

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en GENIE MECANIQUE
Spécialité : ÉNERGÉTIQUE

Thème

Les centrales solaires thermodynamiques

Présenté Par :

- 1) DIAFI Baghdadadi.
- 2) BEKHALED Yessin.

Devant le jury composé de :

Dr Sari Hassoun Zakaria	MCB	C.U.B.B - Ain Temouchent	Président
Dr NEHARI Tayeb	MCB	C.U.B.B - Ain Temouchent	Examineur
Dr GUENDOUBouhelal	MAA	C.U.B.B - Ain Temouchent	Encadrant

Année universitaire 2018/2019

Remerciement

Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin.

Je souhaite remercier également Monsieur Guendouz pour son encadrement efficace .ses conseils précieuses et sa patience.

Je remercie toute personne nous aidé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Résumé

Les centrales solaires thermodynamiques ont pour fonction de transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur, puis à convertir cette chaleur en énergie mécanique et électrique par l'intermédiaire d'une génératrice électrique. Pour rendre ces technologies concurrentielles avec les technologies conventionnelles fossiles, nucléaires ou hydrauliques, une réduction du coût de production d'au moins 50 % doit être envisagée pour l'horizon 2015. Cet objectif passe par une amélioration du gain de performances et donc par des travaux ciblés sur les concentrateurs, les récepteurs et les dispositifs de stockage. Cet article présente un état des lieux des technologies mises en œuvre dans les centrales solaires, ainsi que les critères de sélection et de dimensionnement de leurs composants essentiels

Abstract

Thermodynamic solar plants transform the energy radiated by the sun into heat and then convert this heat into a mechanical and electrical energy via an electrical generator. A reduction of the production cost by least 50% must be envisaged for 2015 so that these technologies can compete with the conventional fossil, nuclear or hydraulic technologies. This objective requires an improvement in the performance gain and thus specific works on the concentrators, receivers and storage devices. This article presents the technologies implemented in the solar plants as well as the criteria of selection and dimensioning for their essential components.

ملخص

تعمل محطات الطاقة الشمسية الديناميكية الحرارية على تحويل طاقة الأشعة الشمسية إلى حرارة، ثم تحويل هذه الحرارة إلى طاقة ميكانيكية وكهربائية عبر مولد كهربائي. لجعل هذه التقنيات منافسة للتقنيات التقليدية الأحفورية منها و النووية و الهيدروليكية، يجب التفكير في تخفيض تكلفة الإنتاج بنسبة 50% على الأقل في أفق عام 2015. ويتطلب هذا الهدف تحسيناً في الأداء وبالتالي التركيز على أداء المكثفات وأجهزة الاستقبال وأجهزة التخزين. تقدم هذه المقالة قائمة للتقنيات المطبقة في محطات الطاقة الشمسية ، وكذلك معايير الاختيار والتحجيم لمكوناتها الأساسية.

Sommaire

Remerciement.....	i
Résumé	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les centrales solaires thermodynamiques.....	3
Introduction	3
1. Le soleil	3
2. Historique	5
3. Définition d'énergie solaire	7
4. Les différents types d'utilisation d'énergie solaire	7
4.1. l'énergie passive	8
4.2. l'énergie solaire thermique	8
4.3. l'énergie photovoltaïque	9
4.4. l'énergie thermodynamique	10
5. Les avantages et les inconvénients.....	11
5.1. Les avantages	11
5.2. Les inconvénients.....	11
6. Energie solaire en l'Algérie.....	12
7. L'effet sur l'environnement	15
8. Liste des centrales solaires thermodynamiques	16

9.	Données sur le marché mondial	16
9.1.	L'Espagne	17
9.2.	Les États-Unis	17
9.3.	Le Maroc	18
9.4.	La Chine	18
9.5.	En Afrique du Sud	18
9.6.	Le Chili	18
9.7.	L'Arabie saoudite	18
9.8.	En Inde	18
9.9.	Les tendances du marché sont.....	19
10.	Gisement solaire	19
	Conclusion	21
	Chapitre 2 :L'étude Thermodynamiques.....	23
	Introduction	23
	Partie I : Centrale solaire thermodynamique	24
1.	Définition des centrales solaires.....	24
2.	Principe de fonctionnement.....	25
3.	Les types des centrales thermodynamiques	27
3.1.	La filière des centrales à capteurs linéaires.....	27
3.2.	La filière des centrales à tour	32
3.3.	Les unités parabole-moteur	36
4.	Le stockage thermique	36
4.1.	Le stockage par chaleur sensible.....	37
4.2.	Le stockage par chaleur latente	37
4.3.	Le stockage thermochimique	38
5.	Les centrales hybrides solaire/combustible.....	39

6. Etat actuel du parc CSP et perspective.....	39
7. Vers la génération directe de vapeur pour la filière cylindro-parabolique et dans les récepteurs linéaires de Fresnel.....	40
Partie II: Turbine à vapeur.....	41
Introduction	41
1. Définition-Principes généraux de fonctionnement de la turbine à vapeur :.....	41
2. Réalisation pratique.....	42
a. Turbine à action	43
b. Turbine à réaction.....	43
3. Les principaux composants des turbines à vapeur :.....	44
3.1. Alternateur	44
3.2. Transformateurs	44
3.3. Chaudière	44
3.4. Condenseur	44
3.5. Pompe alimentaire	45
4. Fonctionnement.....	45
5. La Maintenance Industrielle.....	46
Maintenance de la turbine à vapeur	47
Chapitre 3 : Modélisation et résultats.....	49
Introduction	49
1. Description de projet	49
2. Présentation de TRNSYS	50
2.1. Définition	50
2.2. Les avantages les inconvénients du TRNSYS	52
2.3. Présentation de la bibliothèque STEC	52
3. Simulation de l'installation	53
3.1. Modélisation et simulation des différents sous système du cycle de puissance	54

4. Résultats et discussions	62
4.1. Evaluation des paramètres météorologique	62
4.2. Influence de la surface de champ solaire sur la puissance générée	63
4.3. Influence de la surface du champ solaire sur la température à sa sortie:	64
4.4. La puissance des étages de la turbine sans champ solaire (par combustible)	65
Conclusion générale	66
Bibliographie	ix

Liste des figures

Figure I- 1 : Le Noyau[4]	4
Figure I- 2 : Schématique d'une maison passive[4]	8
Figure I- 3: Système chauffage solaire.[4]	9
Figure I- 4: Un champ de plaques photovoltaïques[4]	10
Figure I- 5: Les trois principaux systèmes thermodynamiques à concentration[4]	11
Figure I- 6 : Centrale Thermique.....	21
Figure II- 1 : Schéma d'une centrale solaire.	25
Figure II- 2 Schéma de principe du fonctionnement d'une centrale CSP.....	26
Figure II- 3 Vue aérienne des capteurs solaires de la centrale cylindro-parabolique de Shams à Abu Dhabi. (Source :Shams Power group)	27
Figure II- 4 Schéma de principe de la centrale Shams 1. (Source : Shams Power group).....	28
Figure II- 5 Schématisation d'un capteur SEGS et de son système de support/suivi	29
Figure II- 6 Schéma en coupe d'une lentille de Fresnel (1) et de sa lentille pleine équivalente (2) (source : Wikipedia, article "lentille de Fresnel")	31
Figure II- 7 Schéma de principe d'un LFR	31
Figure II- 8 Schéma de principe d'un CLFR	32
Figure II- 9 Vue de la centrale PE2 (source : Novatec Solar).....	32
Figure II- 10 Schéma de principe des centrales à caloporteur sels à stockage direct.....	33
Figure II- 11 Vue de la centrale Andalouse Gemasolar (source : TorresolEnergy).....	34
Figure II- 12 Vue de la centrale PS20 (source : Abengoa Solar).....	35
Figure II- 13 Vue d'une unité de la centrale Ivanpah (source : Ivanpah Solar).....	35
Figure II- 14 Vue de la centrale Maricopa (source : Tessera Solar)	36
Figure II- 15 Schéma de la turbine à vapeur	45
Figure II- 16Maintenance de turbine à vapeur	48
Figure III- 1 : Schéma de principe du cycle Rankine avec champ solaire.	50
Figure III- 2 : Structure des composants des bibliothèques STEC.	53
Figure III- 3 : Cycle de puissance avec champ solaire.....	53
Figure III- 4 : Champ solaire.....	54
Figure III- 5 : Schéma d'un évaporateur.	55

Figure III- 6 : Condenseur.....	58
Figure III- 7 : Pompe.....	58
Figure III- 8 : Dégazeur.....	60
Figure III- 9 : Préchauffeur.....	61
Figure III- 10 : Sous Refroidisseur.....	61
Figure III- 11 : Le traceur.....	62
Figure III- 12 : Vitesse moyenne du vent (wilaya de Bechar).	62
Figure III- 13 : Graph de la surface de champ solaire et la puissance générée.	63
Figure III- 14 : Graph de la surface du champ solaire et la température à sa sortie.....	64
Figure III- 15 : La puissance des étages de la turbine sans champ solaire (par combustible).	65

Liste des tableaux

Tableau I- 1 Carte d'identité du Soleil[4]	4
Tableau III- 1 : Paramètre de météorologique[40].....	54
Tableau III- 2 : Paramètre de champ solaire.	54
Tableau III- 3 : Paramètre de surchauffeur[40].....	56
Tableau III- 4 : Paramètre d'économiseur[40].....	56
Tableau III- 5 : Paramètre d'évaporateur[40].....	57
Tableau III- 6 : Paramètre d'étage 1 de la turbine[40]	57
Tableau III- 7 : Paramètre d'étage 2 de la turbine[40].....	57
Tableau III- 8 : Paramètre de séparateur 1[40].....	57
Tableau III- 9 : Paramètre de convertisseur[40].....	58
Tableau III- 10 : Paramètre de condenseur[40].....	59
Tableau III- 11 : Paramètre de pompe 1[40].	59
Tableau III- 12 : Paramètre de pompe 2[40].	59
Tableau III- 13 : Paramètre de dégazeur[40].	60
Tableau III- 14 : Paramètre de préchauffeur[40].....	61
Tableau III- 15 : Paramètre de sous refroidisseur[40].....	62

Introduction générale

Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis à convertir cette chaleur en énergie mécanique et électrique au moyen d'un cycle thermodynamique moteur couplé à une génératrice électrique. La première étape, la captation du rayonnement solaire, fait appel à des systèmes optiques. Les systèmes sans concentration captent les composantes directe et diffuse du rayonnement et produisent la chaleur à un niveau de température inférieur à 250 °C, pour une utilisation en chauffage et climatisation de bâtiments ou sous forme de chaleur industrielle pour alimenter des procédés thermiques. Il faut inscrire dans cette catégorie les tours (ou cheminées) solaires qui sont des centrales thermodynamiques sans concentration. À cette dernière exception près, les centrales solaires thermodynamiques mettent en œuvre des systèmes concentrateurs, qui permettent de produire la chaleur à une température supérieure à 250 °C avec d'excellents rendements thermiques, supérieurs à 70 %[1]. Notons toutefois que ces systèmes ne captent que la composante directe du rayonnement solaire. La chaleur solaire transférée dans l'absorbeur au fluide caloporteur peut être stockée de manière fugitive pour s'affranchir des passages nuageux, ou sur des périodes de quelques heures pour décaler l'utilisation en dehors des plages ensoleillées de la journée. L'hybridation avec une source de chaleur fossile ou biomasse permet d'accroître la disponibilité des installations et de produire la chaleur de manière garantie. Cette chaleur est convertie en électricité par des cycles thermodynamiques, bien maîtrisés par l'industrie de la production électrique. Selon les machines utilisées et les cycles mis en œuvre, les rendements de conversion varient de 23 % à plus de 50 % pour les cycles combinés[1]. Au final, le rendement instantané de conversion solaire-électricité est compris entre 20 % et 30 % selon la taille du groupe et le cycle utilisé[1]. En moyenne annuelle, le rendement net de production d'énergie électrique se situe entre 10 % et 20 % selon la technologie mise en œuvre[1]. Selon les estimations du GEF (Global Environment Facility[2]), le coût d'investissement est évalué entre 2 800 e/kWe (centrale de 20 – 80 MWe à collecteurs cylindro-paraboliques et cycle de Rankine) et 4 000 e/kWe (centrale à tour de 40 à 200 MWe avec cycle combiné), et il atteint 14 000 e/kWe pour une unité décentralisée de type parabole-Stirling de 10 à 25 kWe. Selon les mêmes sources, le coût de l'électricité produite dans des conditions favorables – c'est-à-dire sous un ensoleillement supérieur à 2 000 kWh/(m².an) – se situe dans la fourchette 0,16 à

0,24 e/kWhe pour une grosse centrale et de l'ordre de 0,30 e/kWhe pour une parabole-Stirling (on citera à titre comparatif $\approx 0,04$ e/kWe pour les centrales nucléaires).

L'impact environnemental constitue aujourd'hui un critère de choix important dans la sélection de technologies concurrentes. Avec un taux d'émission estimé inférieur à 20 kg CO₂/MWhe, l'électricité solaire thermodynamique se situe de ce point de vue au même niveau que l'électricité d'origine hydraulique (4 kg CO₂/MWhe) ou nucléaire (6 kg CO₂/MWhe), et sans commune mesure avec l'électricité photovoltaïque (100 kg CO₂/MWhe) ou encore l'électricité issue de la combustion du charbon (900 kg CO₂/MWhe). Les chiffres indiqués ici tiennent compte des émissions liées à la construction des centrales et le cas échéant à l'extraction des combustibles. Comparé aux technologies conventionnelles de production de chaleur (hors nucléaire), chaque mètre carré de collecteur installé sous un ensoleillement de 2 000 kWh/(m².an) évite l'émission de 250 à 400 kg de CO₂ par an[3].

Le temps de retour énergétique (durée d'exploitation d'une installation nécessaire pour produire l'énergie nécessaire à sa fabrication) des installations solaires à concentration n'est que de 5 mois[3]. Leur durée de vie est estimée à 25 – 30 ans, et une partie des composants en fin de vie est réutilisable (acier, verre).

Dans ce dossier, nous dressons l'état des lieux des technologies mises en œuvre dans les centrales solaires. Nous détaillons leurs composants essentiels en discutant leurs critères de sélection et de dimensionnement.

Le premier chapitre présente quelques définitions de base et généralités utiles sur l'énergie solaire et gisement, ses différentes transformations en particulier l'énergie solaire thermodynamique.

Le deuxième chapitre présente deux parties dont la première on détermine le principe de fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique ainsi ses différents types, et une deuxième partie qui représente un volet qui décrit la turbine à vapeur, ses composantes et sa maintenance.

Le troisième chapitre décrit l'application numérique utilisant le code TRNSYS 16 afin de simuler une centrale thermodynamique en version entraînée avec l'énergie solaire.

Chapitre I : Généralité sur les centrales solaires thermodynamiques

Introduction

Le soleil est la première et la principale source d'énergie renouvelable. Ces rayons sont retenus par des capteurs thermiques vitrés et sont transformés pour produire de l'énergie électrique ou pour réchauffer de l'eau destinée à un usage sanitaire. Pour pouvoir exploiter l'énergie solaire, on peut se servir soit de **panneaux solaires photovoltaïques**, soit de **panneaux solaires thermiques**.

1. Le soleil

Le Soleil est une étoile, la seule du système solaire, et la plus proche de nous. La plus proche après elle est Proxima du Centaure, située à 4,2 année lumières du Soleil.

Age	4,6 milliards d'années	
Diamètre équatorial	1 392 530 km	
Circumference	4 372 544 km	
Distance par rapport à la Terre	149 598 000 km	
Composition (éléments/ 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%
Temperature	Noyau	15 000 000 K
	Zone radiative	1 500 000 K

	Zone de convection et photosphère	6 000 K
Density (eau=1)	1,41	

Tableau I- 1 Carte d'identité du Soleil[4]

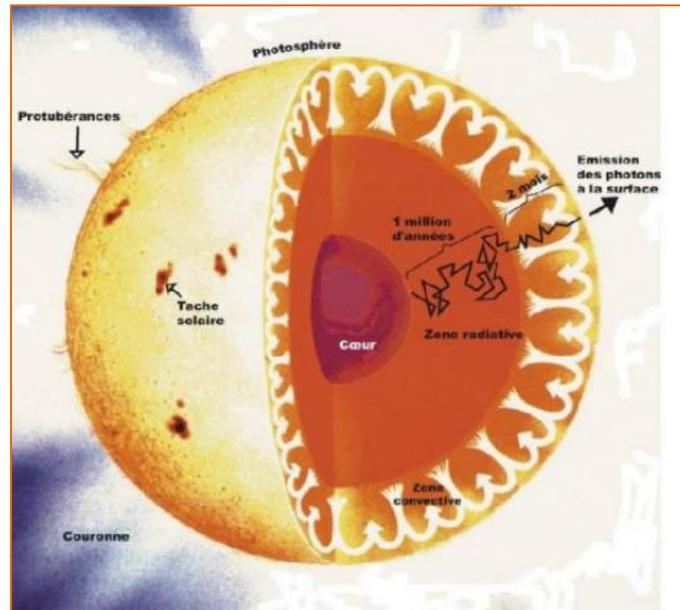


Figure I- 1 : Le Noyau[4]

Le noyau: il s'étend du centre à environ 0,2 rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à 76000 k/m^3 . C'est là qu'est produite l'énergie solaire.

La zone radiative: elle s'étend de 0,2 à 0,7 rayon solaire environ. Sa température est bien plus basse que celle du noyau, mais sa densité reste très forte. Cette zone joue un rôle important dans les transferts et le filtrage de l'énergie, du cœur vers la surface du Soleil.

La zone de convection: elle s'étend de 0,7 rayon solaire à 400 km de la surface du soleil environ. Elle permet les échanges d'énergie entre la zone radiative et la photosphère. En raison de sa faible densité, les échanges dans cette zone se font par convection: les gaz chauds remontent à la Surface, se refroidissent, puis redescendent, se réchauffent, remontent, et ainsi de suit

La photosphère: elle s'étend sur les derniers 400 km du rayon de l'étoile. Une partie de la lumière visible que nous percevons y est produite. Elle est composée de gaz moins denses que les autres couches du Soleil

2. Historique

L'utilisation de l'énergie solaire remonte à l'Antiquité. Par exemple, les Grecs allumaient la flamme olympique grâce à un système de miroirs concentrant les rayons du Soleil. Cependant le début des applications pratiques est apparu au XVIIIe siècle.

Le Français Salomon de Caus construit en 1615 une pompe solaire, grâce à l'utilisation d'air chauffé par le rayonnement solaire.[5]

Au XVIIIe siècle, François Vilette, opticien au palais de Versailles, conçoit un miroir en bronze (appelé miroir ardent) d'un mètre de diamètre, grâce auquel il fait des démonstrations de fusion d'objets[5].

En 1747, Georges-Louis de Buffon expérimente un miroir qui concentre la lumière du soleil en un point focal. Il arrive à faire fondre un morceau d'argent (soit plus de 1 044 °C)[6].

À la fin du XVIIIe siècle, grâce à une lentille à liquide qui concentre les rayons solaires, Antoine Lavoisier construit un four solaire qui atteint la température de 1 800 °C[6].

Dans les années 1780, H. B. de Saussure invente un instrument de mesure lui permettant d'étudier les effets calorifiques des rayons du soleil qu'il nomme « hélio thermomètre » ; cet instrument utilise l'effet de serre obtenu par un vitrage placé au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé ; il crée ainsi un capteur solaire thermique à basse température[6].

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, est découverte par Edmond Becquerel en 1839[6], mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

En 1875, Werner von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.[7]

En 1913, William Coblentz dépose le premier brevet pour une cellule solaire qui malheureusement ne pourra jamais fonctionner. En 1916, Robert Millikan sera le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire, mais pendant les quarante années suivantes,

personne ne fera beaucoup de progrès en énergie solaire car les cellules photovoltaïques ont un trop mauvais rendement pour transformer la lumière du soleil en énergie. Le phénomène reste encore une découverte anecdotique[8].

Pendant l'année 1954, trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement (9 %) et les Laboratoires Bell construisent le premier panneau solaire mais il était trop coûteux pour être produit en série. C'est la conquête spatiale qui fera réellement progresser l'énergie solaire ; le panneau solaire est le seul moyen non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie, de plus l'énergie solaire est une source d'énergie constante pour les satellites en orbite. En effet, c'est en 1958 qu'a lieu le premier lancement d'un satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque. L'industrie spatiale investira beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaires. C'est la première utilisation importante de la technologie solaire photovoltaïque[8].

Pendant les années 1970 et 1980, des efforts sont faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. L'énergie solaire connaîtra un second élan au cours du premier choc pétrolier dans les années 1970. Alors que le prix du pétrole augmente de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques commencent à être utilisés pour la première fois dans les maisons. En effet, en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université du Delaware et en 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie. Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement. Pendant longtemps, ils ont été considérés comme des sources d'énergies naturelles. L'énergie solaire est de nouveau en plein essor car on prévoit une pénurie de pétrole prochaine, on se préoccupe du réchauffement de la planète et les prix de l'énergie n'ont jamais été aussi hauts. L'énergie solaire devient une priorité pour de plus en plus de pays. Des centrales solaires sont en cours de construction dans le monde entier. Les entreprises investissent également. Les entreprises d'électricité et les gouvernements ont offert des subventions et des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans l'énergie solaire pour leur maison. En effet, en 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001[8].

De nouveaux types de panneaux solaires ont été développés ; panneaux solaires très fins (4 mm d'épaisseur) et flexibles, des peintures solaires. L'objectif est de réduire très fortement le coût de l'énergie solaire.[8]

En novembre 2015 une « Alliance internationale pour l'énergie solaire » (ou ISA) pour « International solar alliance » a été créée. Le projet en était porté par Narendra Modi (Premier ministre indien). Cette alliance doit réunir les États disposant d'importantes ressources solaires afin de mieux coordonner le développement de leur exploitation (thermique et photovoltaïque) via des actions de formation, de standardisation de matériels, de partage d'expériences, co-entreprises...). La cérémonie de lancement a eu lieu lors de la COP21 à Paris, organisée par l'Inde et la France[8], avec le soutien du secteur privé selon Energie.

3. Définition d'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie rayonnée par le soleil. Cette énergie est à l'origine de nombreux phénomènes Physiques tels que la photosynthèse, le vent ou le cycle De l'eau.

Elle vient de la fusion nucléaire se produisant au cœur du Soleil. Elle circule dans l'espace sous forme d'un Rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est Composé de photons, petites particules d'énergie Élémentaires.

4. Les différents types d'utilisation d'énergie solaire

La première et plus répandue des utilisations de l'énergie solaire est sa transformation en énergie thermique. Nous effectuons cette transformation naturellement : il suffit de se mettre au soleil pour ressentir de la chaleur. Notre corps transforme l'énergie solaire en énergie thermique. Avec une architecture appropriée, un bâtiment est aussi capable de transformer cette énergie en énergie thermique. L'utilisation la plus connue actuellement est le chauffage« solaire » :

L'eau pour les robinets ou les radiateurs est chauffée par des panneaux solaires. Une autre utilisation de cette transformation est l'usage de fours solaires. Les petits fours solaires « domestiques » peuvent chauffer facilement jusqu'à 150°C et les fours industriels ou pour la recherche peuvent atteindre jusqu'à 3000°C en quelques secondes!

Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires tout d'abord nous allons les citer et ensuite les expliquer :

- L'énergie passive
- L'énergie thermique
- L'énergie photovoltaïque
- L'énergie thermodynamique

4.1. L'énergie passive

C'est une énergie non polluante et qui est disponible en grande quantité. Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, pour l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.

Son fonctionnement : l'énergie lumineuse du soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres et qui est absorbée par les murs mais aussi par les meubles, par les planchéie, est rejetée sous forme de chaleur.

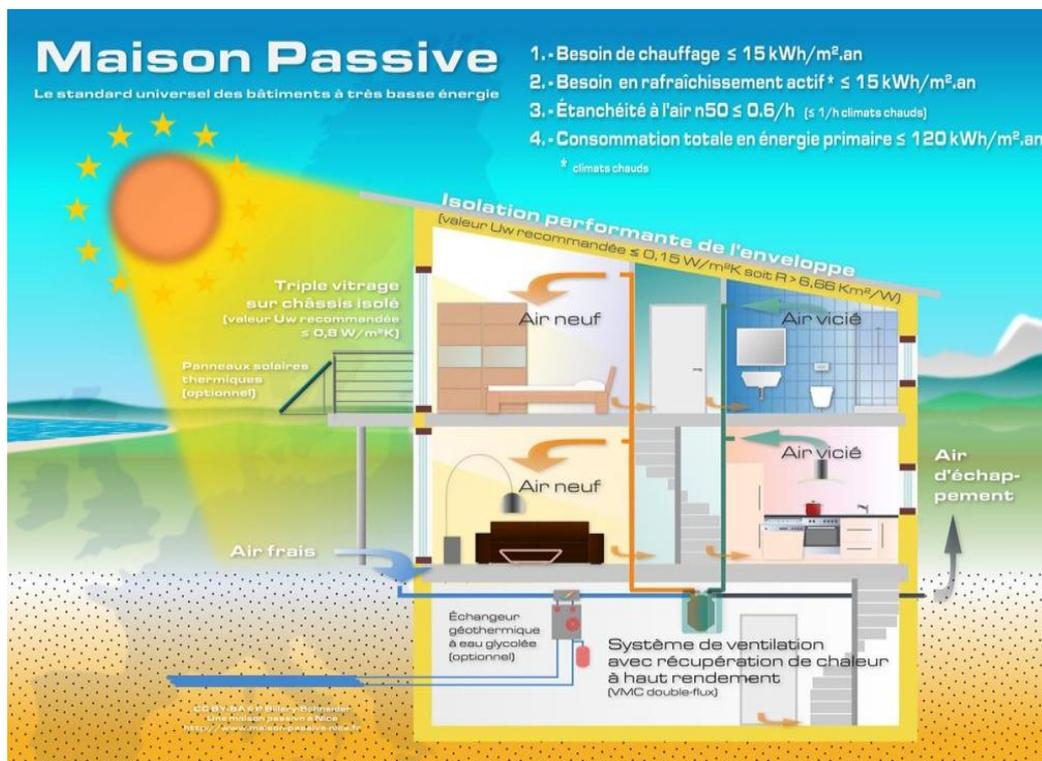


Figure I- 2 : Schématique d'une maison passive[4]

4.2. L'énergie solaire thermique

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude.

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires.

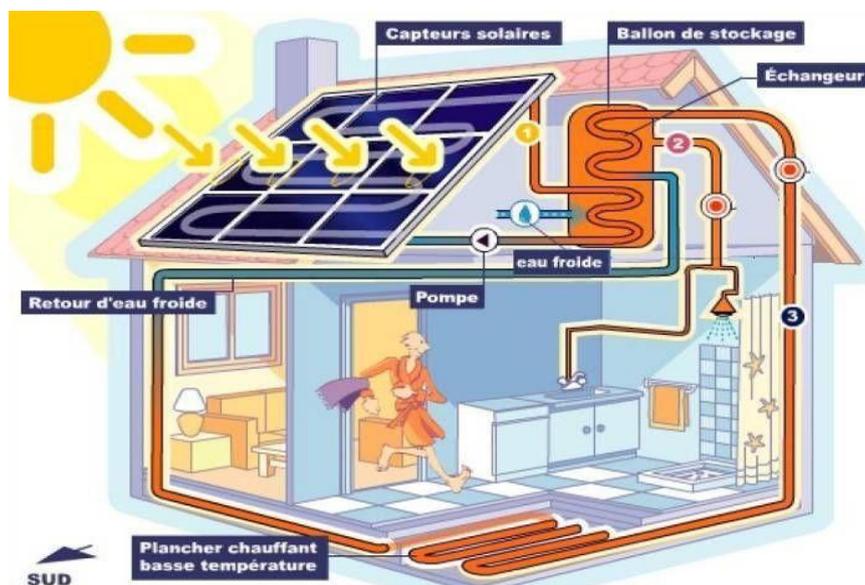


Figure I- 3: Système chauffage solaire.[4]

4.3. l'énergie photovoltaïque

Cet effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement négligeable mais on lui prédit un grand avenir, son coût baissera fortement dans les années à venir. Cette énergie sera durable et ne devra nécessiter aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison, contrairement aux autres formes d'énergies solaires qui ne produisent que de la chaleur grâce aux capteurs du panneau qui transforment les rayonnements du soleil en cellule photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la

lumière, génère une tension électrique, ces cellules se présentent sous la forme de deux fines plaques. Le courant qui en ressort est continu donc cette énergie produit de l'électricité.



Figure I- 4: Un champ de plaques photovoltaïques[4]

4.4. l'énergie thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer un fluide haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante.

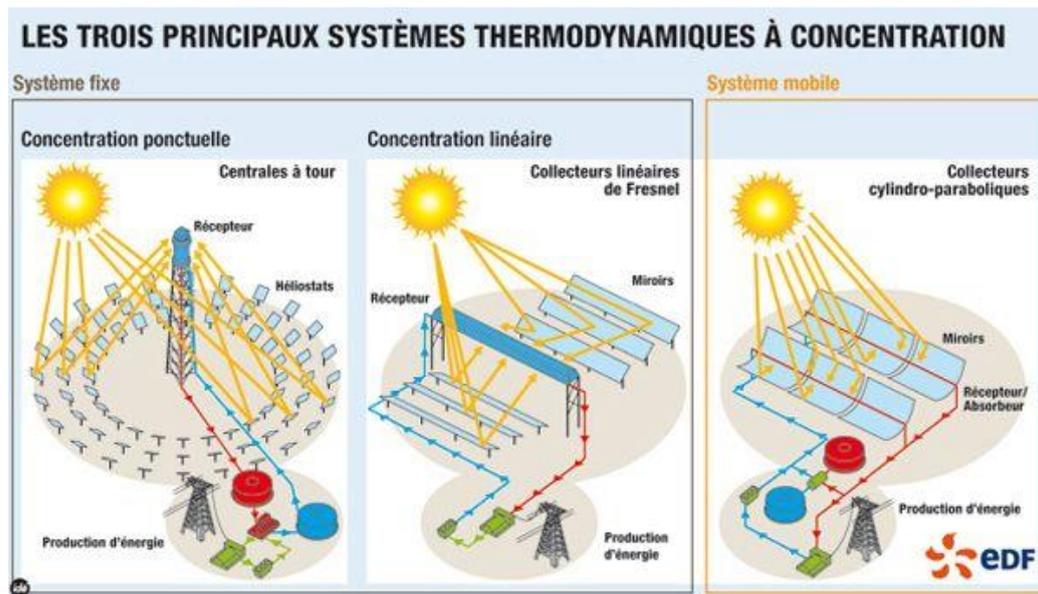


Figure I- 5: Les trois principaux systèmes thermodynamiques à concentration[4]

5. Les avantages et les inconvénients

Le solaire, une énergie renouvelable qui comporte des avantages mais aussi des inconvénients

5.1. Les avantages

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante
- L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage. L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Le rendement énergétique est positif : il faut en moyenne entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication.

5.2. Les inconvénients

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé

- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes
- Un cycle de vie en question : la durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an. De plus, les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre, chrome, silicium, cadmium et tellure.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale.[4]

6. Energie solaire en l'Algérie

L'Algérie s'apprête à construire la plus grande centrale solaire au monde. C'est ce qui ressort de la visite qu'effectue le ministre de l'Energie aux Etats-Unis, où il a rencontré de nombreux dirigeants d'entreprises dans la perspective de la concrétisation de ce projet titanesque. Hormis ses entretiens à Houston avec les patrons américains, avec lesquels il a notamment évoqué la coopération dans le domaine des énergies alternatives, Noureddine Boutarfa a rencontré, en marge du Forum algéro-américain sur l'énergie, Bruce Cutright et John Chrosneck, respectivement PDG de Thermal Energy Partner et de Dupont, deux entreprises américaines spécialisées dans le développement des projets d'énergie renouvelable, essentiellement le photovoltaïque et la géothermie. Le ministre a insisté au cours de ses entrevues sur la nécessité de développer la production locale des équipements et le transfert de technologie. Au cours de ce forum, le ministre a annoncé le lancement prochain d'un appel d'offres national et international pour un mégaprojet solaire de type photovoltaïque de 4 000 MW[9]. Ce mégaprojet inclura une composante énergétique consistant en la réalisation de centrales électriques et une seconde de type industriel dédiée à la fabrication locale des équipements destinés à ces unités, a-t-il précisé.

Le ministre a, d'autre part, souligné que les retombées du programme des énergies renouvelables vont être importantes en termes de création d'emploi, d'industrialisation, de développement technologique et d'acquisition de savoir-faire dans ce domaine. A titre de

comparaison, la centrale solaire Noor, qui se trouve près d'Ouarzazate, au Maroc, et est aujourd'hui la plus grande centrale solaire au monde, ne produira à terme «que» 500 MW, contre 4 000 MW pour le projet algérien[9].

Détentrice de la seconde plus grande réserve de gaz d'Afrique et de la troisième plus grande réserve de pétrole du continent, l'Algérie a récemment revu à la hausse ses objectifs d'ici à 2030 en termes d'énergies renouvelables, encourageant une plus grande diversification de la consommation intérieure. Un programme a même été tracé. Les filières du solaire photovoltaïque et éolien sont particulièrement privilégiées, et ce, dans le cadre du programme en question qui se fixe comme objectif la production de 22 000 MW pour les besoins du marché national sur la période 2015-2030, soit près du tiers des besoins du pays en électricité, dont plus de 4 500 MW à réaliser d'ici à 2020[10].

A signaler que 14 centrales électriques photovoltaïques d'une capacité installée de 268 mégawatts (MW) ont été mises en service en 2015 dans les hauts plateaux et le sud du pays. Le coût total de ces 14 centrales est de l'ordre de 70 milliards DA. Chacune d'elles a permis de créer au moins 250 postes d'emploi au cours de la période de réalisation, en plus d'une cinquantaine d'emplois durant l'exploitation.[10]

Le parc national des énergies nouvelles et renouvelables comprend actuellement 24 centrales cumulant une puissance globale de 354,3 mégawatts (MW), a indiqué, mercredi à Alger, le P-dg de Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida (SKTM, filiale de Sonelgaz), Chahar Boulakhras[11].

Ce parc des énergies nouvelles et renouvelables (EnR) se compose de 23 centrales de photovoltaïque (PV) d'une puissance globale de 344,1 MW et d'une (1) pour l'énergie éolienne de 10,2 MW, a précisé M. Boulakhras lors d'une rencontre organisée par le "Club Energia" du Forum des chefs d'entreprises (FCE) sous le thème "gestion des grands projets dans les domaines de l'énergie solaire"[11].

A ce propos, il a rappelé que l'Algérie avait mis en place une stratégie nationale permettant de mettre en œuvre le programme de développement de ces énergies.

"Nous ne sommes pas en retard dans la réalisation du Programme national du développement des EnR. L'Algérie a tracé une stratégie pour développer ces énergies à l'effet de mettre en

place un éco-système et une industrie locale avec une intégration nationale progressive de tous les maillons de la chaîne de valeurs", a indiqué le même responsable à la presse en marge de cette rencontre.

Il a ainsi estimé que cette stratégie était bénéfique pour l'Algérie du fait que les coûts d'investissement ont finalement été ramenés de 50 milliards de dollars, tel qu'évalué initialement, à un montant oscillant entre 20 et 25 milliards de dollars[12].

Détaillant les étapes de cette stratégie, il a indiqué qu'elle était scindée en trois (3) phases dont la première avait consisté à réaliser des projets-pilotes et à mettre en place des mécanismes de financement nécessaires au développement de ce programme.

Les projets réalisés au titre de cette phase avaient porté sur la mise en place des installations pilotes pour tester les technologies disponibles, ainsi que le lancement du projet de réalisation d'une ferme éolienne de 10 MW à Kabertene (Adrar) et du projet de réalisation d'une centrale photovoltaïque de 1,1 MW à Ghardaïa[12].

Ces deux projets, réalisés dans le cadre de la phase expérimentale, sont en exploitation depuis 2014.[12]

Pour ce qui est de la deuxième phase, achevée en juillet 2017, elle consistait à déployer 22 centrales, et ce, en partenariat avec des firmes internationales, a-t-il ajouté[12].

S'agissant de la troisième phase, toujours en cours, elle vise à mettre sur pied une industrie dédiée aux EnR devant permettre la fabrication en Algérie des biens d'équipements liés à cette filière énergétique, a-t-il encore précisé.

Cette phase a également pour objectif de réaliser une intégration nationale progressive de tous les maillons de la chaîne de valeurs (système industriel énergétique intégré depuis la fabrication des équipements jusqu'aux services de construction, d'exploitation et de maintenance).

Pour sa part, un expert en transition énergétique, TawfikHasni, présent à cette rencontre, a indiqué à la presse que l'installation de plus de 340 MW en photovoltaïque place, certes,

l'Algérie parmi les meilleurs pays africains dans ce domaine, mais vu les objectifs tracés, "l'Algérie est encore loin dans ce domaine".

Ainsi, pour accélérer le processus, "il est impératif de libérer les initiatives et de bannir la sélectivité dans le développement de ces énergies vertes", préconise-t-il.

En d'autres termes, cet expert estime qu'il ne faut pas se focaliser uniquement sur le photovoltaïque mais laisser aussi la chance à toutes les autres alternatives énergétiques renouvelables tels le solaire thermique et le nucléaire civil. APS[13]

7. L'effet sur l'environnement

L'énergie solaire, comme l'hydroélectricité, l'éolien, la géothermie et l'énergie marémotrice, est une énergie verte ou propre c'est-à-dire qu'elle produit une faible quantité de polluants.

Les centrales électriques solaires et les panneaux photovoltaïques permettent de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. L'impact environnemental se situe principalement au niveau de la fabrication, du transport, de l'installation et du recyclage de ces infrastructures. La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique en tant que telle n'émet pas de pollution.

L'utilisation du silicium dans la fabrication des panneaux photovoltaïques alourdit le bilan énergétique. En effet, les usines de silicium rejettent une grande quantité de CO₂ dans l'air. Les panneaux solaires sont aussi constitués en faible quantité de substances dangereuses comme le plomb, le brome ou le cadmium. Néanmoins, des efforts sont faits pour remplacer ces matériaux par d'autres, plus écologiques.

Garantis 20 à 30 ans, que deviennent les panneaux photovoltaïques en fin de vie ? Dans les faits, ils sont recyclables à 85 %. Des entreprises privées et des organismes à but non lucratif facilitent le recyclage dans le but de diminuer l'enfouissement et la pollution des sols. D'après une étude effectuée en 2007 par l'Agence Internationale de l'Énergie, il faut de 1 à 5 ans pour qu'un système photovoltaïque produise autant d'énergie qu'il a été nécessaire pour sa fabrication[14].

Installés au sol, les panneaux solaires peuvent modifier le paysage et déranger la faune locale principalement par la pose de clôture sur des terrains de grande superficie. Une des réponses à ce problème est de construire des corridors pour faciliter le passage des animaux.

Aujourd'hui, l'énergie est essentielle pour répondre aux besoins des individus, des industries

ou des transports. On cherche donc des solutions alternatives aux énergies fossiles polluantes et limitées, et l'énergie solaire en est une. Ces impacts environnementaux sont minimes par rapport aux avantages à long terme et les avancées dans ce domaine en feront une énergie de plus en plus propre aux fils des années.

8. Liste des centrales solaires thermodynamiques

Les trois premières unités de Solnova au premier plan. Au fond, les deux tours des centrales solaires PS10 et PS20.

La liste des centrales solaires thermodynamiques (ou centrales solaires thermiques à concentration) recense toutes les centrales actuelles ainsi que l'évolution prévue. Ces centrales connaissent un développement important malgré leurs limites, en particulier la nécessité de disposer de conditions optimales d'ensoleillement direct, idéalement supérieur à 1 900 kWh/m²/an ; elles présentent par contre un avantage majeur par rapport au photovoltaïque : elles peuvent (optionnellement) stocker la chaleur qu'elles produisent pour pouvoir continuer à fonctionner plusieurs heures après le coucher du soleil.

Les zones favorables à leur déploiement sont le sud-ouest des États-Unis, le nord du Chili et de l'Argentine, le Sahara, la péninsule arabique, l'Iran, l'Afghanistan, le Pakistan et le nord-est de l'Inde, le sud de l'Afrique, l'Australie¹.

9. Données sur le marché mondial

La production des centrales solaires thermodynamiques atteignait 9 418 GWh en 2015, soit 0,04 % de la production mondiale d'électricité ; en comparaison, la production du solaire photovoltaïque s'élevait à 246 556 GWh (1,0 %), soit 26 fois plus. Les principaux pays producteurs sont l'Espagne : 5 593 GWh et les États-Unis : 3 544 GWh.[15]

En 2017, la puissance installée du solaire thermodynamique a progressé de 100 MW, soit +2 %, pour atteindre environ 4,9 GW ; plusieurs projets qui devaient être mis en service en 2017 ont été retardés, mais les projets en construction atteignent 2 GW, surtout en Chine, au Moyen-Orient et en Afrique ; la capacité de stockage d'énergie thermique des centrales en fonctionnement atteint 13 GWh, sous forme de sels fondus ; l'Espagne (2,3 GW) et les États-Unis (1,7 GW) concentrent 80 % du parc, mais le marché continue à basculer vers les pays émergents et ceux dotés de niveaux élevés d'insolation : l'Afrique du Sud est restée le leader

du marché en 2017, et même le seul pays à mettre en service une nouvelle centrale : Xina Solar One (100 MW), portant sa puissance installée à 300 MW.[15]

Pour la première fois, un projet solaire thermodynamique a réussi à atteindre la compétitivité par rapport aux moyens de production classiques, en emportant en septembre 2017 l'appel d'offres pour le projet de centrale à tour solaire (700 MW) de la phase 4 du Mohammed Bin Rashid Al Maktoum Solar Park, au Émirats arabes unis, au prix de 7,3 USD cents/kWh ; il n'aura donc besoin d'aucune subvention ; sa mise en service est programmée pour 2020.[15]

Le secteur de l'énergie solaire thermodynamique était en croissance rapide en 2013, avec 3,7 GW en fonctionnement, 2 GW en construction, 4,8 GW de projets en développement et 3,3 GW planifiés fin 2013.[15]

Le rapport Renewable Energy Medium-Term Market Report 2013 de l'Agence internationale de l'énergie prévoit pour 2018 une puissance mondiale installée de 12,4 GW, soit un productible de 34 TWh ; à l'horizon 2030, selon les scénarios, la puissance de la filière atteindrait 150 à 250 GW et 650 à 950 GW en 2050, correspondant à 7 à 11 % de la production d'électricité ; un autre rapport, IEA Energy Technology Perspectives 2014, justifie le fort développement prévu pour le solaire thermodynamique par ses possibilités de stockage de l'énergie, qui en font un bon complément au photovoltaïque[15].

Fin 2013, 19 pays disposaient déjà d'unités de taille commerciale en fonctionnement ou en construction : Espagne, États-Unis, Inde, Maroc, Algérie, Égypte, Émirats arabes unis, Oman, Iran, Thaïlande, Japon, Australie, Chili, Mexique, France, Italie, Chine, Canada, Papouasie-Nouvelle-Guinée, sans compter les unités de recherche ou de démonstration[15].

9.1. L'Espagne

épicerie du développement de l'énergie solaire thermodynamique, reste de loin le premier producteur d'électricité par cette technique avec 2 304 MW en service fin 2013 et 3 443 GWh produits en 2012, suivie par les États-Unis avec 765 MW en service fin 2013, et 5 600 MW de projets annoncés de centrales thermiques solaires⁷. Le développement de ce marché a été interrompu par la suspension, décidée en 2012 par le gouvernement Rajoy, des tarifs d'achat garantis pour les énergies renouvelables.[15]

9.2. Les États-Unis

Deuxième producteur mondial, détient les cinq plus grandes centrales solaires thermodynamiques du classement mondial.[15].

9.3. Le Maroc

Le Plan Solaire Marocain, (2 000 MW) en 2028 a franchi une première étape avec la mise en service de la centrale solaire Noor (160 MW) en février 2016[15].

9.4. La Chine

construit également quatre centrales : CPI Golmud Solar Thermal Power Plant, DelinghaSupcon Tower Plant, HelioFocus China Orion Project et Ninxia ISCC, avec 302 MW au total.[15]

9.5. En Afrique du Sud

Quatre centrales sont en cours de construction : Bokpoort, Ka Xu Solar One, Khi Solar One et Xina Solar One, avec une puissance totale de 300 MW.

9.6. Le Chili

trois très importantes centrales solaires thermodynamiques (450 MW, 260 MW et 390 MW) sont en projet fin 2017.[15]

9.7. L'Arabie saoudite

a prévu d'installer 25 GW de centrales solaires à concentration d'ici à 2032 ; son agence K.A.CARE chargée du programme d'énergies renouvelables a annoncé en février 2013 le lancement du premier appel d'offres de 900 MW, puis l'a retardé afin de réaliser auparavant une vaste campagne de mesures d'ensoleillement au moyen de 75 stations réparties dans tout le royaume ; cette prudence s'explique par l'expérience malheureuse de la centrale de Shams 1, à 120 km d'Abou Dhabi, première centrale inaugurée dans la péninsule arabique : son rendement réel s'est avéré inférieur de 20 % à celui qui avait été estimé, du fait de la présence de poussières de sable dans l'air[15].

9.8. En Inde

le gouvernement a réduit les financements pour la filière thermique au profit du photovoltaïque dans le cadre du programme JNNSM (Jawaharlal Nehru National Solar

Mission) qui vise 20 GW solaires d'ici à 2022 ; sur les 7 projets solaires thermodynamiques validés en 2010 pour la première phase du programme, seuls deux ont respecté les délais de construction : Godawari (50 MW), mis en service en juin 2013, et Rajasthan Sun Technique (100 MW), mis en service en mars 2014 ; un troisième projet, Megha Engineering, est en construction, et les quatre autres sont différés et pourraient être annulés.[15]

9.9. Les tendances du marché sont

L'augmentation de la taille des projets afin de réduire les coûts : 377 MW pour Ivanpah (tours solaires), production estimée : 1 079 GWh/an ; 280 MW (944 GWh/an) pour Solana (miroirs cylindro-paraboliques) ; 100 MW pour Rajasthan Sun Technique (miroirs de Fresnel, Areva) ; des projets de 500 MW sont en cours de développement (projets de centrales à tours de Palen SEGS et HiddenHills, par Bright Source Energy)[16];

le développement des systèmes de stockage, qui deviendra la norme à l'avenir ; ainsi, la centrale américaine de Crescent Dunes (110 MW) a un système de stockage à sels fondus permettant de produire la nuit ou lors des pointes de demande pendant une durée de dix heures, la centrale sud-africaine de Bokpoort (50 MW) a neuf heures de stockage, celle de Solana six heures et celle de Noor 1 au Maroc (160 MW) de trois heures[16].

En France, Alba Nova 1, située en Corse, était la première centrale solaire thermodynamique d'envergure à avoir obtenu en 2011 un permis de construire depuis plus de 30 ans¹⁰. Sa construction est gelée en 2016 suite à la mise en faillite de son constructeur Solar Euromed[16]

Dans les pays en développement, trois projets de centrales solaires thermodynamiques mixtes (solaire + gaz) financés par la Banque mondiale, en Égypte, au Mexique et au Maroc ont été approuvés en 2007[16].

10. Gisement solaire

Le gisement solaire de l'Algérie est parmi les trois meilleurs gisements dans le monde :

La qualité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde, a révélé mercredi Mouloud Bakli, Director Solar Business à Air Liquide, leader mondial des gaz, technologies et services pour l'industrie et la santé.

Ce cadre algérien et expert des énergies renouvelables qui fait le bonheur de cette multinationale a appelé les autorités publiques à renforcer leurs efforts d'investissements dans le développement de l'énergie solaire. A l'occasion du séminaire international sur les technologies du solaire photovoltaïque organisé à Bordj Bou Arreridj par le groupe privé algérien Condor Electronics, cet expert algérien a réclamé aux autorités algériennes de se lancer dans la veille technologique pour s'équiper des technologies les plus évolutives dans ce secteur où la concurrence mondiale est de plus en plus féroce. « En 2014, l'énergie solaire a réussi à dépasser l'énergie éolienne. Pour la première fois aussi, le coût d'exploitation de cette énergie a beaucoup baissé. C'est une chance unique de développer le potentiel de l'Algérie », a estimé cet expert qui est revenu sur des expériences internationales menées en Malaisie, Chine et même au Maroc. Des expériences concluantes qui peuvent inspirer l'Algérie.

De son côté, le président du conseil d'administration de Condor, Abdelmalek Benhamadi, a réclamé aux autorités algériennes de faire confiance aux panneaux solaires qui sont fabriqués par son unité de production située à Bordj Bou Arreridj. « Nous demandons uniquement d'être traité sur le même pied d'égalité que ces entreprises étrangères qui décrochent nos marchés nationaux. En 2014, une loi a été promulguée pour autoriser la Sonelgaz d'acheter de l'électricité produite par les installateurs et producteurs de l'énergie solaire. Nous sommes donc prêts à investir dans des fermes solaires si Sonelgaz s'engage à racheter notre électricité », affirme le manager de Condor qui a déjà consenti à 10 millions d'euros pour lancer son usine. « Un investissement que nous sommes prêts à renforcer. Nous sommes prêts à mobiliser 200 millions d'euros pour développer la production des panneaux solaires si nous avons un plan de charges convenables et des commandes publiques », assure Abdelmalek Benhamadi qui croit dur comme fer en l'avenir de l'énergie solaire en Algérie. Un avenir qui ne pourrait être radieux si les autorités algériennes boudent les producteurs nationaux car pour l'heure, les panneaux solaires fabriqués en Algérie par Condor ont toujours du mal à trouver des preneurs. Et la Sonelgaz n'a pas affiché encore le moindre intérêt[17].



Figure I- 6 : Centrale Thermique[4].

Conclusion

L'énergie solaire est de plus en plus utilisée. Cependant, devons-nous vraiment développer cette énergie ?

Son point fort est qu'elle ne pollue pas mais n'oublions pas son principal problème : elle est disponible uniquement le jour. Même si certains systèmes permettent de produire quelques heures après le coucher du soleil, le stockage électrique est encore trop peu efficace pour que le soleil puisse être utilisé comme unique source d'électricité.

De plus, l'énergie solaire ne pourra jamais réellement servir aux transports (du moins dans un futur proche), qui sont la principale cause de pollution atmosphérique.

Notons que les systèmes passifs n'engagent que peu d'intérêt car en plus d'avoir toujours existé, ils ne nécessitent pas d'investissements massifs: seul un petit surcoût est nécessaire à la construction. Cependant, leur efficacité est moins importante que celle des systèmes actifs.

Chapitre 2 : L'étude Thermodynamiques

Introduction

De nos jours, l'homme a à sa disposition sur la Terre de nombreuses sources d'énergie. Les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, pétrole, gaz) car non renouvelables et issues d'un long processus de transformation de la matière organique, parce qu'elles sont faciles à exploiter, et rentables. Cependant, pour différentes raisons, il s'avère que ces énergies ne peuvent plus être utilisées. Tout d'abord, les réserves d'énergie fossiles commencent à s'amoinrir. Ensuite, en raison de la très forte demande en provenance des pays en voie de développement comme la Chine et l'Inde pour ne pas les citer, les prix de ces énergies ne cessent d'augmenter, les rendant inabordables pour certaines personnes. Et puis, lors de leur utilisation, ces énergies émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, notamment) qui participent fortement au réchauffement planétaire, qui devient un problème grandissant pour la Terre et les êtres vivants.

De nombreuses énergies non polluantes, ou renouvelables, ou abondantes partout à la surface du globe pourraient pourtant être utilisées par l'homme. Entre autres, on distingue l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire. Mais l'énergie éolienne n'est pas assez rentable, au sens qu'elle ne permet pas de produire beaucoup d'énergie par unité de surface. L'énergie nucléaire, même si elle a un fort rendement, produit des déchets très polluants et peu dégradables. De plus elle fait peur en raison des graves accidents qui peuvent se produire (catastrophe de Tchernobyl), et en raison du risque de prolifération nucléaire. L'énergie hydroélectrique a un bon rendement mais, un fort impact écologique et humain, n'est pas disponible partout, et la plupart des espaces qui lui sont propices sont déjà saturés de barrages. La production d'électricité dans les tours solaires suit le même principe que les autres transformations de chaleur en électricité (centrales thermiques, centrales nucléaires...). On transforme la chaleur en énergie mécanique, sous la forme d'un gaz porté à haute température et haute pression qui fait tourner une turbine. Puis cette énergie mécanique est transformée en électricité : la turbine entraîne un alternateur. Pour que le système ait un bon rendement, il est indispensable d'obtenir des hautes températures pour chauffer le gaz. Les capteurs solaires, même sous vide, ne permettent pas d'atteindre les très hautes températures nécessaires. Le principe d'une centrale

solaire va donc être de concentrer les rayons solaires vers un point, comme on le fait avec une loupe pour enflammer un bout de papier. La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

Mais comment exploiter au mieux cette énergie? Et quels sont les enjeux liés à son utilisation?

Ce chapitre présente deux parties dont la première on détermine le principe de fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique ainsi ses différents types, et une deuxième partie qui représente un volet qui décrit la turbine à vapeur, ses composantes et sa maintenance.

Partie I : Centrale solaire thermodynamique

1. Définition des centrales solaires

Rappelons que la plupart des grandes centrales électriques (nucléaire, à charbon etc.) fonctionne selon le même principe : l'énergie thermique produite par une combustion (pétrole, charbon...) ou par fission nucléaire permet de transformer l'eau en vapeur ou de faire monter des gaz à très haute température et donc, selon la loi des gaz parfaits, à très haute pression. La différence de pression permet alors d'actionner des turbines ou des pistons ; ceux-là font ensuite tourner un générateur électrique qui crée donc du courant. Le rendement final est d'autant plus élevé que la chaleur fournie au départ est à haute température. Un projet ambitieux qu'ont eu les européens est de créer une usine sur ce principe sans utiliser de carburant. Après tout, c'est grâce au soleil qu'il fait une température vivable sur terre.

Alors pourquoi ne pas se servir directement de cette chaleur pour faire évaporer de l'eau et actionner des turbines, la place de brûler du fioul cher et de plus en plus rare ?

Il a fallu attendre les années 70 et 80 avant la création des premières centrales solaires électriques expérimentales. Le principe est de concentrer les rayons solaires vers un unique

point afin de créer de hautes températures et ainsi produire de l'électricité grâce à un système tel que décrit ci-dessus.

Les trois principaux types de centrales solaires thermiques se distinguent surtout par la manière dont on focalise les rayons solaires.

- Les collecteurs cylindro-paraboliques, qui sont de longs miroirs cylindriques qui concentrent les rayons sur un tuyau dans lequel un liquide est chauffé.
- Les centrales à tour, sortes de lampadaires entourés d'un champ de miroir orientables situés sur le sol (les héliostats) qui renvoient les rayons solaires vers le haut de la tour où est installée une chaudière.
- Les collecteurs paraboliques qui ressemblent à nos antennes de TV, dirigés en permanence vers le soleil et concentrent les rayons vers le point focal de cette parabole.

Il existe aussi plusieurs centrales photovoltaïques, composées d'un champ de panneaux solaires photovoltaïques dont le but est également de produire de l'électricité.

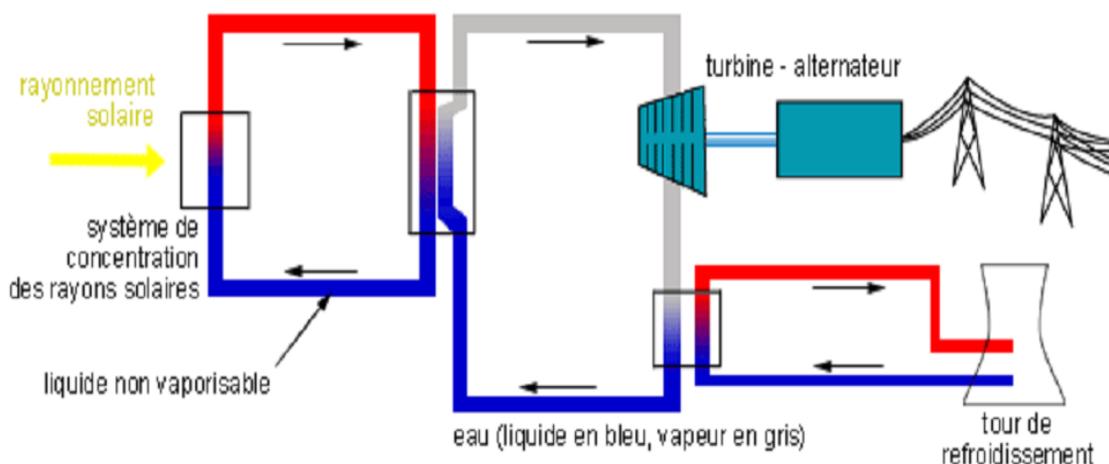


Figure II- 1 : Schéma d'une centrale solaire[4].

2. Principe de fonctionnement

Le soleil peut être considéré comme un corps noir dont la surface est à une température d'environ 5780

K. Dans ces conditions, il émet par rayonnement un flux calculable par la loi de Stefan–Boltzmann et d'environ 64.5 millions de watts par mètre carré. Par conservation de ce flux émis dans l'espace, le disque terrestre, situé à une distance moyenne de 150 millions de km, intercepte un flux moyen de 1360 W/m^2 au sommet de l'atmosphère. Une partie du rayonnement étant réfléchi ou absorbé par celle-ci, la valeur moyenne est d'environ 1000 W/m^2 à la surface de la Terre. Le rayonnement incident au sol est scindé en deux composantes: celle qui provient directement du disque solaire, c'est le rayonnement direct, et celle qui provient de la diffusion du rayonnement par les nuages ou les aérosols, c'est le rayonnement diffus[18].

On désigne par centrale solaire thermodynamique à concentration (ou centrale héliothermodynamique) une centrale générant de l'électricité à partir du rayonnement solaire incident direct et concentré par le biais d'un dispositif optique. La concentration du rayonnement direct permet de convertir l'énergie électromagnétique rayonnée en chaleur à haute température (énergie thermique), puis en énergie mécanique grâce à un cycle thermodynamique (généralement un cycle de Rankine), et enfin en énergie électrique au moyen d'une génératrice. La chaleur résiduelle du cycle thermodynamique peut éventuellement être valorisée. Un stockage d'énergie sous forme thermique peut également être mis en œuvre, ce qui constitue le principal avantage de ce type de centrale solaire.

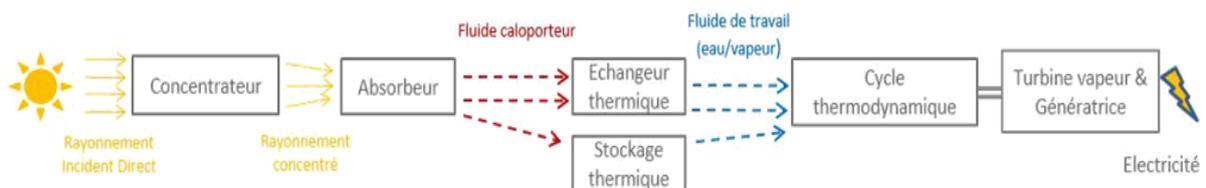


Figure II- 2 : Schéma de principe du fonctionnement d'une centrale CSP[4].

Le concentrateur est un miroir, ou un ensemble de miroirs qui concentre le rayonnement du soleil sur l'absorbeur (appelé aussi récepteur) dans lequel circule le fluide dont la chaleur est utilisée dans le cycle thermodynamique. Le fluide de travail du cycle est de l'eau dans la majorité des centrales.

L'ensemble concentrateur-récepteur constitue le capteur solaire. D'un point de vue pratique, on désigne par champ solaire l'ensemble des capteurs solaires de la centrale.

On distingue trois principales filières de centrales à concentration, chacune correspondant à un type de capteur solaire:

- Les technologies à capteurs linéaires : le fluide caloporteur circule dans des tubes absorbeurs horizontaux sur lesquels le rayonnement solaire est concentré;
- Les technologies à tour : le rayonnement est concentré sur un récepteur central au moyen d'héliostats;
- Les autres technologies, dont les unités parabole-moteur : une unique parabole concentre le rayonnement sur le récepteur d'un moteur, généralement Stirling, situé au point focal.

3. Les types des centrales thermodynamiques

3.1. La filière des centrales à capteurs linéaires

Cette filière regroupe les technologies utilisant des capteurs répartis linéairement, c'est à dire étalés horizontalement sur de longues distances. Le fluide caloporteur circule dans des tubes absorbeurs dans lesquels il chauffe au fur et à mesure de son écoulement, puis est acheminé vers la partie de la centrale où se situent le cycle thermodynamique et la génération d'électricité.



Figure II- 3 :Vue aérienne des capteurs solaires de la centrale cylindro-parabolique de Shams à Abu Dhabi. (Source :Shams Power group).

On distingue deux technologies au sein de cette filière : les centrales à capteurs cylindro-paraboliques et les centrales à capteurs linéaires de Fresnel.

3.1.1. Les centrales cylindro-paraboliques

Cette technologie (désignée parfois par PT pour *Parabolic Trough*) est considérée comme étant la plus mature aujourd'hui, principalement grâce au retour d'expérience des centrales SEGS en Californie raccordées au réseau depuis plus de 20 ans. La conséquence de cette maturité est que la grande majorité des centrales commerciales en opération ou en projet de nos jours fonctionne avec cette technologie. Le dernier exemple marquant en date est l'inauguration en mars 2013 de la centrale Shams 1 à Abu Dhabi aux Émirats arabes unis. Cette centrale, d'une capacité unitaire de 100 MWe, utilise de l'huile synthétique comme fluide caloporteur et dispose d'un bloc de puissance auxiliaire (brûleurs à fuel) en guise d'appoint pour les périodes de faible ensoleillement[19].

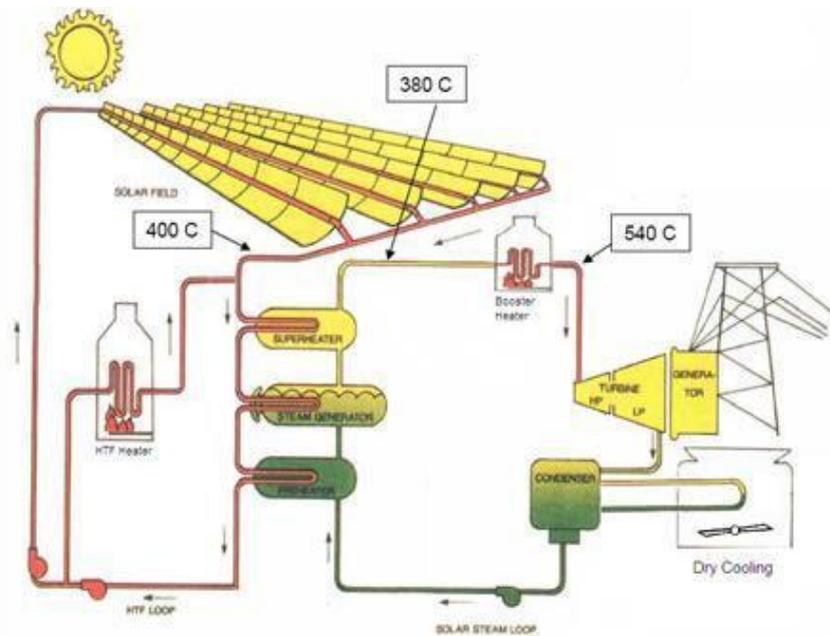


Figure II- 4 : Schéma de principe de la centrale Shams 1. (Source : Shams Power group).

L'huile synthétique provenant du champ solaire échange sa chaleur avec de l'eau ou de la vapeur d'eau au sein d'un échangeur étagé en trois sections : une section de préchauffage où l'eau est chauffée jusqu'au point de vaporisation, puis une section de vaporisation où l'eau est transformée en vapeur, et enfin une section de surchauffe où la vapeur est chauffée au-delà de la température de saturation. Après un éventuel appoint thermique fossile, la vapeur haute pression et haute température est ensuite détendue dans une turbine commerciale couplée à une génératrice.

Une section de capteur cylindro-parabolique est constituée d'un miroir de forme parabolique et d'un tube absorbeur disposé au niveau de sa ligne focale.

Les capteurs cylindro-paraboliques sont montés sur un système de suivi du soleil relativement simple, car sur un seul axe, orienté Nord-Sud ou Est-Ouest. Les champs solaires orientés Nord-Sud présentent des performances optiques plus variables selon les saisons, avec une efficacité maximale durant l'été et plus faible en hiver. L'orientation Est-Ouest est caractérisée par moins de variations saisonnières, mais récolte moins d'énergie annuellement que l'orientation Nord-Sud.

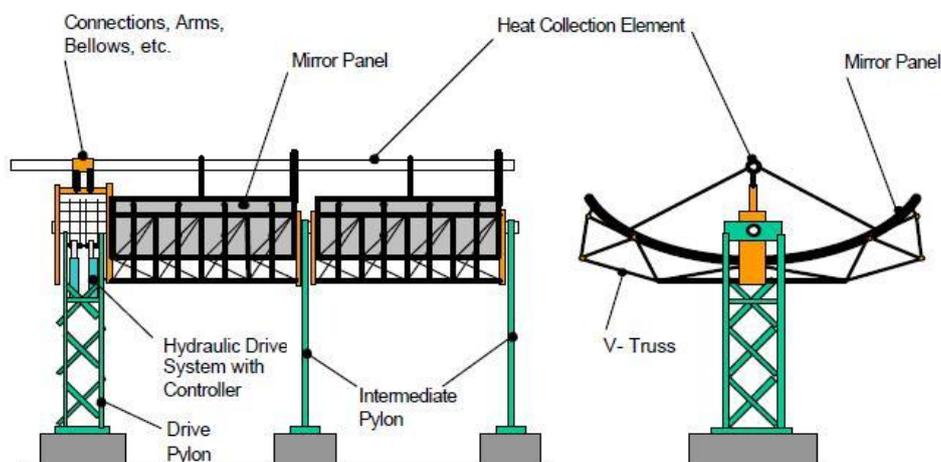


Figure II- 5 : Schématisation d'un capteur SEGS et de son système de support/suivi (source shams power).

— Le caloporteur huile

L'huile synthétique est le fluide caloporteur le plus utilisé actuellement dans les absorbeurs des centrales cylindro-paraboliques commerciales. Ses propriétés thermo hydrauliques sont intéressantes pour le transfert thermique dans les échangeurs huile/eau, mais possède quelques inconvénients, notamment son coût et sa nocivité pour l'environnement en cas de fuite.

De par son coût également élevé, c'est l'échangeur huile/eau qui représente le principal inconvénient de la technologie cylindro-parabolique à caloporteur huile.

— Caloporteur eau : la génération directe de vapeur

Bien qu'ayant un potentiel important de réduction des coûts de construction et d'exploitation par rapport aux centrales PT à huile, la génération directe de vapeur (ou DSG pour *Direct Steam Generation*) dans les capteurs cylindro-paraboliques n'est à ce jour utilisée que dans une

seule centrale commerciale, la centrale TSE-1 en Thaïlande. Cette centrale de 5 MWe a été inaugurée en 2012, et a été développée par la société allemande Solarlite. D'autres projets de construction de centrales similaires en Thaïlande sont en cours actuellement[19].

La DSG consiste à utiliser le fluide de travail du cycle thermodynamique également comme fluide caloporteur: la vapeur d'eau est générée directement dans le champ solaire de la centrale, ce qui supprime le circuit huile et les échangeurs eau/huile coûteux. La difficulté de cette technologie réside dans les conditions de haute pression et haute température nécessaires au turbinage du fluide, ainsi qu'à la présence d'un écoulement diphasique dans les tubes absorbeurs. Nous présenterons la DSG de manière détaillée dans le chapitre qui lui est consacré.

— Les sels fondus

Des équipes de recherche de l'Agence italienne pour la Recherche sur l'Energie (ENEA) étudient actuellement l'utilisation de sels fondus comme fluide caloporteur dans les capteurs cylindro-paraboliques. Dans le cadre du projet Archimede, une centrale utilisant les sels fondus à la fois comme fluide caloporteur et fluide de stockage est en phase de démonstration sur le site de ENEL, à Priolo Gargallo en Sicile.

3.1.2. Les centrales à réflecteurs linéaires de Fresnel :

Cette technologie, désignée par l'acronyme LFR (pour *Linear Fresnel Reflector*) est la deuxième déclinaison possible de la filière des centrales à capteurs linéaires. Un ensemble de miroirs plans disposés de manière horizontale concentre le rayonnement sur un ou plusieurs récepteurs situés au-dessus du champ solaire.

Le nom de cette technologie fait référence au principe de la lentille de Fresnel, permettant d'obtenir une courte distance focale sans le poids et le volume élevés d'une lentille classique. Le jeu de miroirs plans joue en quelque sorte le rôle d'une lentille de Fresnel.

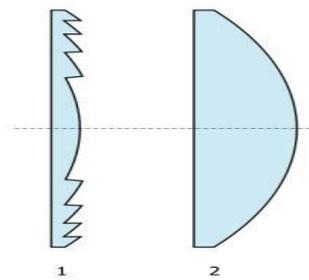


Figure II- 6 :Schéma en coupe d'une lentille de Fresnel (1) et de sa lentille pleine équivalente (2)
(source : Wikipedia, article "lentille de Fresnel").

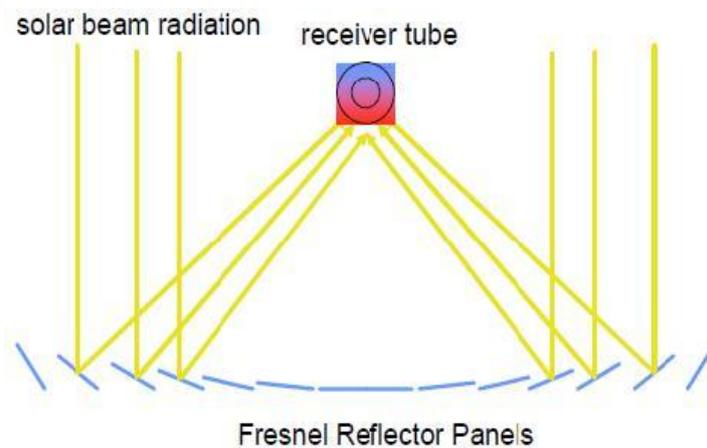


Figure II- 7 : Schéma de principe d'un LFR(source : Wikipedia, article "lentille de Fresnel")..

La configuration du récepteur utilisée dans les LFR peut varier, mais elle inclue souvent un réflecteur secondaire permettant de concentrer davantage le rayonnement, et d'un ou plusieurs tubes absorbeurs. La technologie présente plusieurs avantages par rapport à la technologie cylindro-parabolique :

Un jeu de miroirs plans remplace le concentrateur parabolique : la fabrication est donc plus simple et moins coûteuse ;

La position fixe du récepteur se prête mieux à l'utilisation de la génération directe de vapeur
L'utilisation de l'espace au sol est optimisée.

Les travaux de Mills ont permis d'introduire le concept de réflecteur linéaire de Fresnel compact (CLFR).

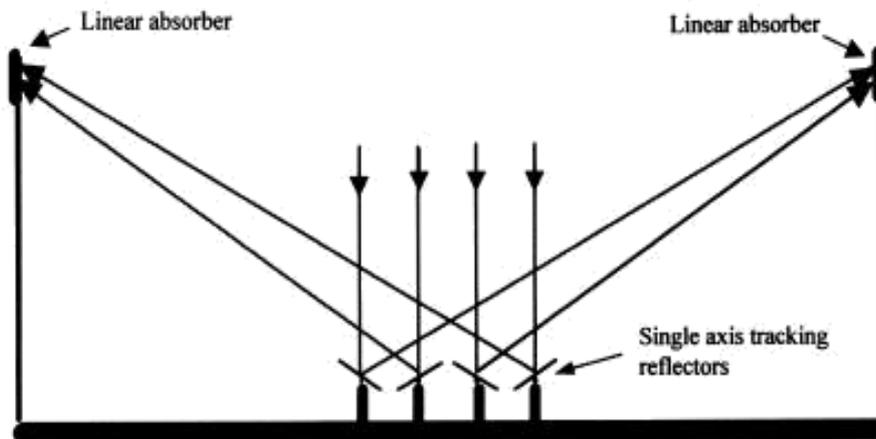


Figure II- 8 : Schéma de principe d'un CLFR (source : Wikipedia, article "lentille de Fresnel").

Le principe est de disposer plusieurs récepteurs au-dessus du champ solaire au lieu d'un seul. La multiplication des lignes focales permet d'optimiser le suivi du soleil et donc la concentration, en réduisant notamment les effets d'ombre.

La technologie des réflecteurs linéaires de Fresnel est très jeune, elle n'est entrée que récemment dans sa phase de commercialisation. La centrale PuertoErrado 1 située dans la région de Murcia en Espagne fut en 2009 la première centrale LFR au monde à être raccordée au réseau électrique. D'une capacité de 1.4 MW électrique, elle fut suivie en 2012 de PuertoErrado 2 d'une capacité de 30 MWe.



Figure II- 9 : Vue de la centrale PE2 (source : Novatec Solar).

3.2. La filière des centrales à tour

La centrale à tour consiste en un champ de miroirs, appelés héliostats, qui concentrent le rayonnement solaire sur le récepteur d'une tour située au sud ou au centre du champ solaire. La concentration atteinte avec ce dispositif est plus élevée qu'avec une configuration à capteurs linéaires, ce qui permet d'atteindre des températures plus élevées pour les fluides de transfert, entre 200°C et 1000°C. Les héliostats sont des miroirs plans montés sur des supports qui suivent la course du soleil selon deux axes : l'axe azimutal et l'axe d'élévation. Le suivi du soleil est donc plus complexe et coûteux à mettre en œuvre[19].

Cette filière comporte également plusieurs technologies différentes, selon le type de fluide caloporteur utilisé.

3.2.1. Centrales à caloporteur sels fondus

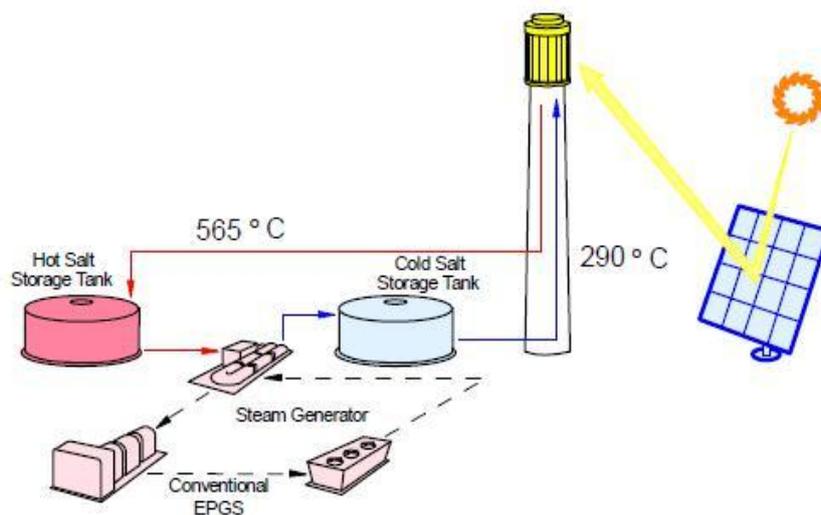


Figure II- 10 : Schéma de principe des centrales à caloporteur sels à stockage direct(source : Novatec Solar)..

Avec cette technologie, le sel liquide sert à la fois de fluide caloporteur et de fluide de stockage. La multiplication des héliostats permet de produire ponctuellement de la chaleur en excès par rapport à la demande électrique et de la stocker dans le réservoir chaud de la centrale. Le sel fondu étant chauffé plus fortement que dans les capteurs linéaires, la différence de température entre les réservoirs chaud et froid est plus élevée et la quantité de fluide pour stocker la même quantité d'énergie est donc moindre.

L'état de l'art de cette technologie est représenté par la centrale commerciale Gemasolar (également nommée Solar Tres) construite par la société TorresolEnergy et inaugurée en

Andalousie en 2011. Cette centrale fournit 19.9 MW électriques et a hérité de l'expérience acquise sur les projets THEMIS en France, et Solar One et Solar Two aux États-Unis. Gemasolar dispose d'un champ de 2650 héliostats répartis à 360°C autour de la tour sur une surface de 185 hectares. Elle dispose de réservoirs de stockage permettant d'assurer 15 heures de production sans ensoleillement[19].



Figure II- 11 : Vue de la centrale Andalouse Gemasolar (source : TorresolEnergy).

3.2.2. Centrales à caloporteur eau/vapeur :

Comme pour la filière à capteurs linéaires, la génération directe de vapeur dans les centrales à tour permet de s'affranchir d'un échangeur thermique fluide caloporteur/fluide de travail. L'eau est vaporisée dans le récepteur de la tour et utilisée directement dans le cycle thermodynamique, avec éventuellement un stockage tampon de faible quantité. La génération de vapeur surchauffée permet d'une part d'utiliser des turbines plus compactes et moins coûteuses que pour de la vapeur saturée[20], et d'autre part de travailler proche de l'efficacité maximale. La surchauffe engendre cependant les mêmes problèmes de forts gradients thermiques dans les récepteurs que dans les technologies à capteurs linéaires. Les centrales commerciales espagnoles (PS10 et PS20) qui furent les premières à être raccordées au réseau (respectivement en 2007 et 2009) utilisent la génération de vapeur saturée.



Figure II- 12 : Vue de la centrale PS20 (source : Abengoa Solar).

Le projet américain Ivanpah actuellement en cours de réalisation prévoit la mise en service dans le désert de Mojave de trois unités de production utilisant de la vapeur surchauffée, pour un total de 377 MW électriques produits[21].



Figure II- 13 : Vue d'une unité de la centrale Ivanpah (source : Ivanpah Solar).

3.2.3. Centrales à caloporteur air

La configuration est semblable à celle des tours à caloporteurs sels, mais le fluide utilisé est de l'air à pression atmosphérique chauffé dans un récepteur volumétrique poreux. Le récepteur à air rend l'inertie thermique de la centrale assez faible, ce qui facilite des démarrages rapides. Cependant, et même si le design est globalement relativement simple, cette technologie souffre du manque de développement de récepteurs performants, ce qui

aboutit à un rendement final assez faible. Il n'existe pas à notre connaissance de centrales commerciales à tour utilisant cette technologie. Seules des installations expérimentales ont été exploitées, notamment à PSA par le DLR et le CIEMAT .

3.3. Les unités parabole-moteur

Une unité parabole-moteur est constituée d'un concentrateur parabolique, un récepteur situé au point focal, et d'un moteur. L'ensemble du dispositif dispose d'un tracking altazimutal. C'est généralement un moteur Stirling qui est utilisé, on parle alors d'unité parabole-Stirling. Une unité ne peut produire qu'une faible puissance électrique (de l'ordre de quelques dizaines de kW) mais possède le meilleur rendement solaire-électrique parmi les différentes technologies CSP existantes. Cette technologie est relativement chère et difficilement compatible avec le stockage thermique et l'hybridation, mais ses partisans affirment que son coût baissera avec une production à l'échelle industrielle.

Il n'existe pas aujourd'hui de centrale commerciale de ce type en fonctionnement. La *MaricopaSolarPlant*, située en Arizona a été démantelée en 2011. D'une capacité de 1.5 MWe, la centrale comptait 60 unités parabole et a été exploitée entre 2010 et 2011 [22].



Figure II- 14 : Vue de la centrale Maricopa (source : Tessera Solar).

4. Le stockage thermique

Le stockage de chaleur est un des principaux avantages du solaire thermodynamique à concentration par rapport au solaire photovoltaïque ou à l'éolien. La capacité à délivrer une production électrique même en cas de passage nuageux ou durant la nuit permet d'adapter potentiellement cette technologie à des climats plus exigeants, pourvu que l'ensoleillement soit suffisant.

Le stockage thermique est toujours actuellement dans sa phase de recherche et développement, et il n'existe pas encore véritablement de technologie « standard » ou disponible « sur étagère ».

On peut classifier les technologies de stockage de différentes façons, nous les distinguons ici selon le type de chaleur stockée.

4.1. Le stockage par chaleur sensible

Dans le cas d'un stockage indirect, ce type de stockage consiste à utiliser le fluide caloporteur en sortie du champ solaire pour chauffer un matériau, classiquement solide ou liquide, et ainsi disposer d'un « réservoir » de chaleur. Au moment du besoin en déstockage, il suffit de faire circuler le fluide caloporteur plus froid dans le stockage pour que le matériau restitue la chaleur. Les centrales cylindro-paraboliques Andasol espagnoles utilisent ce dispositif et disposent d'un stockage de 7.5 heures. Il s'agit d'une configuration comportant un réservoir chaud et un réservoir froid, contenant généralement un mélange de sels liquides (60% de nitrate de sodium et 40% de nitrate de potassium). Lors des phases de stockage, le fluide est pompé du réservoir froid, chauffé dans un échangeur par le fluide caloporteur, puis envoyé dans le réservoir chaud. La circulation s'inverse lors des phases de déstockage[23].

La configuration du stockage direct est plus simple : il s'agit d'utiliser le fluide caloporteur également comme fluide de stockage. Le fluide caloporteur est chauffé dans le champ solaire puis dirigé vers des réservoirs où il est stocké. Le stockage le plus performant de ce type en termes de nombre d'heures de production est celui de la centrale à sels fondus Gemasolar située en Andalousie. Le stockage permet 15 heures de production à charge nominale sans ensoleillement, ce qui fait de Gemasolar la seule centrale commerciale pouvant produire 24h/24h.

Le stockage par chaleur sensible est la technologie la plus aboutie à ce jour, et la plus largement utilisée. Son rendement (proportion d'énergie récupérée par rapport à l'énergie stockée) par cycle est supérieur à 95%. Ce type de stockage est intéressant pour une utilisation dans les centrales à tour et l'est moins avec les centrales à capteurs linéaires. En effet, dans une centrale à tour, la différence de température du fluide caloporteur entre l'entrée et la sortie du récepteur est plus importante que dans une centrale cylindro-parabolique[23]

4.2. Le stockage par chaleur latente

Cette technologie utilise un matériau de stockage dont la température de changement de phase est située entre la température d'entrée et la température de sortie du fluide caloporteur dans le champ solaire. De cette façon, on peut exploiter la chaleur latente du matériau lorsqu'il va changer de phase grâce à un échangeur thermique et au fluide caloporteur. Le changement de phase du matériau de stockage est généralement solide-liquide, car la variation de volume est faible par rapport à une transition liquide-gaz, même si la capacité de stockage est plus forte dans ce cas.

La capacité volumique de stockage par chaleur latente est plus élevée qu'avec la chaleur sensible, ce qui la rend avantageuse. Le fait que la transition de phase se fasse à température constante (imposée par le matériau) est également un avantage.

La chaleur stockée (dans le cas d'une transition solide-liquide) est donnée par la relation :

$$E_{latent} = m\Delta H_{S-L} \text{ ou } \Delta H_{L-G}$$

4.3. Le stockage thermochimique

Le stockage chimique de la chaleur rassemble plusieurs voies possibles. Le stockage thermochimique est séparé par Bales en (2008) ; les procédés de sorption d'une part, et en réactions thermochimiques d'autre part. La sorption peut être définie comme un phénomène de fixation ou de capture d'un gaz ou vapeur par une substance à l'état condensé (solide ou liquide) appelé sorbant. Le phénomène de sorption peut être thermo-physique ou thermo-chimique. Le terme sorption est un terme général comprenant l'adsorption et l'absorption. L'absorption est définie comme un phénomène dans lequel un liquide ou un gaz pénètre un solide ou un liquide, mais considérant les applications pour le stockage, ce terme fait souvent référence à l'absorption d'un gaz par un liquide. De la même manière, l'adsorption désigne généralement un phénomène de liaison d'un gaz sur la surface d'un solide ou d'un matériau poreux, alors qu'une définition plus générale réfère à la fixation d'un gaz ou d'un liquide à la surface d'une autre substance.

L'adsorption est séparée en deux types: l'adsorption physique (physisorption) et l'adsorption chimique (chimisorption ou réaction chimique solide-gaz). Les procédés de chimisorption offrent des chaleurs de sorption plus élevées que la physisorption mais peuvent être irréversibles.

5. Les centrales hybrides solaire/combustible

Nous traitons dans ce paragraphe uniquement les configurations d'hybridation utilisées dans les centrales commerciales actuelles ou en construction, et ne mentionnons pas les concepts marginaux.

On peut considérer que deux concepts existent en matière d'hybridation : le concept des centrales solaires utilisant un appoint thermique provenant d'un combustible fossile, et le concept des centrales thermiques fossiles (typiquement du charbon) utilisant un champ solaire en guise d'appoint thermique.

En ce qui concerne le premier concept, il s'agit d'assurer le fonctionnement du cycle thermodynamique en continuant à produire de la vapeur la nuit où lors de passages nuageux importants, et ce lorsque la centrale CSP ne dispose pas de stockage. Pour les centrales cylindro-paraboliques par exemple, il s'agit d'intégrer au circuit un brûleur à combustible fossile pour remplacer le champ solaire en chauffant l'huile caloporteuse. L'appoint fossile peut également être utilisé sur le fluide de travail, en surchauffant la vapeur pour atteindre une meilleure efficacité du cycle. La centrale Shams 1 utilise ces deux technologies d'appoint fossile.

Le deuxième concept d'hybridation permet aux centrales thermiques de réduire leur consommation de combustible fossile. Le champ solaire est utilisé pour préchauffer l'eau des centrales à cycle combiné, on parle alors de système ISCC (*Integrated Solar Combined Cycle*), ou bien pour produire directement de la vapeur qui sera ajoutée à celle produite par les brûleurs fossiles. La centrale à charbon australienne de Kogan Creek, actuellement en construction, utilisera cette technologie d'hybridation. Les récepteurs linéaires de Fresnel généreront de la vapeur surchauffée qui sera détendue dans les étages intermédiaires de la turbine, tandis que les brûleurs à charbon généreront de la vapeur à l'état supercritique utilisant les étages haute pression de la turbine.

6. Etat actuel du parc CSP et perspective

D'après[24], la puissance installée mondiale des centrales opérationnelles est d'environ 4 GW électriques. Un chiffre plus récent mentionne une puissance installée d'environ 5 GWe à la fin de l'année 2015[25]. À la fin de l'année 2013, d'après[26], [27], les centrales CSP espagnoles

représentaient 78% de ce parc mondial (d'environ 2600 MWe) et les centrales américaines 21%.

D'autres pays possèdent des centrales CSP en exploitation ou en construction, notamment l'Inde, l'Afrique du Sud, la Chine, le Maroc, Israël, l'Italie, l'Iran, l'Australie, l'Algérie, la Chine, l'Égypte, les Émirats arabes unis et la France.

Précisons que les quelques chiffres donnés ici excluent les centrales de démonstration, les prototypes de recherche et développement, ainsi que les installations solaires hybridant les centrales thermiques fossiles ou alimentant en vapeur des procédés chimiques industriels.

Au travers de son scénario « hi-Ren » du rapport de 2014 (et 2010) [24], [28] sur les perspectives du solaire thermodynamique concentré, l'Agence Internationale de l'Energie estime qu'avec un soutien approprié de ses programmes de recherche et développement, le CSP pourrait représenter 11% de la production mondiale d'électricité en 2050.

7. Vers la génération directe de vapeur pour la filière cylindro-parabolique et dans les récepteurs linéaires de Fresnel

Les centrales CSP utilisant de la vapeur d'eau en tant que fluide de travail du cycle thermodynamique (hormis les centrales à cycle organique), il apparaît alors évident de considérer la génération directe de vapeur comme possible configuration.

La DSG a d'abord été envisagée dans les centrales à tour au début des années 80. Le prototype américain Solar One, a fonctionné entre 1982 et 1986 et produisait de la vapeur surchauffée à 100 bar et 516°C. Des problèmes récurrents liés principalement à la surchauffe ont conduit au choix des sels fondus comme fluide caloporteur pour la conversion de Solar One en Solar Two. Plusieurs projets de recherche, notamment à l'institut Israélien Weizmann, ont connu de meilleurs résultats en produisant de la vapeur saturée, ce qui a finalement conduit les concepteurs des premières centrales à tour commerciales, PS10 et PS20, à faire ce choix technologique[29].

En parallèle de ces études sur la DSG dans la filière à tour, des programmes de recherche et développement sur la DSG applicable à la filière cylindro-parabolique ont démarré au début des années 90. Ces programmes, principalement mis en œuvre par le DLR et le CIEMAT et dont nous discuterons en détail dans un autre chapitre, visent à étudier et résoudre les

problèmes liés à la DSG dans les tubes absorbeurs des centrales et démontrer sa faisabilité. De par la simplicité relative de la configuration des récepteurs de Fresnel, c'est finalement avec la filière LFR que la génération directe de vapeur dans les capteurs linéaires trouve une application commerciale. De petites sociétés comme Novatec Solar (Allemagne, aujourd'hui Frenell), Solar Power Group (Allemagne) ou Solar Euromed (France) utilisent comme base les travaux plus ou moins avancés du DLR pour se lancer dans la commercialisation de ce type de centrale. Certaines études ont en effet démontré une réduction significative du coût normalisé de l'électricité par rapport à une configuration à huile (ou LEC pour *Levelized Electricity Cost*, également désigné par LCOE pour *Levelized Cost of Electricity*), jusqu'à 11% [30], [31]. Précisons que le LEC est l'indicateur économique couramment utilisé pour l'analyse des centrales solaires thermodynamiques. Il est généralement donné en c€/kWh et représente le rapport de la valeur actualisée de la somme des coûts annuels d'investissement, d'exploitation et maintenance, et du combustible (pour les centrales hybrides), sur la production électrique annuelle.

Les centrales CSP à linéaires de Fresnel sont aujourd'hui les plus nombreuses sur le marché commercial actuel (ou en construction) du CSP à génération directe de vapeur, bien qu'elles ne soient pas majoritaires en termes de puissance installée.

Partie II: Turbine à vapeur

Introduction

Une turbine est un dispositif rotatif destiné à utiliser la force d'un fluide (eau, vapeur, air, gaz de combustion) dont le couple est transmis au moyen d'un arbre. L'énergie du fluide, caractérisée par sa vitesse et son enthalpie est partiellement convertie en énergie mécanique pour entraîner un alternateur, une pompe ou tout autre récepteur mécanique rotatif.

Il existe plusieurs types de turbines à savoir turbine à vapeur, turbine hydraulique, turbine à gaz combustible, turbine à air.

1. Définition-Principes généraux de fonctionnement de la turbine à vapeur :

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit Clausius-Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état

affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau .Ce cycle comprend au moins les étapes suivantes:

- L'eau liquide est comprimée par une pompe et envoyée vers la chaudière
- La vapeur se détend dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique
- La vapeur détendue est condensée au contact de la source froide sous vide partiel. La turbine en constitue une évolution exploitant les principaux avantages des turbomachines à savoir:
 - Puissance massique et puissance volumique élevée
 - Rendement améliorée par la multiplication des étages de détente Le rendement croit avec la pression de la vapeur et avec la température de surchauffe. Cependant, l'augmentation de ces caractéristiques est limitée par la teneur en eau de la vapeur enfin de détente. En effet , la courbe de détente peut atteindre la courbe de saturation avec formation de gouttelettes qui nuisent à l'efficacité des derniers étages de détente. La teneur en eau liquide du mélange doit être limitée à 15 ou 20 pourcent in fine, c'est la pression dans le condenseur qui fixe de ce fait les pressions et température limites admissibles.

Afin d'augmenter la pression et la température malgré le problème de l'humidité en fin de détente, il est possible de renvoyer la vapeur détendue jusqu'à la saturation vers la chaudière pour procéder à une resurchauffe dans un échangeur supplémentaire.

Le cycle comprend fondamentalement deux changements d'état (évaporation et condensation). Le diagramme de phases de l'eau permet d'envisager un cycle à un seul changement d'état par l'utilisation d'une chaudière supercritique.

2. Réalisation pratique

Une turbine à vapeur est constituée d'un rotor comprenant un arbre sur lequel sont fixées des aubes et d'un stator constitué d'un carter portant des déflecteurs fixes, généralement constitué de deux parties assemblées selon un plan axial . Elle comprend en outre un tore d'admission segmenté et un divergent d'échappement dirigé vers le condenseur. La fonction des déflecteurs fixes est d'assurer tout ou partie de la détente en formant un réseau des tuyères et de modifier la direction de l'écoulement sortant de l'étage précédent .

Une turbine à vapeur comprend un ou plusieurs étages assurant chacun deux fonctions :

- La détente de la vapeur qui correspond à la conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique.
- La conversion de l'énergie cinétique en couple de rotation de la machine par le biais des aubages mobiles[32]

Les turbines à vapeur se classent en deux grandes catégories souvent combinées dans une même machine:

a. Turbine à action

La forme la plus simple de turbine à vapeur est la turbine à action, dans laquelle les jets sont fixés sur la partie intérieure de l'enveloppe de la turbine, et les ailettes placées sur le bord des roues tournantes montées sur un arbre central. La vapeur se déplaçant dans une tuyère fixe passe sur les ailettes incurvées, qui absorbent une partie de l'énergie cinétique de la vapeur dilatée, faisant ainsi tourner la roue et l'arbre sur lesquels elles sont montées. Cette turbine est conçue de manière à ce que la vapeur entrant par une extrémité de la turbine se dilate à travers une succession de tuyères jusqu'à ce qu'elle ait perdu la majeure partie de son énergie interne.

b. Turbine à réaction

Dans la turbine à réaction, une partie de l'énergie mécanique est obtenue par l'impact de la vapeur sur les ailettes. La partie la plus importante est obtenue par l'accélération de la vapeur lors de son passage dans la roue de la turbine, ou elle se dilate. Une turbine de ce type se compose de deux jeux d'ailettes, l'un fixe, l'autre mobile.

Ces ailettes sont disposées de telle façon que chaque paire joue le rôle de tuyère, à travers laquelle la vapeur se dilate lors de son passage. Dans, une faible quantité d'énergie thermique est convertie en énergie cinétique.vapeur se détend dans les aubes fixes, puis entraine les aubes mobiles disposées sur la roue ou le tambour de la turbine. Les ailettes d'une turbine à réaction sont en général montées sur un tambour, qui fait alors office d'arbre.

Les turbines à réaction nécessitent en général davantage d'étages que les turbines à action, Il a pu être démontré que, pour le même diamètre et la même gamme énergétique, une turbine à réaction a besoin de deux fois plus d'étages pour obtenir un rendement maximal. Les grosses turbines, qui sont généralement à action, utilisent une certaine réaction à la base du trajet de vapeur pour assurer en débit efficace à travers les auges. Nombre de turbines, qui sont

normalement à réaction, disposent d'un premier étage de commande d'impulsion, qui permet d'envisager la réduction du nombre total d'étages nécessaires. Les arbres des turbines de chaque étage sont reliés entre eux au moyen d'accouplements[33].

3. Les principaux composants des turbines à vapeur :

3.1. Alternateur

L'alternateur est une machine électrique du type génératrice à courant alternatif qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Il est entraîné par la turbine[34]

3.2. Transformateurs

3.2.1. Transformateur principal (TP)

L'évacuation de l'énergie produite par l'alternateur est évacuée sur le réseau haute tension à travers un transformateur principal élévateur : 13800V/63000V, un disjoncteur 63 KV (disjoncteur 52), trois câbles souterrains à pression d'huile et une ligne triphasée aérienne.

3.2.2. Transformateur de soutirage (TS)

Les auxiliaires du groupe sont alimentés à travers un transformateur de soutirage (TS) abaisseur : 13800V/6300V en service normal et un transformateur de démarrage (TD) abaisseur : 63000V/ 6300V en secours. [3]

3.3. Chaudière

Le rôle du générateur de vapeur est d'extraire l'énergie calorifique du combustible pour la céder à l'eau et produire de la vapeur à des paramètres fixés. Il constitue la source chaude du cycle thermodynamique. Cette vapeur sera utilisée par la turbine pour fournir de l'énergie mécanique. [3]

3.4. Condenseur

Afin de maximiser le rendement de la turbine à vapeur, la pression et la température de la sortie de vapeur doivent être aussi basses que possible. Pour cela, la vapeur qui sort de la turbine est dirigée vers le condenseur où elle est refroidie et condensée. Le condenseur est un échangeur de chaleur avec des milliers de tubes dans lesquels l'eau du circuit de

refroidissement circule. La vapeur circule sur les tubes et se condense au contact de ceux-ci. L'eau du circuit de refroidissement extrait alors la chaleur de la vapeur.[34]

3.5. Pompe alimentaire

La pompe KSB à très haute pression est une pompe a centrifuge multicellulaire. Elle comprend un corps d'aspiration, un corps de refoulement et un certain nombre d'étages ou de cellules assemblées par des tirants.

L'eau, provenant de la bache alimentaire à la pompe, possède une énergie de pression et une énergie cinétique qui seront augmentées dans les turbines en mouvement pour alimenter de vapeur (chaudière) en quantité nécessaires d'eau pour maintenir le niveau normal[34].

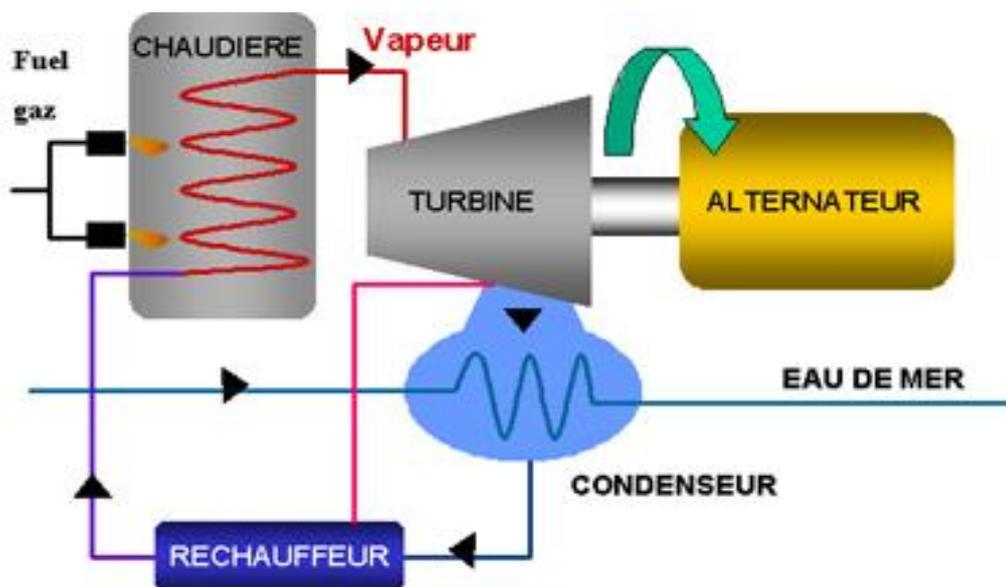


Figure II- 15 : Schéma de la turbine à vapeur. (source : Novatec Solar).

4. Fonctionnement

Bien que les turbines à vapeur soient construites selon deux principes différents (à action ou à réaction, leurs éléments essentiels sont similaires. Elles se composent de tuyères ou de jets, et d'ailettes. La vapeur s'écoule dans les tuyères, dans lesquelles elle se dilate. Ainsi, sa température diminue et son énergie cinétique augmente. La vapeur en mouvement exerce une pression contre les ailettes, entraînant leur rotation.

La disposition des jets et des ailettes, fixes ou stationnaires, dépend du type de turbine. À la sortie du dernier condenseur (échangeur thermique), l'eau peut être de nouveau vaporisée et surchauffée. L'eau ou la vapeur en sortie est alors ramenée vers la chaudière et la pompe alimentaire, qui compresse de l'eau à l'état liquide. Il s'agit d'une turbine auxiliaire intégrée au cycle thermodynamique de la turbine principale utilisant de la vapeur soutirée dans celle-ci. Les turbines à vapeur possèdent toutefois un équipement annexe, nécessaire à leur fonctionnement. Parmi celui-ci, un palier de tourillon supporte l'arbre et un palier de butée le positionne de manière axiale. Un système d'huile assure le graissage des paliers; des joints réduisent les pertes de vapeur tout au long de son trajet. Enfin, un système d'étanchéité empêche la vapeur de s'échapper à l'extérieur de la turbine et l'air d'y entrer. La vitesse de rotation est commandée par des soupapes situées aux entrées d'admission de la machine et pilotées par des systèmes de régulation électroniques ou mécaniques. Les turbines à réaction développent une poussée axiale considérable, du fait de la chute de pression sur les ailettes mobiles. Cette poussée est généralement compensée par l'utilisation d'un piston d'équilibrage.

La turbine à vapeur utilise des principes thermodynamiques. Lorsque la vapeur se dilate, sa température et donc son énergie interne diminuent. Cette réduction de l'énergie interne s'accompagne d'une augmentation de l'énergie cinétique sous la forme d'une accélération des particules de vapeur. Cette transformation rend une grande partie de l'énergie disponible. Ainsi, une réduction de 100 kJ de l'énergie interne, du fait de la dilatation, peut provoquer un accroissement de la vitesse des particules de vapeur de l'ordre de 2 800 km/h. À de telles vitesses, l'énergie disponible est importante. Lorsque la pression de la vapeur d'eau en sortie de la turbine est égale à la pression atmosphérique, la turbine est dite à condensation.

Aujourd'hui, les turbines à vapeur sont généralement limitées à une température maximale de 580 °C dans le premier étage, et à une pression maximale d'admission de 170 à 180 bars[35].

5. La Maintenance Industrielle

La maintenance est un ensemble d'actions tendant à prévenir ou à corriger les dégradations d'un matériel afin de maintenir ou de rétablir sa conformité aux spécifications. Pour une unité de production cette maintenance devrait permettre une contribution maximale à une meilleure efficacité et une meilleure rentabilité. Au cours des vingt dernières années, la maintenance a considérablement évolué. Actuellement, elle constitue l'un des vecteurs essentiels de

compétitivité des entreprises [Talbietal ,2003]. Les concepts liés à la maintenance sont: Diagnostic: Identification d'une panne par ses symptômes Expertise: Intervention, opération d'un expert, évaluation de l'état d'un équipement Pronostic: Préviation, supposition sur ce qui doit arriver sur l'équipement

Maintenance de la turbine à vapeur

La maintenance a principalement pour but de réduire le temps d'arrêt des équipements qui coûte cher, ce qui permet de limiter les pertes de production et de réduire les coûts de maintenance. Parmi les problèmes majeurs rencontrés dans les turbines à vapeur on trouve[36]:

- Les aubes de turbine à vapeur basse pression ont besoin d'être réparées fréquemment en raison de dommages provoqués par les mauvaises conditions de vapeur, la perte de plaque anti érosion brasées ou de dommages provoqués par des corps étrangers. Ces aubes peuvent être en principe entièrement réparées en toute sécurité sur site ou en atelier, avec jusqu'à 50% de remplacement du profil externe, comprenant souvent:
 - Le remplacement des plaques de protection et du bord d'attaque (stellite)
 - La réparation par soudure de section endommagée du bord de fuite
 - Le remplacement complet des extrémités
 - Le remplacement/ la remise en état de tenons
 - Le repositionnement d'amortisseurs et réinstallation de fils de liaison
 - Réparation des diaphragmes et de tuyère: permet de réparer/ remettre en condition pour remplacer entièrement les ailettes ou les segments de profils externe, y compris:
 - La réparation par soudure d'ailettes/ de séparation
 - Le remplacement de segment d'ailette
 - Le remplacement et la réparation de bagues internes, externes
 - La réparation et la modification de goupille de positionnement
 - Le remplacement de joint



Figure II- 16 : Maintenance de turbine à vapeur[36].

Chapitre 3 : Modélisation et résultats

Introduction

Dans cette partie nous avons utilisés le code TRNSYS 16 afin de simuler une centrale thermodynamique en version entraînée avec l'énergie solaire, Dans cette version on a étudié le cycle de Rankine pour produire l'énergie électrique grâce à un champ solaire qui utilise l'huile comme un fluide caloporteur circulant à travers les cylindro-paraboliques.

Le but de ce travail est d'utiliser cette centrale dans la période hivernale pour les conditions météorologiques de Bechar afin d'évaluer la production électrique minimale à partir du solaire thermique.

1. Description de projet

Installation de cycle de puissance :

Dans cette application on a utilisé le cycle de Rankine avec le champ solaire (Figure III-1). Les composants du cycle de la vapeur sont générateur de vapeur (ECO, EVA,SUR), turbine à vapeur, condenseur, pompe, dégazeur, sous-refroidisseur, préchauffeur et champ solaire (cylindro-parabolique). L'objectif du champ de collecteurs est de produire l'électricité à partir de l'installation thermique. Le système se compose d'un champ de type collecteurs cylindro-parabolique reliés au cycle de Rankine à travers une série d'échangeurs de chaleurs. Le fluide caloporteur est chauffé en circulant dans les absorbeurs des concentrateurs cylindro-paraboliques (champ solaire) et retourne au cycle de puissance de type Rankine, le rôle du fluide caloporteur est de transporter la chaleur de la source chaude (rayons solaire concentrer dans le cylindro-parabolique). La température moyenne du fluide caloporteur change selon les variations météorologiques d'une heure à une autre durant une saison. Ce fluide est pompé avec un débit constant vers le générateur de vapeur qui est constitué d'un économiseur, évaporateur et surchauffeur.

Les échangeurs de chaleur sont de type à contre-courant. Le fluide caloporteur (HTF) avec de l'eau de cycle de Rankine circulent dans le sens opposés. Le fluide caloporteur entre

dans le surchauffeur à haute température avant de passer au générateur de vapeur ou l'eau du cycle de puissance subit un changement de phase de l'état liquide à l'état vapeur. Ensuite, le fluide caloporteur passe à travers l'économiseur où cède à l'eau qui est à l'état liquide (appelé d'alimentation) son énergie. Et enfin le fluide est remis en circulation à travers le champ solaire. L'eau avant de retourner à l'économiseur pour compléter le cycle l'eau d'alimentation à l'état liquide sortant du condenseur passe à travers le dégazeur et puis le préchauffeur.

Cette centrale contient également une turbine de 3 étages à savoir haute pression, moyenne pression et basse pression et deux soutirages de vapeur qui communiquent avec les préchauffeurs. Cette vapeur soutirée est utilisée pour chauffer l'eau d'alimentation avant son entrée dans l'économiseur pour augmenter l'efficacité du cycle. La vapeur sortante de la turbine à basse pression est condensée dans un condenseur.

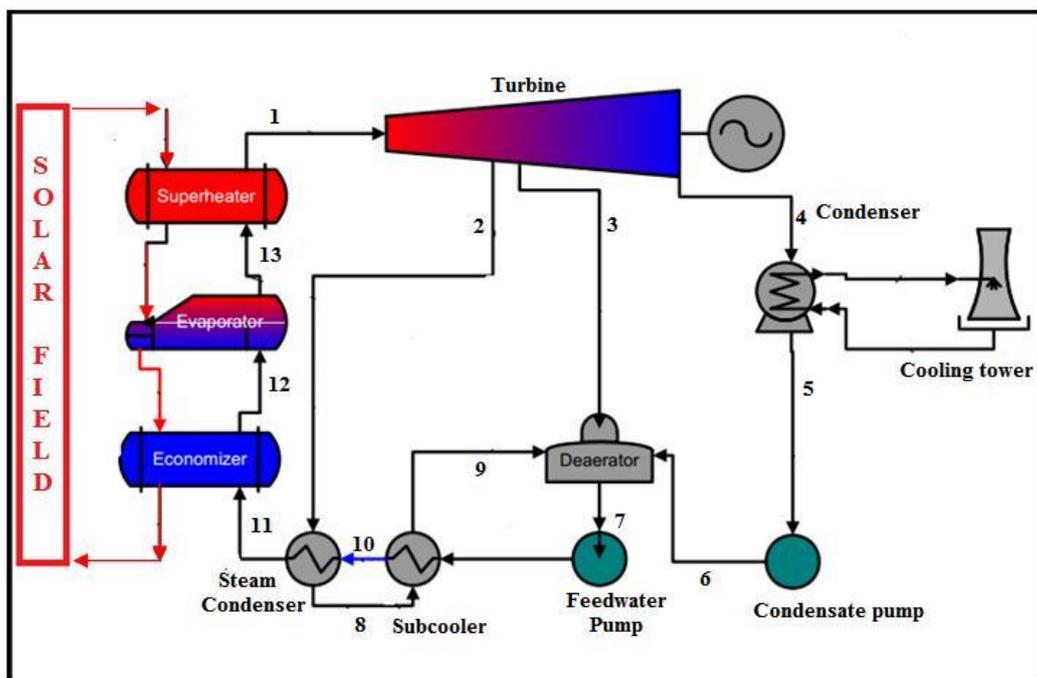


Figure III- 1 : Schéma de principe du cycle Rankine avec champ solaire[40].

2. Présentation de TRNSYS

2.1. Définition

TRNSYS (Transient systems simulation program) est un logiciel de simulation de systèmes transitoires qui utilise une structure modulaire. Il est l'un des plus utilisés dans l'exécution de simulations énergétiques thermiques ou électriques. TRNSYS dispose d'une bibliothèque

très riche contenant des composants couramment utilisés dans les systèmes thermiques ainsi que des composantes de lecture des fichiers externes comme de fichiers météorologiques ou de fichiers de rendement de machines commerciales. Pour cette raison, TRNSYS s'adapte très bien au comportement réel d'un système au fil du temps en considérant les variations météorologiques. TRNSYS est très utile pour la modélisation des systèmes utilisant des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne ou géothermique (University of Wisconsin, 2000).

La conception modulaire et ouverte de TRNSYS, basée sur une définition d'une interface logicielle rigoureuse, a encouragé un grand nombre d'équipe de recherche à intégrer des composants dans cette structure d'accueil d'où la bibliothèque STEC. Ces composants sont ensuite directement utilisables et connectables avec tous les composants existants. Ainsi, de nombreuses collaborations multidisciplinaires ont été réalisées grâce à cette infrastructure.

Quelques 50 familles de composants, disponibles en standard dans une bibliothèque, permettent de simuler, en régime transitoire, les bâtiments (mono ou multizones), les systèmes de chauffage et de climatisation, les plus simples comme les plus complexes, y compris les systèmes solaires innovants.

De nombreuses bibliothèques de modèles TRNSYS sont aujourd'hui disponibles dans le domaine public, couvrant un large spectre d'applications (énergie solaire, éoliennes, hydraulique, microcontrôleurs, photovoltaïque, piles à combustibles, piscines, plafond rayonnant, planchers chauffants, pompes à chaleur, régulation, stockage d'énergie intersaison, systèmes de climatisation, thermique du bâtiment, tours de refroidissements, turbines à gaz et à vapeur, matériaux à changement de phase, ...). Ces bibliothèques peuvent être connectées pour effectuer des études pluridisciplinaires[37].

TRNSYS utilise dans la modélisation des composants appelés «Types». Les valeurs initiales pour le calcul sont entrées comme «inputs» et les résultats sont obtenus comme «outputs». Lorsqu'un composant est connecté à un autre, les résultats du premier sont les données initiales du second et ainsi de suite[38].

2.2. Les avantages les inconvénients du TRNSYS

a. Ses avantages sont

- Approche modulaire, il est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de système thermique à différents niveaux de complexité (modules avec procédures de calcul plus ou moins élaborées)
- L'accès au code source aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine.
- Documentation vaste sur les sous-programmes y compris explications, usages usuels, équations de base.
- Définition très souple de la période de simulation : choix du pas de temps, du début et de la fin de la simulation.

b. Ses Inconvénients

- Pas de valeur ou de système par défaut, l'utilisateur doit donc posséder et introduire l'ensemble exhaustif des données définissant le bâtiment et le système.
- La bibliothèque est limitée[39]

2.3. Présentation de la bibliothèque STEC

Les bibliothèques des composants STEC (Solar Thermal Electric Component), illustrées dans la figure 5.1, sont développées par Peter Schwarzbozl (DLR, Allemagne) et Scott Jones (SNL, nouveau Mexique) en 2002. Elles permettent de simuler les systèmes thermiques (solaires et conventionnels) dans le but de produire de l'électricité. Ces bibliothèques ne sont pas délivrées en tant que standard avec le logiciel TRNSYS. Les composants de ces bibliothèques sont des modèles thermodynamiques basés sur le 1er et le 2eme principe de la thermodynamique.

Figure si dessus montre la structure des composants des bibliothèques STEC. Dans notre simulation on a utilisé des composants de cette bibliothèque ainsi que des composants standards du logiciel TRNSYS.

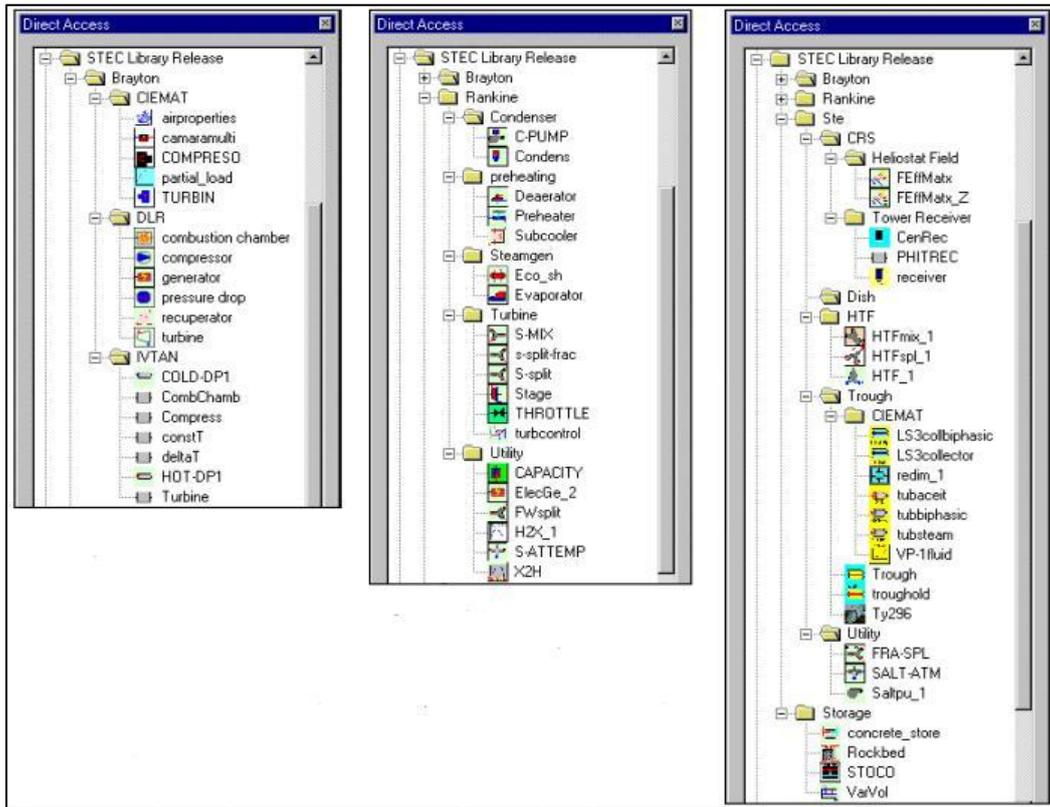


Figure III- 2 :Structure des composants des bibliothèques STEC[41].

3. Simulation de l'installation

Dans cette partie, on va simuler une installation de cycle de puissance avec champ solaire

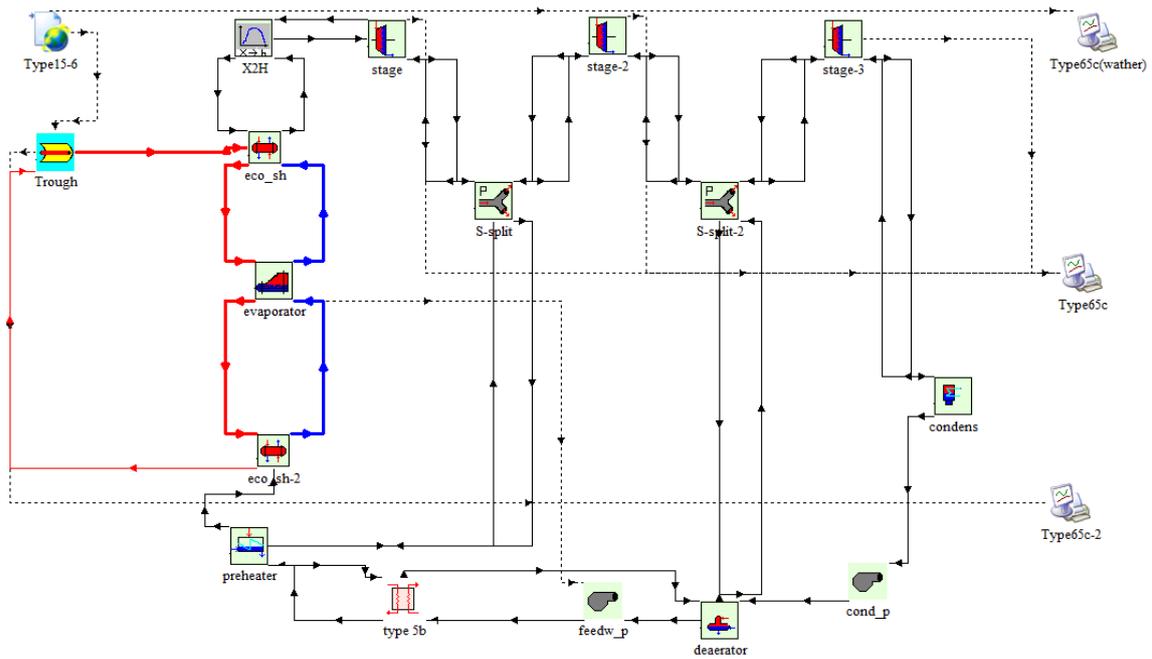


Figure III- 3 : Cycle de puissance avec champ solaire.

3.1. Modélisation et simulation des différents sous système du cycle de puissance

3.1.1. Champ solaire

Pour la simulation du champ solaire, nous avons utilisé les composants ou les types suivantes.

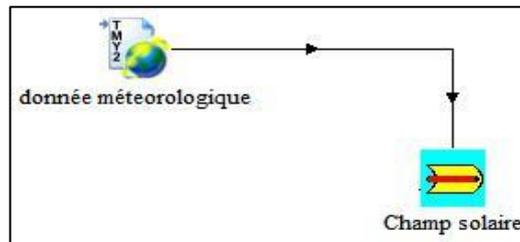


Figure III- 4 :Champ solaire.

Data reader TMY 2 (Type 109) : permet la lecture des données météorologiques d'un site.

Configuration de TMY 2

Les paramètres		Les entrées		
Data reader mode	2	Ground reflectance	0.2	
Logical unit	30	Slope of surface	0.0	degress
Sky mode for diffuse radiation	4	Azimuth of surface	0.0	degress
Tracking mode	1			

Tableau III- 1 : Paramètre de météorologique[40].

Les paramètres			Les entrées		
Cw-losscoef	0	-	Demande outlettemperature	391	C°
D-losscoef	-0.096	-	Inlettemperaturesolarfield	297	C°
Clean reflectivity	0.94	-	Cleanlinesssolarfield	0.95	-
Brokenmirror fraction	0.0	-	Specifichheat HTF	2.6	Kj/kg.K
Length of SCA	14.37	m	Sun azimuth	0	degress
Aperaturewidth SCA	1.52	m	Sun zenith	0	degress
Focal length of SCA	0.45	m	DNI-direct radiation	0	Kj/hr.m
Rowspacing	4.54	m	Wind speed	0	m/s
Total field Area	200000	M2	Ambient temperature	0	C°

Tableau III- 2 : Paramètre de champ solaire.

3.1.2. Cycle de Puissance

Pour la simulation du cycle de puissance, nous avons utilisé les composants suivants.

a. Générateur de vapeur

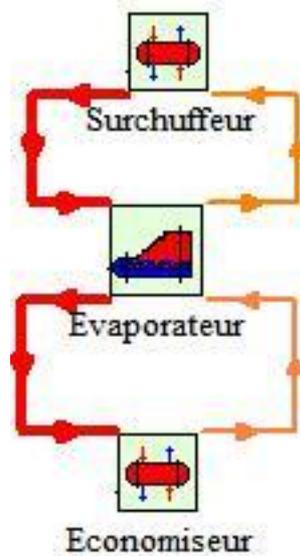


Figure III- 5 :Schéma d'unévaporateur.

Type 315 (Surchauffeur et économiseur) : permet de simuler un échangeur de chaleur sans changement de phase à contrecourant. Le rôle du surchauffeur est de surchauffer la vapeur saturée entrante à une température donnée.

Le rôle de l'économiseur est augmenté la température de l'eau jusqu'à sa température de saturation.

Type 316 (Evaporateur) : permet de simuler un échangeur de chaleur avec changement de phase à contre-courant.

a. Configuration de surchauffeur

Les Paramètres			Les entrées		
Counter flow mode	2	-	Hot side inlet temperature	391	C°
Over all heat transfer coefficient of exchanger	97920	Kj/hr.K	Hot side flow rate	71.06	Kg/s
Reference press loss cold side	1	bar	Cold side inlet temperature	313.4	C°
Reference cold side flow	18000	Kg/hr	Cold side flow rate	12.14	Kg/s
			Cold side quality	0.0	-
			Cold side outlet pressure	100	bar
			Hot side specific heat	2.6	Kj/kg.k

Tableau III- 3 :Paramètre de surchauffeur[40].

b. Configuration d'économiseur

Les Paramètres			Les entrées		
Counter flow mode	2	-	Hot side inlet temperature	316	C°
Over all heat transfer coefficient of exchanger	389880	Kj/hr.K	Hot side flow rate	71.06	Kg/s
Reference press loss cold side	1	bar	Cold side inlet temperature	234.8	C°
Reference cold side flow	18000	Kg/hr	Cold side flow rate	12.14	Kg/s
			Cold side quality	0.0	-
			Cold side outlet pressure	100	bar
			Hot side specific heat	2.6	Kj/kg.k

Tableau III- 4 :Paramètre d'économiseur[40].

c. Configuration d'évaporateur

Les Paramètres			Les entrées		
Blow down fraction	0.0	-	Hot side inlet temperature	378.6	C°
Over all heat transfer factor	495000	Kj/hr.K	Hot side flow rate	71.06	Kg/s

Reference press loss	1	bar	Clod side inlet temperature	313.5	C°
			Cold side quality	0.0	-
			Cold side outlet pressure	100	bar
			Hot side specific heat	2.6	Kj/kg.k

Tableau III- 5 : Paramètre d'évaporateur[40].

d. Configuration de la turbine à vapeur

étage 1 :

Les Paramètres			Les entrées		
Design inlet pressure	100	bar	Turbine outlet pressure	23.89	C°
Design outlet pressure	20	bar	Turbine inlet flow rate	12.14	Kg/s
Design flow rate	17992.8	Kg/s	Turbine inletenthalpy	3400	C°
Design innerefficiency	0.8	-	By passindicator	1	-

Tableau III- 6 :Paramètre d'étage 1 de la turbine[40]

étage 2 :

Les Paramètres			Les entrées		
Design inlet pressure	20	bar	Turbine outlet pressure	2.875	bar
Design outlet pressure	5	bar	Turbine inlet flow rate	9.919	Kg/s
Design flow rate	16198.9	Kg/s	Turbine inletenthalpy	3113	C°
Design innerefficiency	0.8	-	By passindicator	1	-

Tableau III- 7 : Paramètre d'étage 2 de la turbine[40].

Type 391 (X2X) : permet de convertir des températures de la vapeur d'eau en enthalpies.

e. Configuration split 1

Demanded flow out 1	2.22	Kg/s
Inlet flow rate	12.14	Kg/s
Outlet pressure 2	23.89	bar
Enthalpyinlet	3113	Kj/kg.k

Tableau III- 8 : Paramètre de séparateur 1[40].

f. Configuration (X2X)

Les entrées		
Steamtemperature	371	C°
Steam pressure	100	bar
Steamquality	1	-
Steam flow rate	12.14	Kg/s

Tableau III- 9 : Paramètre de convertisseur[40].

g. Condenseur et pompe

Type 383 (Condens) : permet de simuler un condenseur à surface par eau, l'élévation de la température de l'eau de refroidissement est donnée par la différence de température entre la température de sortie d'eau de refroidissement et la température de condensation est donnée par conséquent. La vapeur en sortie du turbine basse pression est condensée afin qu'elle puisse être pompée vers le dégazeur.

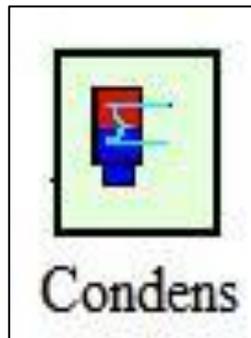


Figure III- 6 :Condenseur.

Type 300 (saltpu_1) : permet de simuler une pompe

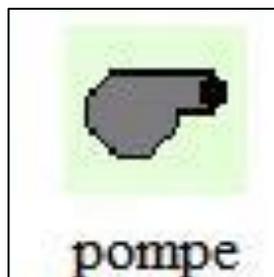


Figure III- 7 :Pompe.

h. Configuration de condenseur

Les paramètres			Les entrées		
Dt cool water out condensing temp	4	deltac	Cooling water inlet temp	27.67	C°
Temp increase in cool water	15	deltac	Steam enthalpy inlet	2414	Kj/Kg
			Steam masse flow rate	8.825	Kg/s
			Condensate inlet flow rate	0	Kg/hr
			Condensate inlet temperature	0	C°
			Condensate inlet quality	0	-

Tableau III- 10 : Paramètre de condenseur[40].

i. Configuration de pompe1:

Les paramètres			Les entrées		
Maximum flow rate	8.525	Kg/s	Inletfluidtemperature	132.1	C°
Fluidspecificheat	4.19	Kj/Kg.K	Inlet masse flow rate	12.14	Kg/s
Maximum power	1000	Kj/hr	Desired masse flow rate	12.14	Kg/s

Tableau III- 11 : Paramètre de pompe 1[40].

j. Configuration de pompe 2 :

Les paramètres			Les entrées		
Maximum flow rate	8.525	Kg/s	Inletfluidtemperature	132.1	C°
Fluidspecificheat	4.19	Kj/Kg.K	Inlet masse flow rate	12.14	Kg/s
Maximum power	1000	Kj/hr	Desired masse flow rate	12.14	Kg/s

Tableau III- 12 : Paramètre de pompe 2[40].

k. Configuration du dégazeur

Type 384 (Deaerator) : le dégazeur est un mélangeur préchauffeur pour l'eau d'alimentation ou la vapeur est mélangée avec de condensat sous-refroidi pour produire de l'eau saturée à la sortie, ce modèle comprend trois entrées et une sortie. Les trois entrées sont : la vapeur extraite de la turbine moyenne pression, le condensat provenant du préchauffeur à condensation et l'eau d'alimentation qui arrive du condenseur.



Figure III- 8 : Dégazeur.

Les entrées		
Feed water in temp	42.59	C°
Feed water flow rate	8.525	Kg/s
Steaminletenthalpy	2793	KJ/kg .K
Steaminlet pressure	2.875	bar
Condensateinlettemperature	132.1	C°
Condensateinlet flow rate	2.22	Kg/s

Tableau III- 13 : Paramètre de dégazeur[40].

l. Système de Préchauffage d'eau

Le système de préchauffage d'eau permet de simuler un échangeur de chaleur pour condenser la vapeur extraite de la turbine et pour préchauffer l'eau d'alimentation avant son entrée dans l'économiseur.

Type 317 (Preheater) : considère la capacité calorifique d'eau provenant du côté froid et celle du condensat provenant du côté chaud constantes.

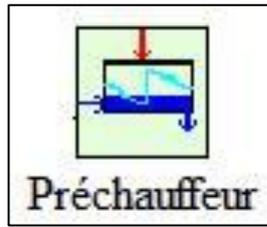


Figure III- 9 : Préchauffeur.

Type 320 (Subcooler) : Permet de simuler une capacité supplémentaire du transfert globale de chaleur en fonction du débit d'eau coté froid.

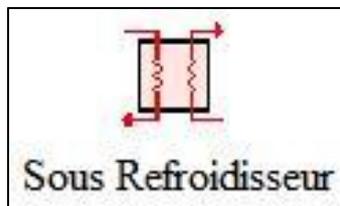


Figure III- 10 : Sous Refroidisseur.

m. Configuration de préchauffeur :

Les paramètres			Les entrées		
Cold fluid spef heat capacity	4.24019	Kj/Kg.k	Hot side inlet enthalpy	3113	Kj/Kg
Overall heat transfer factor	186840	Kj/hr.k	Hot side inlet pressure	23.89	Bar
Cold sid ref flow rate	12.14	Kg/s	Cold side inlet temperature	130.6	C°
			Cold side inlet flow rate	12.14	Kg/s

Tableau III- 14 : Paramètre de préchauffeur[40].

n. Configuration de sous refroidisseur

Les paramètres			Les entrées		
Counter flow rate	2	-	Hot side inlet temperature	221.6	C°
Specific heat of hot side fluid	3.35539	Kj/kg.k	Hot side flow rate	2.22	Kg/s

Specific heat of cold side fluid	4.24019	Kj/kg.k	Cold side inlet temperature	130.6	C°
Not used	0	-	Cold side flow rate	12.14	Kg/s
			Overall heat transfer coefficient of exchanger	21239.999437	Kj/hr.k

Tableau III- 15 : Paramètre de sous refroidisseur[40].

Type 65d (plotter) : traceur graphique en ligne avec le fichier de sortie.



Figure III- 11 : Le traceur.

4. Résultats et discussions

4.1. Evaluation des paramètres météorologique

La Figure III-12 représente la variation de la vitesse moyenne du vent annuelle en m/s, durant une année dans la wilaya de Bechar.

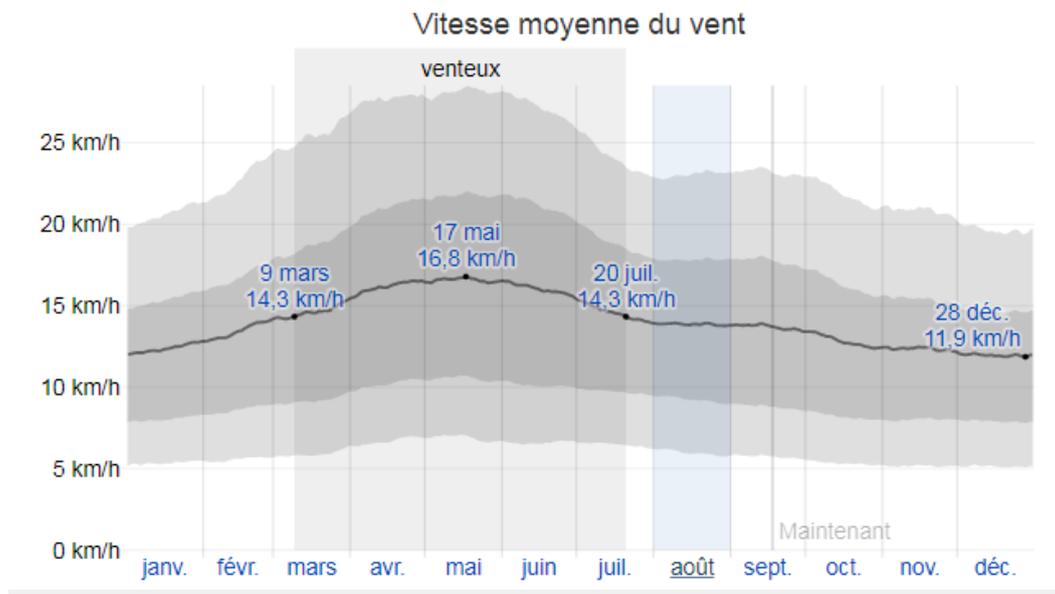


Figure III- 12 : Vitesse moyenne du vent (wilaya de Bechar).[40]

On voit que la vitesse du vent est généralement stable pendant une saison elle ne dépasse pas, ce qui indique que les vents dans ce site sont faible et favorable pour l'installation d'un système de concentration solaire, pour éviter les pertes par convection qui seront moins importantes dans ce site.

4.2. Influence de la surface de champ solaire sur la puissance générée

Ce graphe (Figure III-13) représente la puissance générée par l'installions en fonction du temps

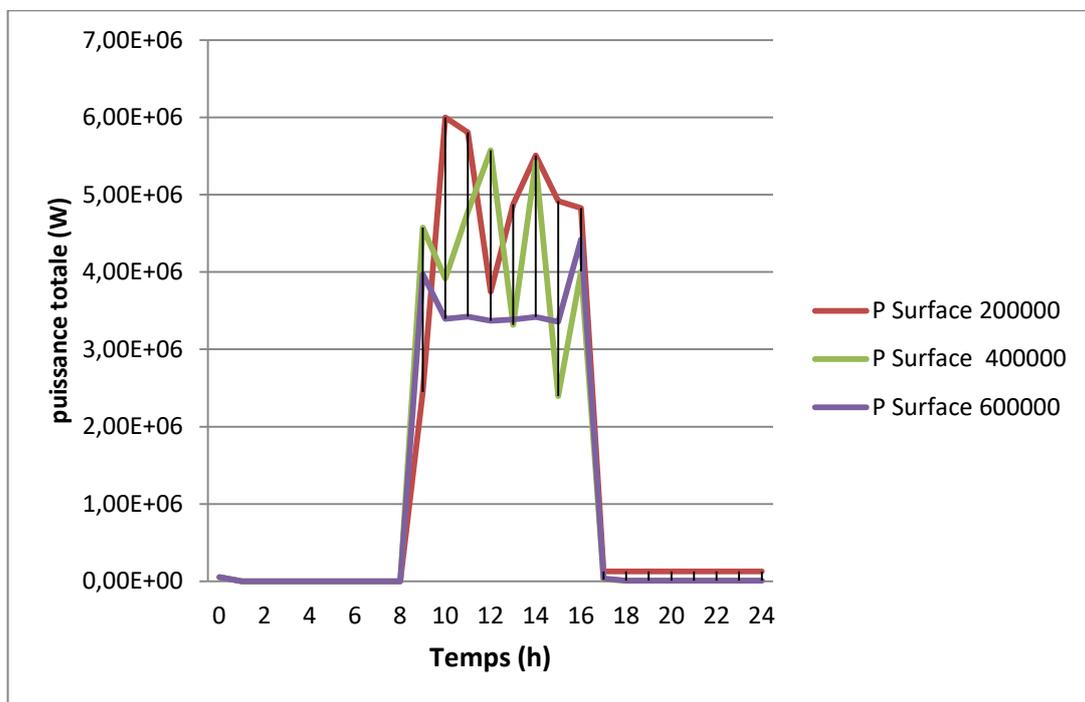


Figure III- 13 : Graph de la surface de champ solaire et la puissance générée.

Le graphe nous donne la puissance générée par les trois configurations de surface par rapport au différents temps de la journée, cela a forcément un impact sur la puissance fournie car on a une variation de l'ensoleillement et de la température. Mais ici il faut pondre en compte un facteur majeur qui influe sur le rendement de n'importe quel installation de ce genre, est qui est les pertes de chaleur car l'écart de température entre le fluide et le milieu extérieur induit forcément un échange de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur.

Donc moins nous aurons d'échange moins nous aurons de pertes, ce qui est conforté par les résultats obtenu par simulation.

La surface la plus petite nous donne un bien meilleur résultat avec des pics à 9h et 14h qui peuvent se traduire par les périodes qui peuvent nous fournir le meilleur rendement.

On peut aussi remarquer que la puissance fournie par la plus grande surface est plus stable tout au long de la journée ce qui est très intéressant car la stabilité et la fiabilité ce sont des facteurs très importants en industrie énergétique

4.3. Influence de la surface du champ solaire sur la température à sa sortie:

On va présenter dans ce graphe (Figure III-14) l'influence de la surface du champ solaire sur la température de sa sortie qui représente l'entrée de la turbine.

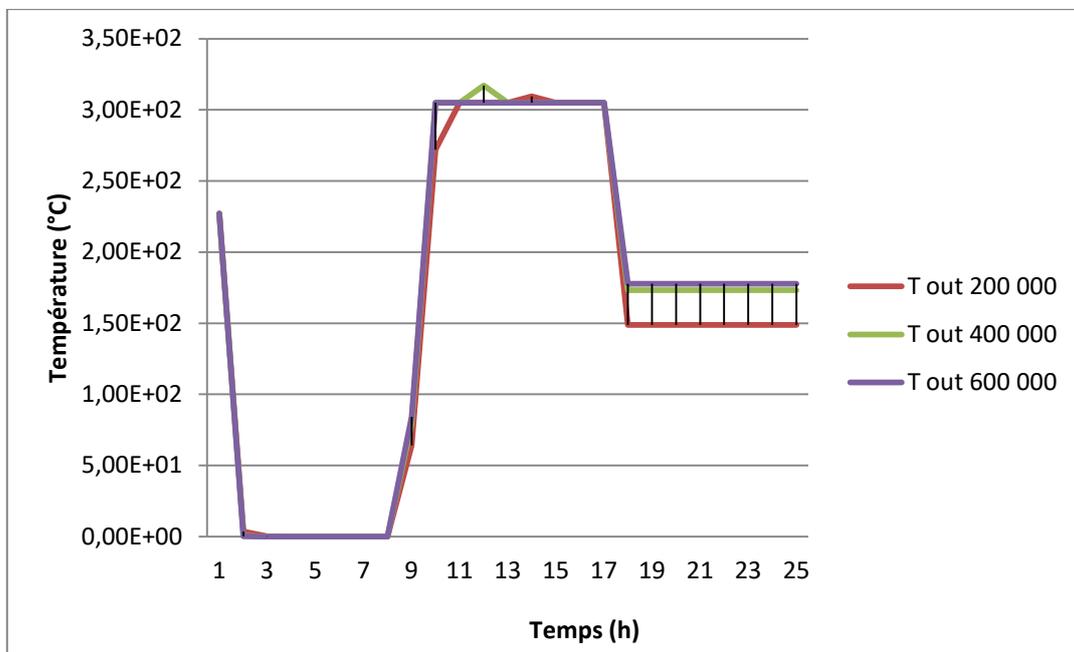


Figure III- 14 : Graph de la surface du champ solaire et la température à sa sortie.

Le graphe nous donne la progression de la température durant la journée pour les trois configurations de surface, ce qui est intéressant ici c'est que toutes les courbes ont presque la même allure ce qui nous montre que la température ne dépend pas de la longueur de la tuyauterie ou bien la longueur des panneaux cylindro-parabolique, mais uniquement de la continuité de rayons de soleil qui atteint un point donné si on prend la tuyauterie comme une infinité de points, la température dans chaque point dépend uniquement de la continuité de rayons qui atteignent ce point donc pour augmenter la température il faut augmenter le diamètre des panneaux cylindro-parabolique

4.4. La puissance des étages de la turbine sans champ solaire (par combustible)

La courbe illustrée par la figure ci-dessus montre l'évolution de la puissance de chaque étage obtenue par la turbine à vapeur, on remarque que la valeur maximale de la puissance reste constante du début de la simulation à 1hr00. Puisque le débit de combustible (gaz naturel) consommé ne change pas dans toute la période de fonctionnement.

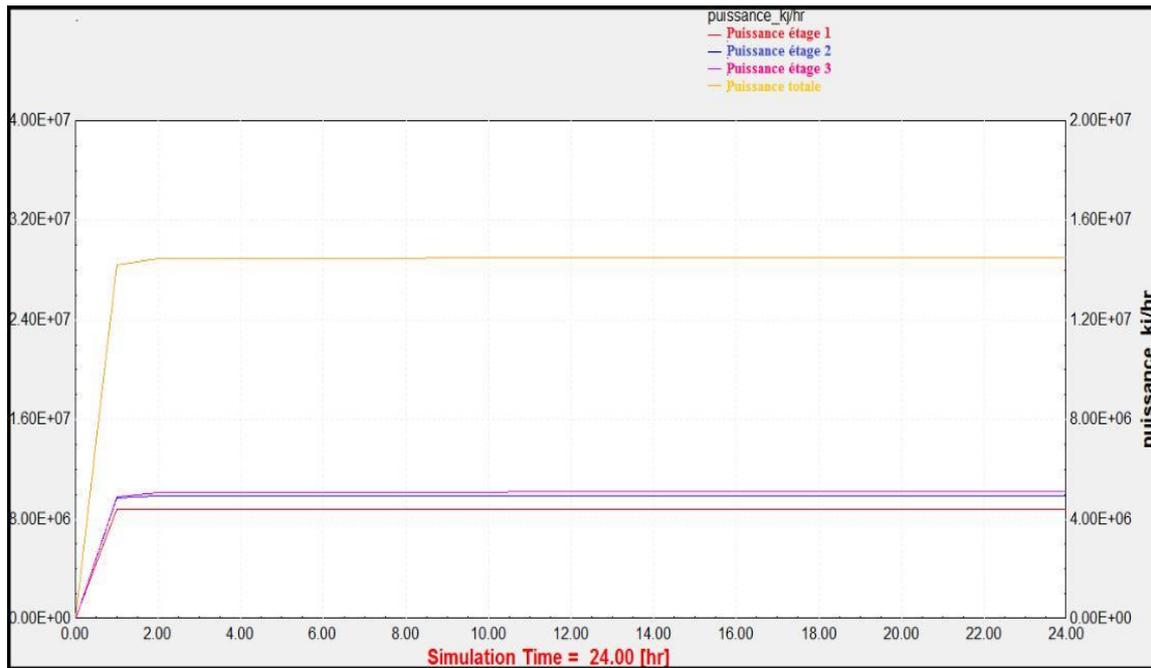


Figure III- 15 : La puissance des étages de la turbine sans champ solaire (par combustible).

Dans ce graphique qui représente la puissance générée des étages de la turbine sans champ solaire mais par un combustible ; on voit que cette puissance est inférieure par rapport la puissance générée avec un champ

Conclusion générale

Ce travail a pour objectif l'étude d'une installation du cycle de Rankine alimenté énergétiquement par le champ solaire, à travers une modélisation qui a été réalisée par logiciel TRNSYS, sachant que les conditions météorologiques de la Wilaya de Béchar ont été utilisées à fin d'évaluer le comportement thermique de l'installation

durant une année. Au cours du travail, la puissance et son rendement thermique ont été les paramètres principaux pour évaluer le cycle de la centrale en question.

- ❖ On fin on vous propose respectivement quelques perspectives :
 - D'améliorer les fluides caloporteurs et leurs composition chimiques
 - D'augmentera les étages de la turbine pour avoir plus de rendement
 - D'avoir des réservoirs de stockages de la chaleur
 - De minimiser les pertes de chaleur par amélioration de l'isolent de la tuyauterie

Bibliographie

- [1] Blanchet Guy, Benard R, Menguy G, et Schwartz M, *Le rayonnement solaire. Conversion thermique et application*, vol. 55, 1 vol. Revue de géographie de Lyon, 1980.
- [2] « GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY ». [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.thegef.org/>.
- [3] A. FERRIÈRE, « Centrales solaires thermodynamiques », *Techniques de l'ingénieur Énergies renouvelables*, vol. base documentaire : TIB594DUO., n° ref. article : be8903, 2008.
- [4] KHADRAOUI ZAKARIA, « Etude d'une centrale solaire thermique », 2017.
- [5] « Miroir ardent de Louis XIV ». sept-2013.
- [6] « Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité ». 12-mai-2012.
- [7] Pierre Pétrequin, Rose-Marie Arbogast, Anne-Marie Pétrequin, Samuel Van Willigen, Maxence Bailly, et Premiers chariots, *premiers araires : La diffusion de la traction animale en Europe pendant les IVe et III emillénaires avant notre ère*. CNRS, 2006.
- [8] « L'Inde et la France lancent l'Alliance internationale pour l'énergie solaire ». 01-déc-2015.
- [9] « Desertec Industry Initiative et Sonelgaz conviennent de coopérer étroitement dans le domaine des énergies renouvelables ». .
- [10] Khider Cherif, « Algérie Patriotique », décembre 16. [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.algeriepatriotique.com/2016/12/16/energie-lalgerie-va-construire-la-plus-grande-centrale-solaire-au-monde/>.
- [11] Samira Imadalou, « Algérie: Énergie solaire - Une filière prometteuse ». La Tribune, 18-juill-2011.
- [12] « Présentation New Energy Algeria », 18-juill-2012. .
- [13] « Radio Algérienne », 09-mai-2018. [En ligne]. Disponible sur:
www.radioalgerie.com.
- [14] padmin, « Quels sont les impacts de l'énergie solaire sur l'environnement ? », 17-juin-2015. .
- [15] « wikipedia ». 30-sept-2018.
- [16] « Baromètre solaire thermique et thermodynamique ». mai-2014.

- [17] La rédaction, « Le gisement solaire de l'Algérie est parmi les trois meilleurs gisements dans le monde ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.algerie-focus.com/2014/12/le-gisement-solaire-de-lalgerie-est-parmi-les-trois-meilleurs-gisements-dans-le-monde/?cn-reloaded=1>.
- [18] Y JANNOT, *Thermique solaire*. 2011.
- [19] Bruno Rivoire, « LE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE ». 24-avr-2002.
- [20] P. Garcia, « Outils d'évaluation technico-économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur », Université de Perpignan, 2007.
- [21] « Ivanpah Solar Electric Generating System », 17-nov-2013.
- [22] Davis, Tony, « Arizona: the West's solar source". Arizona Daily Star. » 12-févr-2009.
- [23] « Energies Renouvelables », 2007. [En ligne]. Disponible sur: DRIREdu Limousin.
- [24] OECD/IEA, « Technology Roadmap Concentrating Solar Thermal Electricity ». 2014.
- [25] « NewEnergyUpdate ». [En ligne]. Disponible sur: <http://social.csptoday.com/markets/global-csp-capacity-forecast-hit-22-gw-2025>.
- [26] S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, M. M. Rahman, et E. K. Stefanakos, *Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants*, vol. 39, 4 vol. 2013.
- [27] [17] Y. Tian et C. Y. Zhao, *A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications*, vol. 104. 2013.
- [28] OECD/IEA, « Technology Roadmap Concentrating Solar Power ». 2010.
- [29] N'TSOUKPOE K, LIU H, et LE PIERRES N, « A review on long-term sorption storage, Renewabl and Sustainable Energy Reviewers », p. 2385-2396.
- [30] M. Eck et al, « The potential of direct steam generation in parabolic troughs - results of the German project DIVA », présenté à in Proceedings of the 14th Biennial CSP SolarPACES Symposium, 2008.
- [31] J. F. Feldhoff, M. Eck, D. Benitez, et K.-jürgen Riffelmann, « Economic Potential of Solar Thermal Power Plants with Direct Steam Generation compared to HTF Plants », présenté à in Proceedings of the ES2009 Conference, 2009, p. 663-671.
- [32] « Encyclopédie msn .encarta ». 2007.
- [33] « Université de Lille ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.univ-lille1.fr/mail/gene_vap/fr/.

- [34] « Direct Industry ». [En ligne]. Disponible sur:
<http://www.directindustry.com/prod/ansaldo-energia/steam-turbine-29641-232047.html>.
- [35] « Encarta Encyclopedia ». .
- [36] « Power Technologie ». .
- [37] M.L. YOUSFI, « Performances technico-économiques de centrales cylindro-paraboliques de puissance », Mémoire de Magister, Université de Chlef, 2009.
- [38] C. NARANJO-MENDOZA, « Conception et simulation numérique d'un système de capitation et stockage d'énergie thermique pour l'utilisation dans la climatisation d'un bâtiment en équateur », Mémoire d'ingénieur, Université du Québec, 2013.
- [39] F. MOKHTARI, « Formation sur le logiciel TRNSYS, environnement complet et extensible dédié a la simulation dynamique des systèmes », p. 15-16, 2009.
- [40] BENYOUCEF mohammed et ASSI djamel, « Conception d'une installation hybride pour la production d'électricité », 2016.