure suivante se compose d'un champ de **200** Héliostats de taille **150 m^2**. Les héliostats focalisent les rayons solaires sur un récepteur, de type à air puis de type à eau.

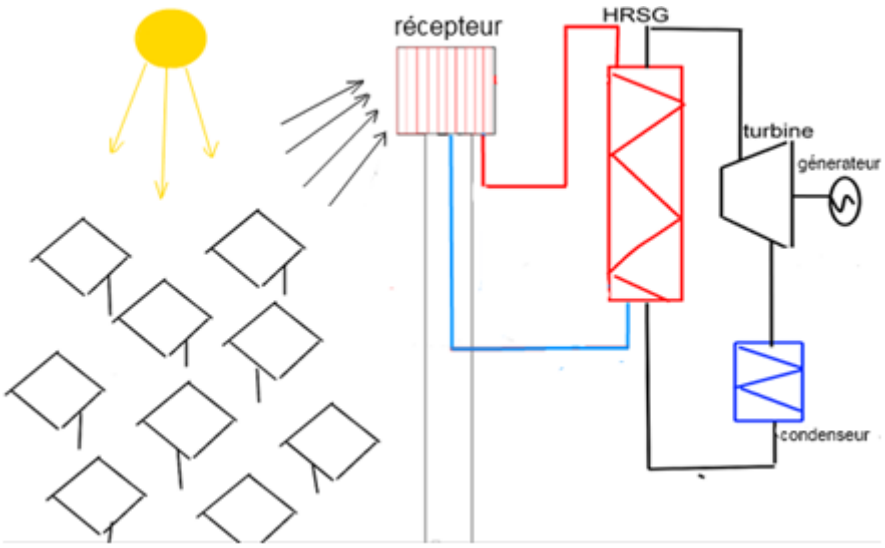


Figure 41 : schéma d'installation de centrale solaire

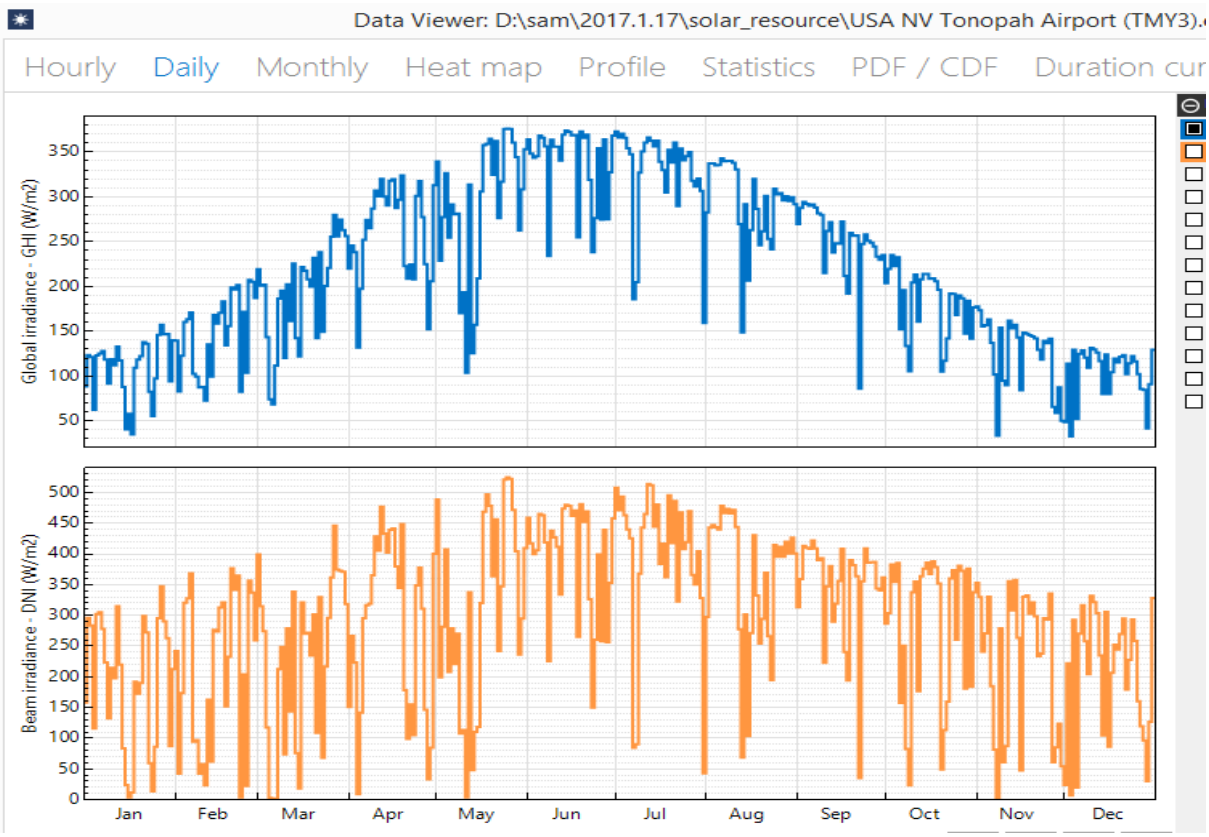


Figure 42: rayonnement solaire direct annuel de Tamanrasset

La variation du l'irradiation directe est représentée en Figure. La moyenne de rayonnement directe sur le site de Tamanrasset est de l'ordre de **2400 KWh/m2** à partir de la et pour des raisons d'insolation importante, notre choix du site porté sur Tamanrasset

Nous avons étudié l'effet de la nature du récepteur sur la performance de la centrale. A cette fin, nous avons d'abord considéré une centrale munie d'un récepteur à air. Par la suite, un récepteur à eau.
Le modèle initial, représenté en Figure suivante, se compose d'un champ de 1000 héliostats de taille de 10.36m2 chacun. Les héliostats focalisent les rayons solaires sur un récepteur, de type à air puis de type à eau.

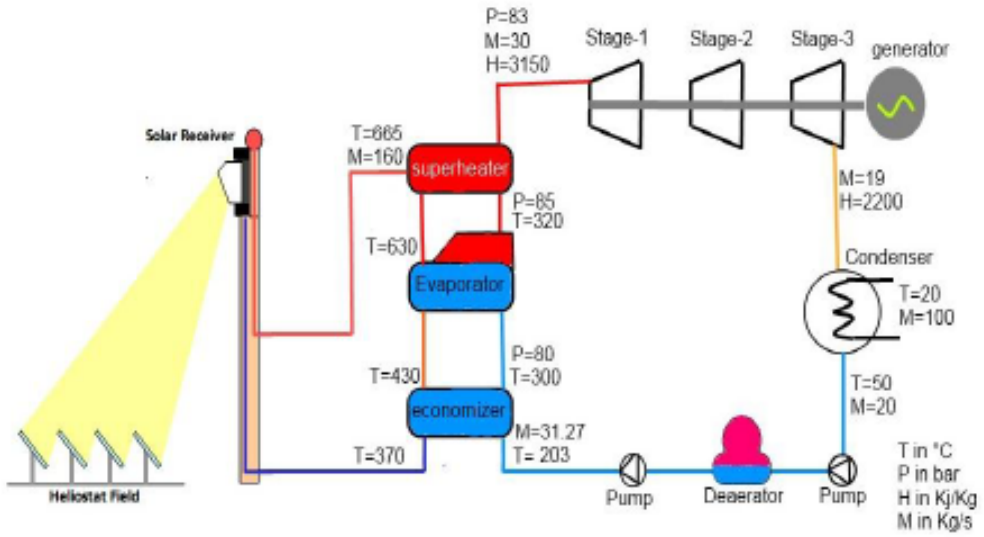


Figure 43: schéma de l'installation d'une tour solaire

- **Centrale solaire à tour alimentée par un récepteur à air :**

Pour la simulation de cette technologie, on a opté pour le schéma suivant :

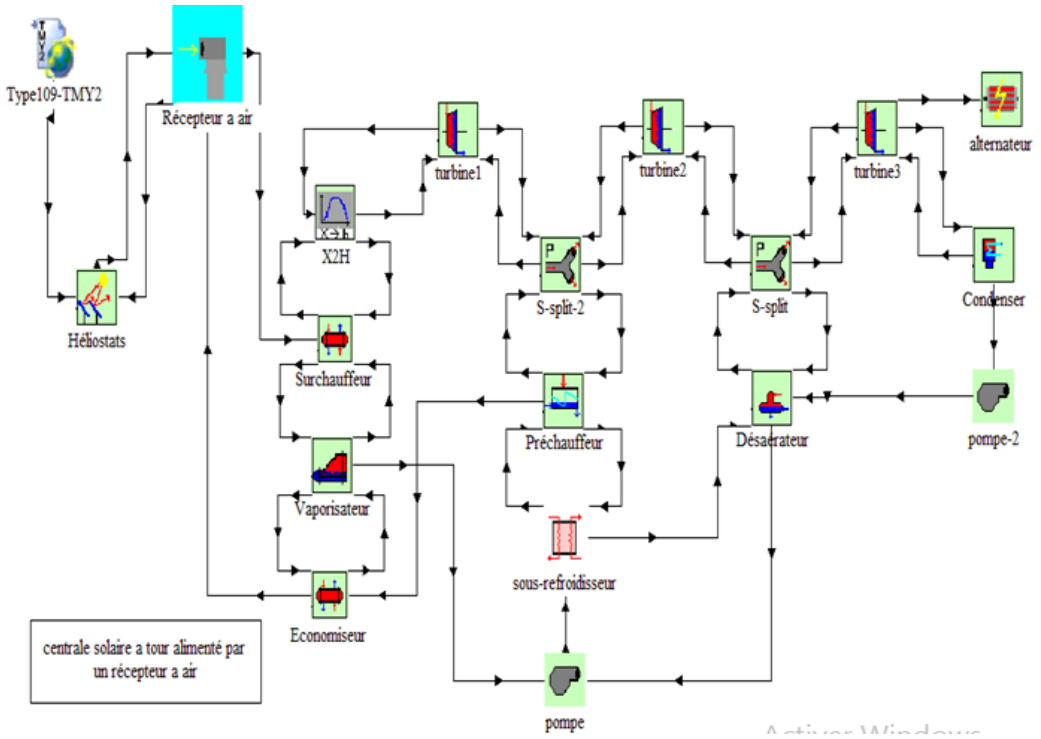


Figure 44 : schéma de simulation d'une centrale solaire alimentée par un récepteur à air

3.2/ Résultats et interprétation :

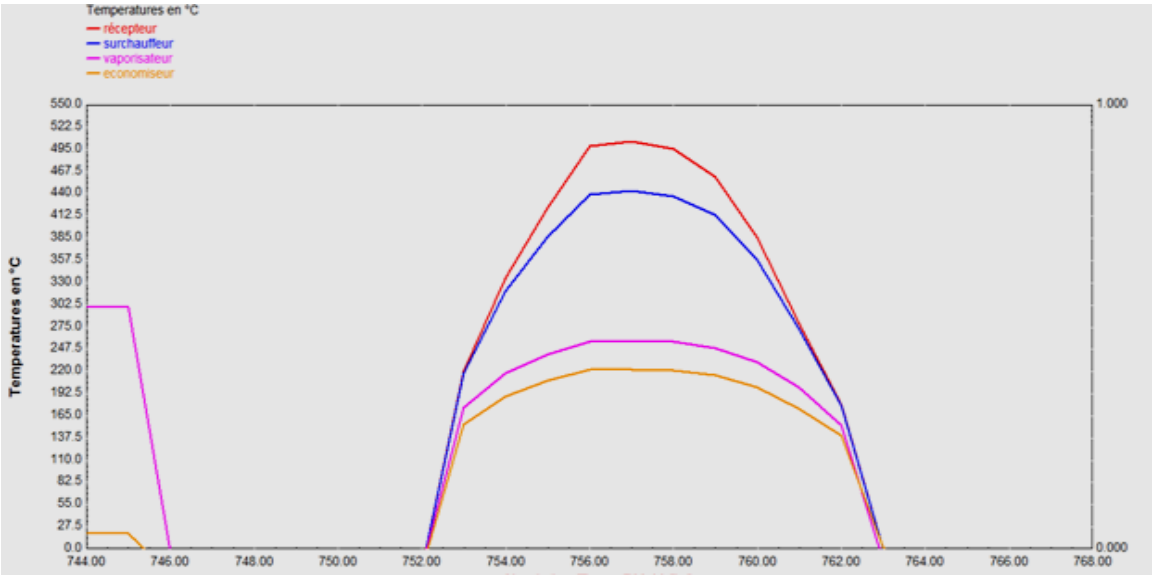


Figure45 : graphique de variation de température du récepteur et des composantes de la chaudière « cas de l'air »

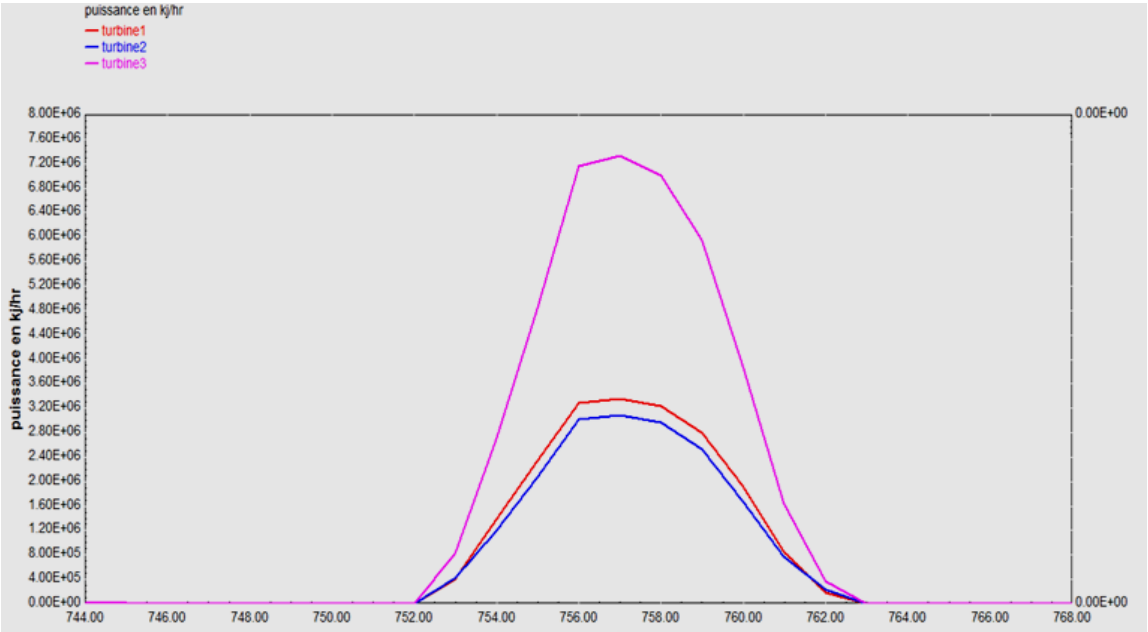


Figure46 :Graphique de variation de puissance des turbines « cas de l'air »

- **Centrale solaire à tour alimentée par un récepteur à eau :**

Pour la simulation de cette technologie, on a opté pour le schéma suivant :

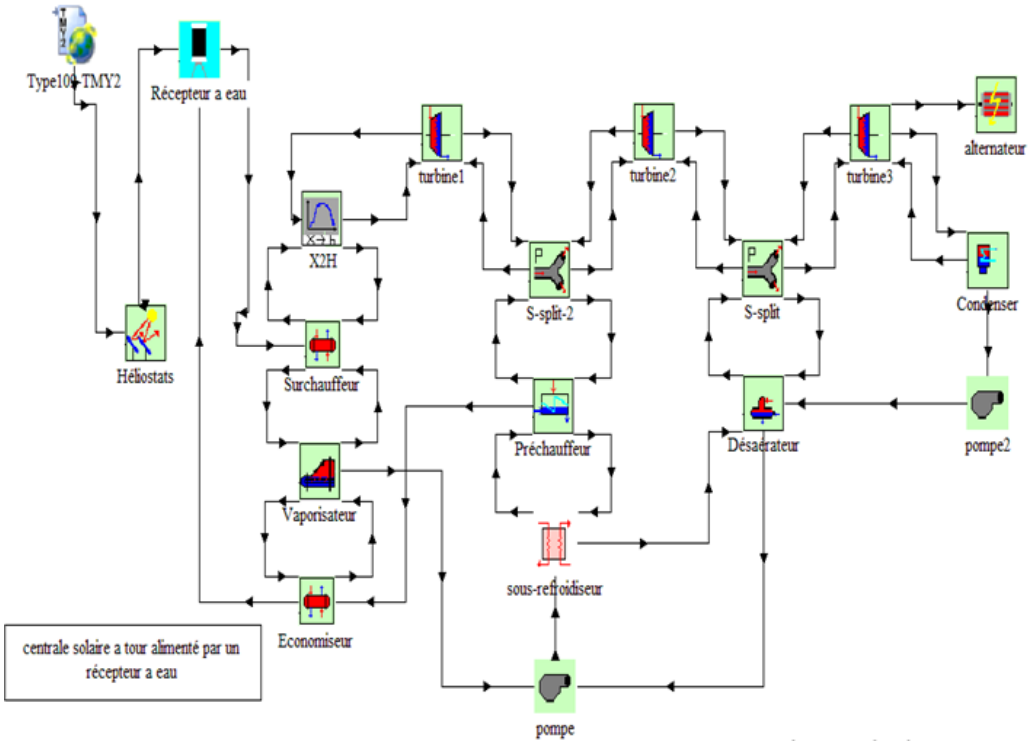


Figure 47 : schéma de simulation d'une centrale solaire alimentée par un récepteur à eau

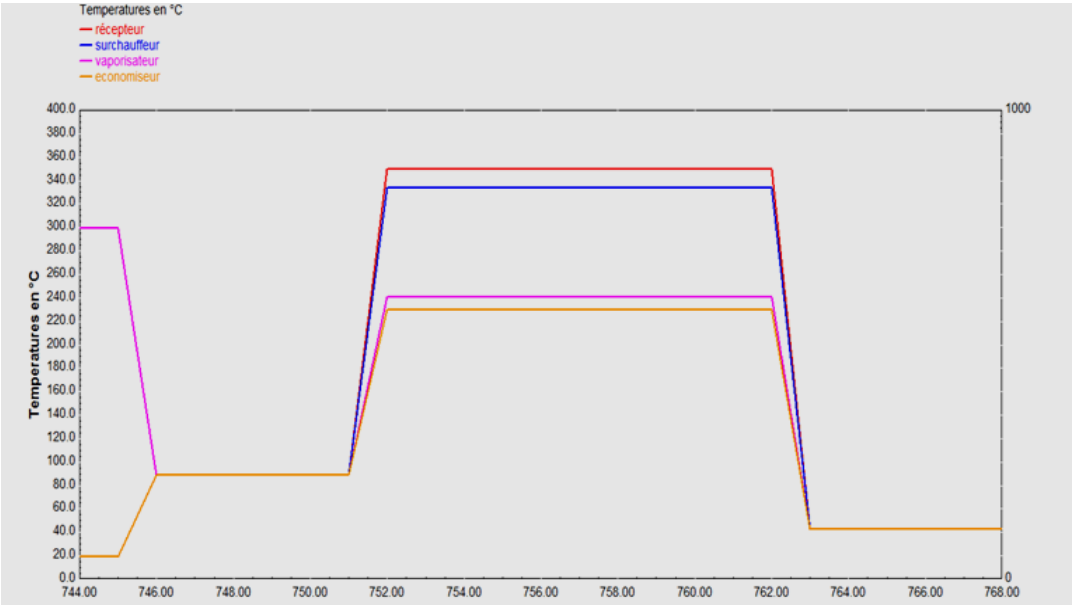


Figure 48 : graphique de variation de température du récepteur et des composantes de la chaudière « cas de l'eau »

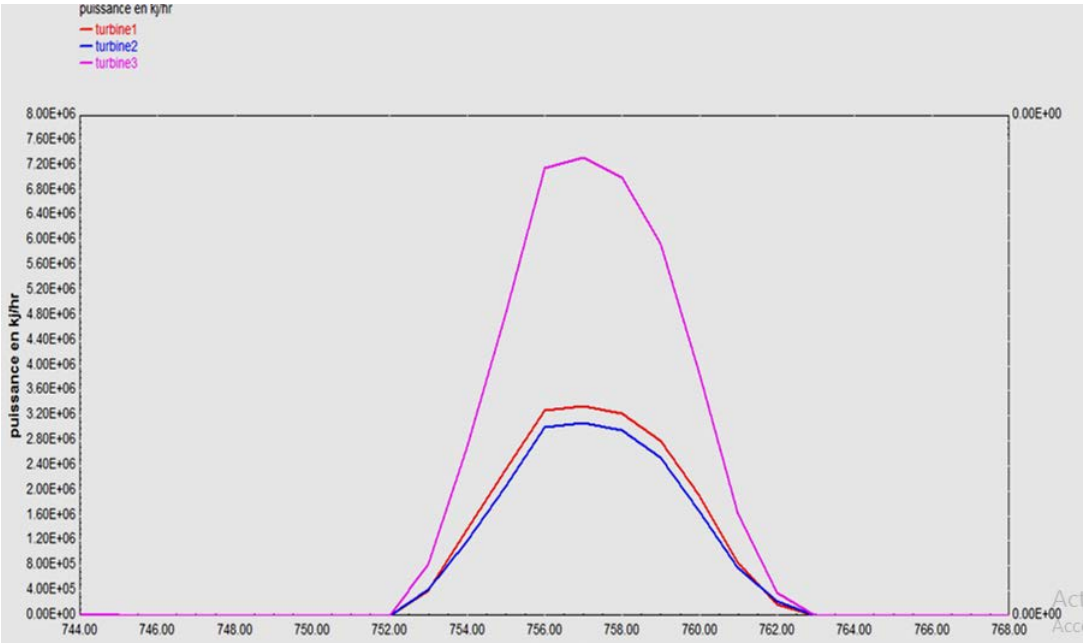


Figure 49 : Graphique de variation de puissance des turbines « cas de l'eau »

Les deux suivantes nous permettent de comparer les températures et pressions dans les deux récepteurs,

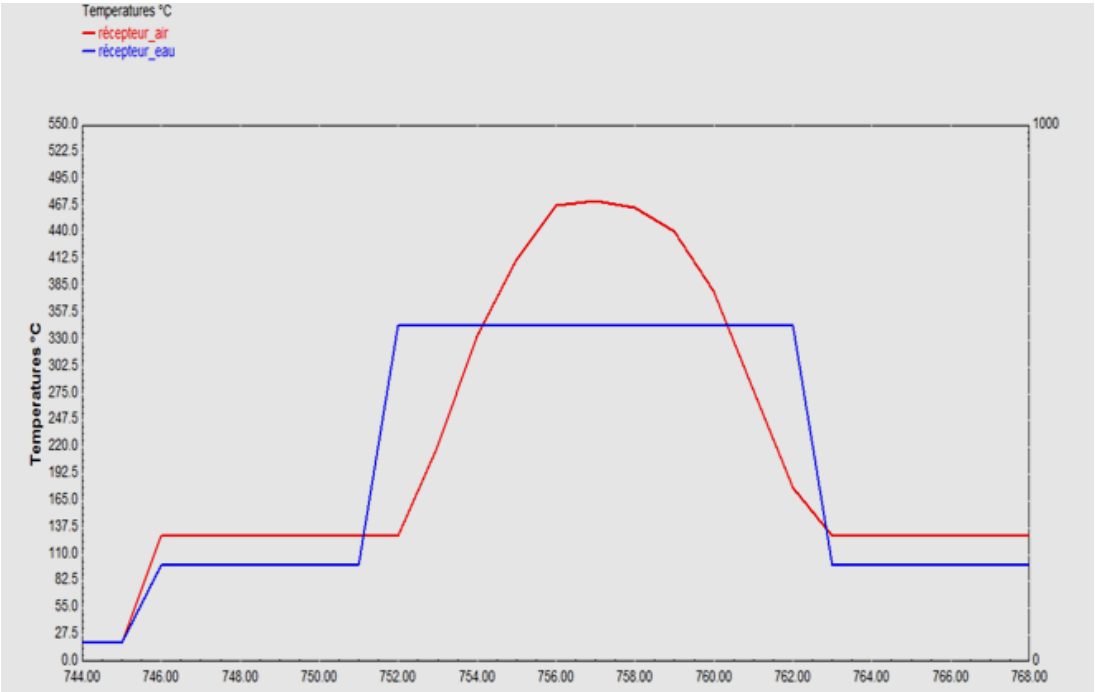


Figure 50 : Graphique de température des deux récepteurs

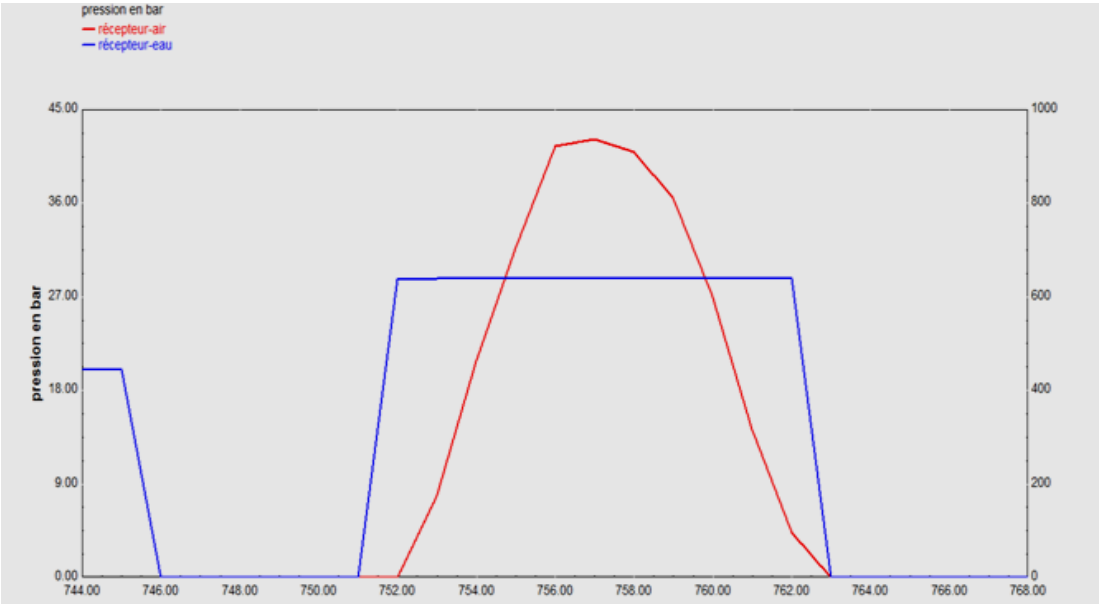


Figure 51: Graphique de variation de pression du deux récepteur en fonction de temps

3.3/ COMPARAISON ENTRE LES DEUX MODELES DE CENTRALE

paramétres		centrale à air	centrale à eau
générateur de vapeur HRSG	température max	440 °C	340°C
	flux moyen	4.23 Kg/s	2.82 kg/s
	enthalpie moyenne	3384 kj/kg	3107 kj/kg
	pression	42 bars	28 bars
puissance des turbines	turbine 1	7442191 Kj/h	4944328 Kj/h
	turbine 2	3145813 Kj/h	1998402 Kj/h
	turbine 3	3411295 Kj/h	1635902 Kj/h
puissance électrique	alternateur 1	2.01 Mw	1.31Mw
	alternateur 2	0.80 Mw	0.52 Mw
	alternateur 3	0.9 Mw	0.42 Mw
	puissance totale	3.71 Mw	2.25 Mw

TABLEAU 4 : TABLEAU COMPARATIF DES DEUX RECEPTEURS

3.4/ Discussions et Interprétation des résultats :

Figures 45 et 48 illustrent la variation de la température de récepteur et les trois principaux éléments de l'échangeur HRSG : l'évaporateur, le surchauffeur et l'économiseur en fonction de temps. Le temps, exprimé en heure, indique ici la période de l'année.

On note de ces graphes qu'il y a globalement une augmentation de la température jusqu'à midi avec une décroissance jusqu'à la fin de la journée. On note aussi que la température du récepteur est nettement plus élevée que pour le reste des autres composants. Ceci est dû à la perte de chaleur au cours de cycle.

Figures 46 et 49 représentent la variation de la puissance des trois turbines pour les deux centrales en fonction du temps au cours de la journée du premier février. On remarque que la turbine1 « itage1 » atteins la puissance maximale dans les deux cas Puis nous notons une réduction considérable pour la turbine 2 et 3. On constate un très bon accord entre les mesures effectuées dans notre simulation et les propriétés des turbines à vapeur « hot pression moyenne pression et base pression »

On observe en Figure 50 et52 que l'eau une fois chauffée garde une certaine stabilité dans le rendement énergétique (la température et la pression) tout au long de la phase d'échauffement. Dans ce cas, les turbines ont un très bon cycle et sont plus stable, i.e, les trois turbines donnent une puissance stable pendante tout la journée comme le montre la figure précédente. Ce qui n'est pas le cas pour l'air comme le graphe le montre.

Grace à sa capacité calorifique de l'ordre de **5700 j/kg°C** le rendement de l'eau est mieux que l'air malgré sons augmentation de température (500°C), cela est bien montré dans les graphique ; ou en trouve que la température de récepteur a eau et de l'ordre de **350°C** et la

température de sorte de l'échangeur « **HRSG** » et de **340°C** par contre ou niveau de récepteur a air en remarque une température de **500°C** avec une température de sorte de l'échangeur de **440°C.**
Concernant le rendement de la centrale l'air a preuve sons efficacité au niveau d'échangeur 440°C contrairement pour l'air qui il est réduite **340 °C**
Pour la température des récepteurs, c'est évident que l'air peut atteindre des températures très haute 500°C par contre pour l'eau, nous avons besoin des milliers des héliostats pour des températures ne dépassant pas pratiquement **360°C**
Bien que le système de stockage soit nécessaire dans une telle installation on doit néanmoins surveiller de très près les phases d'amorcement des turbines à chaque enclenchement de ce système, particulièrement dans le cas de air « instabilité de température » en effet l'arrêt est le démarrage rapproché dans le temps causent de grands problèmes pour les turbomachines.
On remarque également que l'évolution de la pression dans le cas de l'air (42 Bar) est nettement supérieure à la pression dans le cas de l'eau (30 Bar)

Conclusion :

Le travail présenté dans ce projet de fin d'études consiste à simuler et à optimiser les échangeurs thermiques dans la tour solaire à concentration.

Ce travail a été présenté en cinq chapitres,

Le premier chapitre nous a permet de constater le potentiel algérien dans les énergies renouvelables en général, et dans l'énergie solaire spécialement.

Le chapitre 4 nous montre le principe de fonctionnement de cette technologie, et ses éléments constituants.

Le chapitre 5 nous à permet de simuler avec les différents logiciels thermodynamique,

Thermoptim, nous permet de comparer entre les différents cycles thermodynamiques, le cycle de RANKINE est le plus simple et le plus basique, avec la plus faible efficacité,

Contrairement aux autres cycles qui sont plus performants, mais dans chaque investissement, on trouve beaucoup de paramètres pour sélectionner ou choisir un model, par la faisabilité et les considérations économiques.

Le logiciel SAM nous a montré les différents consomation des héliostats, qui représente 50 % de l'investissement,

Le logiciel TRNSYS aussi nous a permet de comparer entre les deux recepteurs à air et à eau, celui de l'air atteint des tempéature plus élevées que celui de l'eau, mais le recepteur à eau et beaucoup plus stable que l'air.

Bibliographie

i. Article : Numerical Modelling of Solar Parabolic Trough Receiver Employed for Thermal Energy Storage System, [NallusamyNallusamy, PanneerselvamMalathi Sivaram, and Mariappan Suresh].

ii. Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver, [R. Forristall: NREL].

iii. Rapport de stage : Etude de l'intégration du champs solaire dans le cycle combiné et propositions d'amélioration de la conduite du champs solaire, [Tahri Hassani Omar].

iv. Rapport de stage Algérie : Calcul énergétique de l'installation hybride thermique pour la production d'électricité, [BENIDIR ABEDLAALI].

v. Rapport de stage : Analyse des paramètres de dégradation du rendement du cycle combinée et intégration du champ solaire, [EL RHAZI HANANE].

vi. Rapport De Projet De Fin D'Etude : ETUDE D'AMELIORATION DU CHAMP SOLAIRE DE SITE ISCC ABM, [Zakaria BENAHNIA].

vii. Rapport de stage de fin d'étude : Etude thermique et économique d'un tube récepteur, [Manal REZZOUG].

Performance characteristics of an air-cooled steam condenser incorporating a hybrid (dry/wet) dephlegmator, [Johan Adam Heyns].

x. ACC TECHNICAL DATA SHEET.pdf. SPX Cooling Technologies Belgium (AIR COOLED STEAM CONDENSER (ACC)).

xi. Cours machines thermiques, Chapitre 6 : Cycles des machines à vapeur, [A.Taieb et Y.Ben Salem].