



MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière: ÉLECTROMÉCANIQUE

Option : MAINTENANCE INDUSTRIELLE

Thème :

Étude technique et simulation de la centrale solaire de HassiR'mel sous SAM

Réalisé par :

SI HADJ MOHAND Azouaou

AMANI

Jugurta

Dirigé par : MC/B YAMANI Nouredine

Président de jury : MC/B BELTAGY Hani

Examineur : MC/A SI AHMED Hamid

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudraient témoigner toute notre gratitude.

Nous voudraient tout d'abord adresser toute notre reconnaissance au directeur de recherche, Monsieur YAMANI Noureddine, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous désirent aussi remercier les membres du jury qui ont pris le temps de lire, d'examiner et de corriger ce modeste travail.

Nous remerciant aussi les enseignants, les professeurs et personnel de l'université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Dédicace

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont le plus chère au monde,

Un grand merci à mon père et ma mère pour leurs bontés, leurs sacrifices, leurs encouragements, leurs persévérances et qui m'offerts le plus que nécessaire pour réussir mes études.

Un grand merci à mon frère et mes deux sœurs, qui ont été à côté de moi et avoir veillé sur moi.

Un grand merci à mon binôme Jugurta et à toute sa famille, ainsi qu'à tous mes amis et collègues.

Azouaou.SHM

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes précieux parents (AMANI Slimane & AKKACHE Yamina)
pour leurs exprimer tout le respect et l'amour que j'ai pour eux
et pour leurs témoigner ma reconnaissance pour tous leurs
efforts et sacrifices.

A mes frères (Hakim ; Mustapha ; Karim ; Noureddine)

A mes sœurs (Djegdjega ; Samya ; Lydia)

A tous mes amis

A.Jugurta

SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I : état de l'art

1) Introduction.....	03
2) Définition.....	03
3) Les sources d'énergie.....	03
4) Production d'électricité.....	04
4.1) Historique de la production d'électricité.....	04
4.2) Modes de production de l'énergie électrique.....	05
5) Centrales électriques.....	05
6) Centrale solaire.....	06
6.1) Définition.....	06
6.2) Classification selon les énergies	07
6.3) Installations solaires photovoltaïques.....	08
6.4) Application de l'énergie solaire	08
6.4.1) Basse température.....	08
6.4.2) Haute température.....	09
6.5) Principe de fonctionnement.....	09
6.6) Rendement des centrales solaire.....	10
7) Potentielle énergétique du soleil.....	11
8) Le rayonnement solaire.....	11
8.1) Définition.....	11
8.2) Absorption et réflexion.....	12
8.3) Irradiation à la surface de la terre.....	12
8.4) L'irradiation directe normale(DNI).....	12
8.5) L'irradiation horizontale diffuse (DHI).....	12
8.6) L'irradiation horizontale globale (GHI).....	12
8.7) Les matériels de mesure d'irradiation solaire.....	13
9) Potentielle de la technologie.....	14
10) Power Tower.....	15

10.1) Description.....	15
10.2) Principales réalisations.....	16
11) Centrale à capteurs Cylindro-paraboliques.....	17
11.1) Description.....	17
11.2) Principe de fonctionnement.....	18
11.3) Principales réalisations.....	18
12) Centrale solaire à miroir de Fresnel.....	19
12.1) Description.....	19
13) Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling.....	20
13.1) Description.....	20
13.2) Le concentrateur.....	21
13.3) Le récepteur.....	21
14) Les aspects techniques.....	22
Conclusion.....	22

Chapitre II : Généralités sur les turbomachines

1) Introduction.....	24
2) Définitions.....	24
2.1) Turbomachines.....	24
2.2) Grilles d'aubes.....	24
3) Classifications des turbomachines.....	24
3.1) Selon la trajectoire du fluide.....	25
3.1.1) Turbomachines radiales.....	25
3.1.2) Turbomachines axiales.....	25
3.1.3) Turbomachines semi-axiales.....	26
3.2) Selon la fonction de la machine.....	26
4) Turbine à gaz.....	26
4.1) Définition.....	26
4.2) Les éléments d'une turbine à gaz.....	27
4.3) Classification des turbines à gaz.....	27
4.3.1) Par le mode de construction.....	28
4.3.2) Par le mode de travail.....	29
a- Turbine à action.....	29
b- Turbine à réaction.....	29

4.3.3) Par le mode de fonctionnement thermodynamique.....	30
a- Turbine à gaz à cycle fermé.....	30
b- Turbine à gaz à cycle ouvert.....	30
4.3.3.a) Turbine à cycle simple.....	30
4.3.3.b) Turbine à cycle régénéré.....	30
4.4) Principe de fonctionnement de la turbine à gaz.....	30
4.5) Domaines d'application des turbines à gaz.....	31
5) Turbine à vapeur.....	31
5.1) Définition.....	31
5.2) Classification des turbines à vapeur.....	32
5.2.1) La nature de fonctionnement thermodynamique.....	32
a- Turbine à condensation.....	32
b- Turbine à contre pression.....	33
5.2.2) La méthode de fonctionnement de la vapeur.....	33
a- Les turbines à action.....	33
b- Les turbines à réaction.....	33
5.2.3) Le sens d'écoulement de la vapeur.....	34
a- Turbine axial.....	34
b- Turbine radiale.....	34
5.2.4) Le mode de construction.....	34
a- Turbine à disque.....	34
b- Turbine à tambour.....	35
5.2.5) Le mode de transmission d'énergie thermique.....	35
a- Transmission directe.....	35
b- Transmission indirecte.....	35
5.3) Principe d'une turbine à vapeur.....	36
5.4) Domaine d'application de la turbine à vapeur sont.....	36
6) Turbine à cycle combiné.....	36
6.1) Définition.....	36
6.2) Principe.....	37
Conclusion.....	38
 Chapitre III : Dimensionnement de la centrale Hassi R'mel :	
1) Introduction.....	40

2) Localisation géographique.....	40
3) Généralités sur la centrale.....	41
3.1) Description.....	41
3.2) Caractéristiques.....	42
3.3) Les composantes de la centrale.....	43
4) Turbine à gaz SIEMENS SGT-800.....	43
4.1) Description.....	44
4.2) Caractéristiques.....	44
5) Turbine à vapeur SIEMENS SST-900.....	45
5.1) Description.....	45
5.2) Les dimensions de la turbine SST-900.....	46
5.3) Données techniques.....	46
5.4) Principales domaine d'application de la SST-900.....	46
6) Chaudière de recuperation (HRSG).....	46
6.1) Description.....	46
6.2) Le HRSG THERMAX INDIA.....	47
7) Condenseur.....	47
8) Aérocondenseur.....	48
9) Absorbeur.....	48
9.1) Description.....	48
9.2) Caractéristiques techniques.....	49
10) Système HTF (Heat transfer fluid), Fluide caloporteur (HuileTherminol VP-1).....	49
10.1) Apparence.....	50
10.2) Viscosité.....	50
10.3) Taux d'acidité.....	50
10.4) Eau.....	51
10.5) Matières insolubles.....	51
10.6) Contenu en composés à bas et haut point d'ébullition.....	51
10.7) Point d'inflammation.....	52
10.8) Analyse spéciale.....	52

11) Système de pressurisation du système HTF.....	52
12) Champ solaire.....	52
13) Système de stockage de la centrale.....	54
Conclusion.....	54

CHAPITRE IV : Simulation de la centrale solaire Hassi R'mel

1) Introduction.....	56
2) Présentation de logiciel Meteonorm.....	56
3) Détermination et spécificités des paramètres.....	56
4) Choix des jours type.....	57
5) Evolution du GHI, DNI et DHI.....	58
6) Temps d'ensoleillement du site hassir'mel.....	60
7) Température moyenne.....	60
8) SYSTEM ADVISOR MODEL.....	61
8.1) Présentation du logiciel.....	62
8.2) Simulation de la centrale hassir'mel.....	62
9) Résultats et interprétations.....	66
9.1) Electricityfrom/to grid.....	66
9.2) la capacité de collecteur.....	67
9.3) Pertes optiques et thermiques.....	68
9.4) Température.....	70
9.5) Débit.....	71
9.6) Température de fluide caloporteur.....	72
9.7) Absorbeur.....	74
9.8) Stockage thermique de l'énergie.....	76
9.9) Total de la puissance électrique fournie au réseau.....	78
10) Comparatif de la puissance électrique et du DNI capté.....	78
11) Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	80

Listes des figures

Figure I-1 : Centrale électrique.....	06
Figure I-2 : Schéma représentatif des différents de centrales électriques.....	07
Figure I-3 : Représentation schématique des principaux systèmes de concentration.....	07
Figure I-4 : Schéma d'une installation photovoltaïque connectée au réseau.....	08
Figure I-5 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire	10
Figure I-6 : Pyranomètre, utilisé pour mesurer l'irradiation globale.....	13
Figure I-7 : Pyréliomètre, utilisé pour mesurer l'irradiation normale directe.....	13
Figure I-8 : Carte du monde représentant le taux d'ensoleillement direct global.....	14
Figure I-9 : Vue aérienne d'une centrale à concentration et tour.....	15
Figure I-10 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à tour.....	16
Figure I-11 : Centrale à collecteurs cylindro-parabolique	17
Figure I-12 : Capteur de Downtown Beersheba et sa représentation.....	17
Figure I-13 : Configuration typique d'une centrale à collecteurs cylindro-parabolique.....	18
Figure I-14 : Centrale solaire Fresnel.....	19
Figure I-15 : Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel.....	19
Figure I-16 : Centrale parabolique.....	20
Figure I-17 : Représentation d'une centrale dish-stirling.....	21
Figure I-18 : Récepteur pour un cycle de Stirling.....	21
Figure II-1 : Grille d'aubes	24
Figure II-2 : Roue d'une turbomachine radiale	25
Figure II-3 : Roue d'une turbomachine axiale	26
Figure II-4 : Roue d'une machine semi-axiale.....	26
Figure II-5 : Éléments de la turbine à gaz	27
Figure II-6 : Diagramme de classification des turbines à gaz.....	28
Figure II-7 : Schématisation de la turbine mono-arbre et bi-arbre.....	28
Figure II-8 : Mode de travail	29
Figure II-9 : Diagramme du cycle de Brayton des cycles ouverts et fermés.....	30
Figure II-10 : La variation de pression et de température dans les différentes sections de la turbine.....	31
Figure II-11 : Schéma d'une turbine à vapeur.....	32

Listes des figures

Figure II-12 : Mode de fonctionnement de la vapeur.....	33
Figure II-13 : Turbine axiale	34
Figure II-14 : turbine radiale.....	34
Figure II-15 : Disque de turbine.....	35
Figure II-16 : Turbine à tambour.....	35
Figure II-17 : Mode de transmission directe.....	35
Figure II-18 : Mode de transmission indirecte.....	36
Figure II-19 : Schéma à cycle combiné.....	37
Figure II-20 : Principe fonctionne du cycle combiné gaz/vapeur.....	38
Figure III-1 : Centrale ISCCS HassiR'mel.....	40
Figure III-2 : Localisation géographique de la centrale ISCCS HassiR'mel.....	41
Figure III-3 : Schéma de la centrale ISCCS HassiR'mel.....	42
Figure III-4 : Principe de fonctionnement de la centrale ISCCS HassiR'mel.....	43
Figure III-5 : Turbine à gaz SIEMENS SGT-800.....	43
Figure III-6 : Image réelle de la TAV SIEMENS SGT-800.....	45
Figure III-7 : Eléments et fonctionnement du système HRSG.....	47
Figure III-8 : Tube SCHOTT PTR 70.....	49
Figure III-9 : Vu aérienne du champ solaire	54
Figure IV-1 : Interface de configuration Meteonorm.....	57
Figure IV-2 : Evolution du GHI, DHI et DNI le 21 Juin.....	58
Figure IV-3 : Evolution du GHI, DHI et DNI le 21 Mars	58
Figure IV-4 : Evolution du GHI, DHI et DNI le 23 Septembre.....	59
Figure IV-5 : Evolution du GHI, DHI et DNI le 21 Décembre.....	59
Figure IV-6 : Diagramme de la durée d'ensoleillement a la centrale HassiR'mel.....	60
Figure IV-7 : Diagramme des températures a HassiR'mel.....	61
Figure IV-8 : Interface d'ouverture de SAM.....	61
Figure IV-9 : Introduction des paramètres météorologiques dans SAM.....	62
Figure IV-10 : Introduction des paramètres du champ solaire et capacité de la turbine.....	63
Figure IV-11 : Récapitulatif des paramètres et introduction du type de fluide Caloporteur.....	63
Figure IV-12 : Paramètres des collecteurs cylindro-paraboliques.....	64

Listes des figures

Figure IV-13 : Paramètres de l'absorbeur.....	64
Figure IV-14 : Cycle de la turbine.....	65
Figure IV-15 : Paramètres de stockage thermique.....	65
Figure IV-16 : Dégradation.....	66
Figure IV-17 : Diagramme d'électricité reçu du réseau.....	66
Figure IV-18 : Diagramme d'électricité fournie au réseau.....	67
Figure IV-19 : Diagramme du DNI collecté.....	67
Figure IV-20 : Diagramme de l'efficacité des collecteurs.....	68
Figure IV-21 : Diagramme des pertes liées à l'optique des collecteurs.....	69
Figure IV-22 : Diagramme des pertes liées à l'ombrage des collecteurs.....	69
Figure IV-23 : Diagramme des pertes thermique du la tuyauterie.....	70
Figure IV-24 : Diagramme des températures d'entrée du champ solaire.....	71
Figure IV-25 : Diagramme des températures de sortie du champ solaire.....	71
Figure IV-26 : Diagramme du débit délivré par le champ solaire.....	72
Figure IV-27 : Diagramme du débit ré-circulé dans le système.....	72
Figure IV-28 : Cycle de puissance d'entrée du HTF.....	73
Figure IV-29 : Cycle de puissance de sortie du HTF.....	73
Figure IV-30 : Cycle de puissance du débit HTF.....	74
Figure IV-31 : Diagramme du débit d'écoulement dans les absorbeurs.....	75
Figure IV-32 : Diagramme des pertes thermiques des absorbeurs.....	75
Figure IV-33 : Diagramme de la puissance thermique absorbé dans les absorbeurs.....	75
Figure IV-34 : Diagramme de la puissance thermique incidente.....	76
Figure IV-35 : Diagramme des températures du fluide de stockage initiales.....	77
Figure IV-36 : Diagramme des températures du fluide de stockage chaudes.....	77
Figure IV-37 : diagramme des pertes thermique du fluide de stockage.....	77
Figure IV-38 : Diagramme du total d'électricité délivré au réseau.....	78
Figure IV-39 : Diagramme de l'évolution de la production d'électricité par rapport au DNI.....	79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau représentant les différents types de source d'énergie ainsi que leurs avantages et inconvénients.....	03
Tableau 2 : Représentant des principales réalisations de centrales à tour dans le monde classé selon leur puissance.....	16
Tableau 3 : Quelle centrale à cylindro-parabolique dans le monde	18
Tableau 4 : Classification des machines à fluides.....	25
Tableau 5 : Caractéristiques de la centrale ISCC HassiR'mel.....	42
Tableau 6 : Caractéristiques techniques de la turbine à gaz SIEMENS SGT-800.....	44
Tableau 7 : Dimensions de la turbine à vapeur SIEMENS SST-900.....	46
Tableau 8 : Caractéristiques techniques de la turbine à vapeur SIEMENS SST-900.....	46
Tableau 9 : Caractéristiques du HeatRecoverySteamGenerators THERMAX INDIA.....	47
Tableau 10 : Caractéristiques de l'absorbeur SCHOTT PTR-70.....	49
Tableau 11 : Type et nombre de rangées de miroirs utilisé.....	52
Tableau 12 : Champ solaire du site de HassiR'mel.....	54
Tableau 13 : Système de stockage de la centrale.....	54
Tableau 14 : Choix des jours types.....	57

Nomenclature

Symbole	Définition	unité
P	Pression	(bar)
T	Température	(C)
L	Longueur de collecteur	(m)
D	Dégradation	(%)
h	Heure	(/)
Pi	Puissance incidente	(W)
A	Superficie du capteur	(m ²)
H	Rayonnement énergétique	(W/m ²)

Abréviations :

CESI : Chauffe-eau solaire individuel

CSP : Centrale solaire à concentration

DNI :Irradiation directe normale

DHI : Irradiation horizontale diffuse

GHI : Irradiation horizontale globale

CR : **Compresseur d'air**

CC : **Chambre de combustion**

Ch : **Charge**

TU : Turbine

TE1 : Turbine d'entrainement du compresseur

TE2 : Turbine d'entraînement de la charge

NEAL : Nouvelle Energie Algérie (New EnergyAlgeria)

SPP I : Centrale solaire 1 (Solar Power Plant One)

ISCCS : Centrales à cycles combinés intégré avec le solaire

TAG : Turbine à gaz

ISO : Organisation internationale de normalisation

DLN : Sec Faible en NOX (dry Low NOX)

TAV : Turbine à vapeur

HRSg : Générateur de vapeur à récupération de chaleur (Heat Recovery Steam Generators)

CEP : Pompes d'extraction d'eau condensée

HTF: Fluid caloporteur (Heat transfer fluid)

SAM : Modèle de conseiller système (System advisor model)

S.I : Système international

Csv : Fichier qui porte l'extension

NREL: Laboratoire national des énergies renouvelables (National Renewable Energy Laboratory)

Luz LS-2 : Type de collecteur

Schott PTR70 : Type d'absorbeur

HP : Haute pression

MP/BP : Moyenne pression/Bas pression

Résumé

Dans le contexte de la modernisation, l'utilisation de l'énergie sous sa forme électrique est un atout sans égal, sa production nécessite de transformer d'autres énergies dites primaires vers cette forme, plusieurs technologies peuvent être mise en service selon la disponibilité des ressources naturelles (gaz, soleil, etc.), de ce fait, pour déterminer l'habilité d'un site à être favorable pour une exploitation industrielle à des fins de production d'électricité issu du soleil, une étude météorologique est capitale, dans notre cas, le choix se porte vers la centrale CSP HassiR'mel, un dimensionnement et les caractéristiques de la centrale sont nécessaires pour intégrer ces données dans un outil informatique (SAM) et simuler la partie solaire, ainsi des facteurs comme le DNI et la durée d'insolation influent considérablement sur la capacité énergétique d'une centrale CSP.

Mots clés: Production d'électricité, centrale CSP HassiR'mel, Dimensionnement, simulation, SAM

Abstract

In the context of modernization, the use of energy in its electrical form is an unequalled asset, its production requires transforming other so-called primary energies into this form, several technologies can be put into service depending on the availability of natural resources (gas, sun, etc.), therefore, to determine the ability of a site to be favorable for industrial exploitation for the purpose of producing electricity from the sun, a meteorological study is essential, in our case, the choice is towards the CSP HassiR'mel plant, sizing and the characteristics of the plant are necessary to integrate these data into a computer tool (SAM) and simulate the solar part, as well as factors such as the DNI and the sunshine duration considerably influences the energy capacity of a CSP plant.

Keywords: Electricity production, CSP HassiR'mel plant, Sizing, simulation, SAM

INTRODUCTION GENERALE

La production de l'énergie électrique est un facteur essentiel de développement et de l'évolution des sociétés humaines, sa production suscite un intérêt particulier étant donné qu'elle est la base de tous les technologies modernes, devenant indispensable dans notre vie quotidienne, sa demande devient une préoccupation capitale, diversifiant au passage, son mode de production par l'utilisation de plusieurs ressources énergétiques variées.

La conversion d'une énergie primaire en électricité exploitable par l'être humain est assuré par les centrales électriques, de ce fait, le fonctionnement de celle-ci dépend selon les ressources utilisées, la disponibilité d'une ressource particulière est un facteur non négligeable afin de choisir le type de centrale adéquate, en Algérie, du fait de son emplacement géographique, une forte présence des ressources naturelles sont ni ou moins à disposition, le site de HassiR'mel répond aux exigences, du fait de la disponibilité sur place du gaz naturel et un gisement solaire en abondance, ces derniers font de HassiR'mel un endroit favorable pour une centrale CSP, ce type de technologies, en principe, combinent des turbines fonctionnant aux gaz naturels et des turbines utilisant de la vapeur, faisaient tourner des alternateurs pour produire de l'électricité.

Etant donné la diversification des systèmes informatiques et la disponibilité des logiciels puissants, il est dans notre champ d'application de les prendre en main, et de les utiliser pour accomplir notre mémoire, notre travail sera subdivisé en quatre chapitres présentés comme suite :

En premier lieu, dans le premier chapitre nous allons introduire des notions de bases sur les énergies ainsi que leurs sources, voir les principes de fonctionnement des centrales solaires et leurs classifications, ainsi que la technologie déployée dans ce domaine.

En second lieu, dans le deuxième chapitre, des généralités sur les turbomachines, turbines à gaz, turbines à vapeur, leurs principes de fonctionnement, leurs classifications ainsi que quelques éléments qui les composent.

Le troisième chapitre, consiste à dimensionner la centrale ISSCS HassiR'mel, voir son principe de fonctionnement, les composants qui la constitue, ainsi que leurs caractéristiques techniques.

Au final, dans le quatrième chapitre, nous allons procéder à la simulation de la partie solaire de la centrale ISSCS HassiR'mel, deux logiciels seront nécessaires, METEONORM qui va générer des données météorologiques du site concerné, que nous introduirons dans le logiciel de simulation SYSTEM ADVISOR MODEL, afin d'obtenir une reproduction la plus fidèlement possible, et ainsi avoir des résultats justes.

Chapitre I : Etat de l'art

1) Introduction :

Dans la vie quotidienne de l'être humain l'énergie électrique prend une place d'une importance capitale, ainsi le développement et la modernisation de notre société implique un apport de plus en plus croissant en besoins énergétiques, de ce fait, dans ce présent chapitre nous allons voir les généralités sur les énergies ainsi que les différents types d'énergies, nous allons aussi définir l'importance de l'énergie électrique, brièvement son histoire et les différentes méthodes de sa production, aussi les technologies employées dans l'industrie afin de la produire, nous allons s'intéresser à différentes technologie de concentration des rayonnements solaire et leurs utilité, définir des notions de bases sur le rayonnement solaire

2) Définition :

L'énergie est définie en physique comme la capacité d'un système à produire un travail, entraînant un mouvement ou produisant par exemple de la lumière, de la chaleur ou de l'électricité. L'énergie ne disparaît jamais ; elle se transforme d'une forme en une ou plusieurs autres. Elle s'exprime en joules ou en kilowattheure (kWh).

3) Les sources d'énergie :

On désigne par énergies primaires les formes d'énergie telles quelles sont captées dans la nature.

Les principales ressources énergétiques sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Tableau représentant les différents types de sources d'énergie ainsi que leurs avantages et inconvénients

Sources d'énergie	Avantages	Inconvénients
Fossiles : - Pétrole - Gaz - charbon	- Faciles à exploiter	- Production de CO ₂ - Epuisable
Nucléaire	- Moins cher aujourd'hui. - Moins de CO ₂	- Epuisable - Déchet radioactifs - Risque d'accident nucléaire.
Renouvelables: - Eau - Soleil (thermique et photovoltaïque) - Vent - biomasse (bois, plantes...) - Géothermie	- Inépuisables à notre échelle. - Peu ou non polluantes	- Ne peuvent être implantées de partout. - Coût plus élevé. - Faible puissance. - Fabrication recyclage des cellules photovoltaïques

4) Production d'électricité :

4.1) Historique de la production d'électricité :

L'évolution de nos sociétés humaines est très étroitement liée à la découverte d'énergie. En apprenant à maîtriser le feu, la force du vent et de l'eau, à utiliser le bois, le charbon, le pétrole... les hommes ont sans cesse cherché à améliorer leur bien-être. Mais, selon la façon dont l'énergie est produite, partagée ou utilisée, elle peut aussi être un facteur de régression.

Les premiers hommes ne pouvaient compter que sur leur force musculaire pour se déplacer, chasser, façonner des objets et les transporter, construire leurs abris.

Vers 400 000 ans avant notre ère, les hommes préhistoriques apprennent à utiliser du bois pour faire du feu : ils peuvent désormais se chauffer, s'éclairer, faire cuire leur nourriture et éloigner d'eux les bêtes sauvages ! Ce fut un progrès fondamental pour l'évolution de l'humanité. Au Néolithique, entre 9000 et 3300 ans avant notre ère, les hommes commencent à cultiver la terre et domestiquent des animaux qui, pour certains, deviennent alors une source d'énergie pour tracter les charrues, transporter les ressources... en facilitant ainsi le travail de tous les jours. À la fin de cette période (3000 ans avant notre ère), une autre source d'énergie, la force du vent, devient l'alliée des hommes : ils construisent les premiers bateaux à voile, permettant des échanges fluviaux et maritimes de plus en plus lointains et la découverte de nouveaux horizons. C'est 200 ans avant notre ère que les premiers moulins à vent apparaissent en Perse. Durant toute l'Antiquité, le Moyen-Age et jusqu'au XIX^e siècle, si on fait abstraction de la force humaine, notamment à travers l'esclavage, l'énergie mondiale consommée par l'humanité provient à plus de 95% du bois. Elle est utilisée pour se chauffer, cuisiner, s'éclairer, cuire les poteries et forger les métaux. Mais avec l'utilisation massive du charbon de bois pour la métallurgie, la ressource à commencer à s'épuiser dans certaines régions. Les hommes se sont alors tournés vers une nouvelle source d'énergie : le charbon (bois fossilisé).

Aujourd'hui, l'électricité est devenue une énergie incontournable. Sans elle, plus d'éclairage, ni de force motrice, ni de distribution d'eau, ni de communication. L'électricité est produite dans des usines appelées "centrales". Celles-ci transforment l'énergie primaire (thermique, nucléaire, hydraulique, éolien) en énergie électrique que l'on appelle énergie secondaire.

Dans les centrales, l'électricité est fournie par les groupes "turbo-alternateur". La turbine est en liaison mécanique complète avec la partie tournante de l'alternateur (le rotor). Ce rotor crée un champ magnétique tournant qui donne naissance à un courant électrique dans le stator (partie fixe de l'alternateur). Une centrale thermique produit l'énergie électrique à partir d'une énergie calorifique obtenue en brûlant du charbon, du fioul ou du gaz. En brûlant ce combustible dans une chaudière, on obtient de la vapeur sous forte pression, laquelle entraîne des turbines à grande vitesse (1500 ou 3000 tr/mn) qui actionnent un alternateur. [1]

4.2) Modes de production de l'énergie électrique :

Une des souplesses signalées du système électrique est de pouvoir disposer de moyens de production alimentés par les sources d'énergie les plus diverses, dont les caractéristiques techniques et économiques sont suffisamment variées pour satisfaire à tous les aspects de la demande, et dont les localisations géographiques peuvent être très différentes, imposées soit par la source d'énergie, soit pour le bon équilibre dynamique du réseau.

Un groupe de production se caractérise par de nombreux paramètres techniques dont on ne cite ici que les principaux :

-) Sa puissance unitaire nominale ;
-) Son domaine de fonctionnement en tension et en fréquence ;
-) Son minimum technique (sa puissance minimale en fonctionnement continu) ;
-) Son temps de démarrage, son aptitude à participer au réglage de la fréquence ;
-) Sa capacité de suivi de charge.

5) Centrales électriques:

Une centrale électrique est un site industrielle destiné à la production d'électricité, elles alimentent en électricité le réseau électrique utilisé pour alimenter des milliers d'installations à travers le monde, que ce soit industrielles ou bien des foyers conventionnelle. La production d'électricité y est assurée par la conversion d'une énergie dit primaire (généralement une énergie mécanique) issue des exploitations, soit la force du vent, force de l'eau des rivières, des marées ou soit chimique comme la combustion, soit nucléaire ou bien solaire, pour la transformer en électricité.

Les énergies primaires peuvent être renouvelables ou non-renouvelables (réserves limitées), selon leur provenances.

Le fonctionnement des centrales électrique est quasiment le même pour toutes, on fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur pour produire de l'électricité.



Figure 1 : Centrale électrique

Les technologies de turbines sont disponibles selon le fluide utilisé pour les actionner :

-] Turbine à vapeur ;
-] Turbine à combustion (communément, mais improprement appelée turbine à gaz) ;
-] Turbine hydraulique ;
-] Eolienne.

6) Centrale solaire :

6.1) Définition :

Une centrale solaire est un ensemble d'équipement et de machine qui transforme les rayons du soleil en électricité, vu qu'elles possèdent toutes le même principe de fonctionnement, il existe différents type de centrales solaires, elles concentrent les rayons du soleil pour chauffer à très haute température un liquide spéciale non vaporisable, Ce liquide chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité. La vapeur d'eau est alors condensée (retourne à l'état liquide) grâce à une tour de refroidissement.

6.2) Classification selon les énergies :

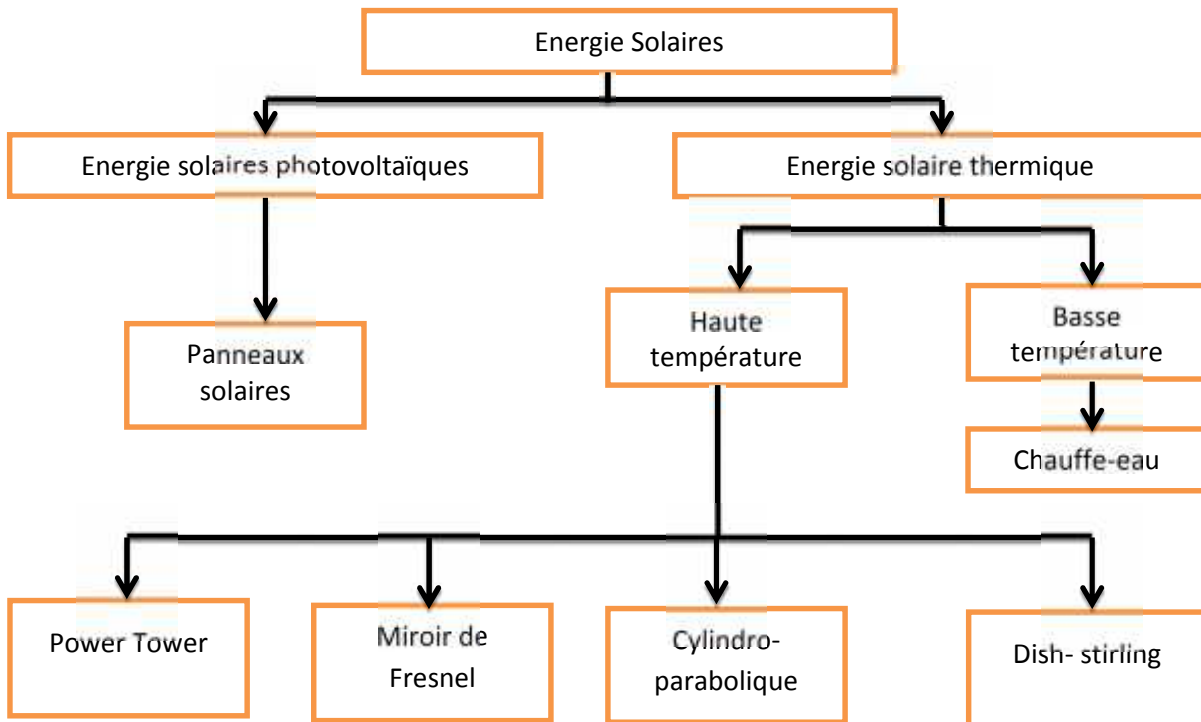


Figure 2 : Schéma représentatif des différents types des énergies solaire.

Les figures ci-dessous représentent les principaux systèmes de concentration de rayons solaire (Fig.3) :

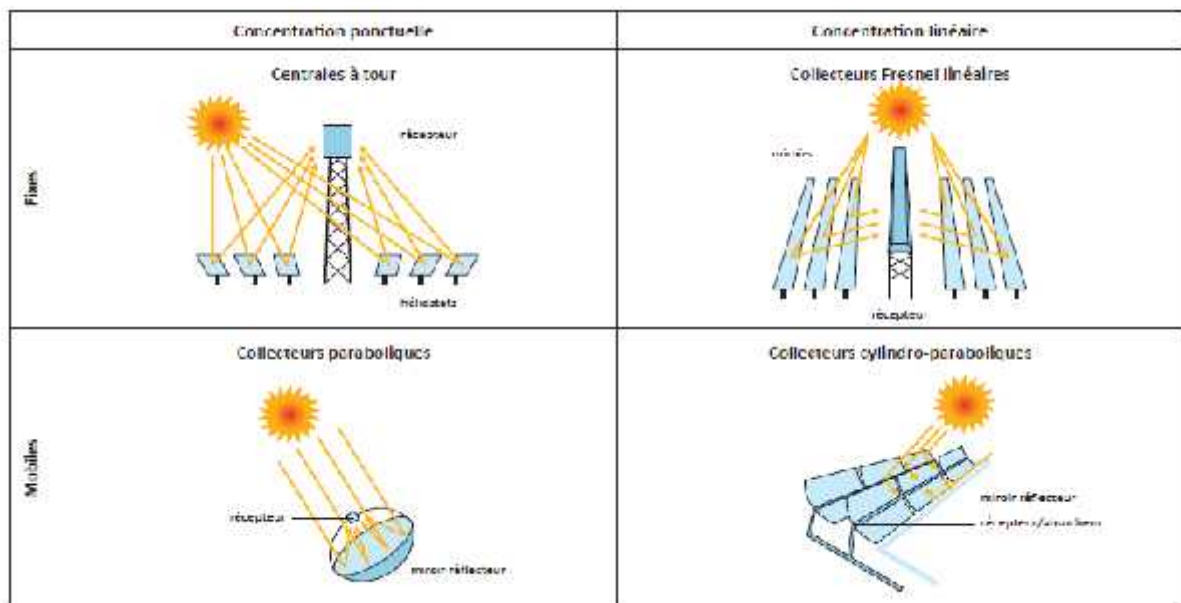


Figure 3 : Représentation schématique des principaux systèmes de concentrations

On remarque que les concentrateurs ponctuels procèdent un facteur de concentration plus élevé que ceux des concentrateurs linéaires.

6.3) Installations solaires photovoltaïques :

Une Installation photovoltaïque est un moyen de production d'électricité qui permet de produire de l'électricité grâce à la lumière du soleil, Les panneaux solaires installés en rangées et reliés entre eux captent la lumière du soleil. Sous l'effet de la lumière, le silicium, un matériau conducteur contenu dans chaque cellule, libère des électrons pour créer un courant électrique continu. Un onduleur transforme ce courant en courant alternatif pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau.[2]

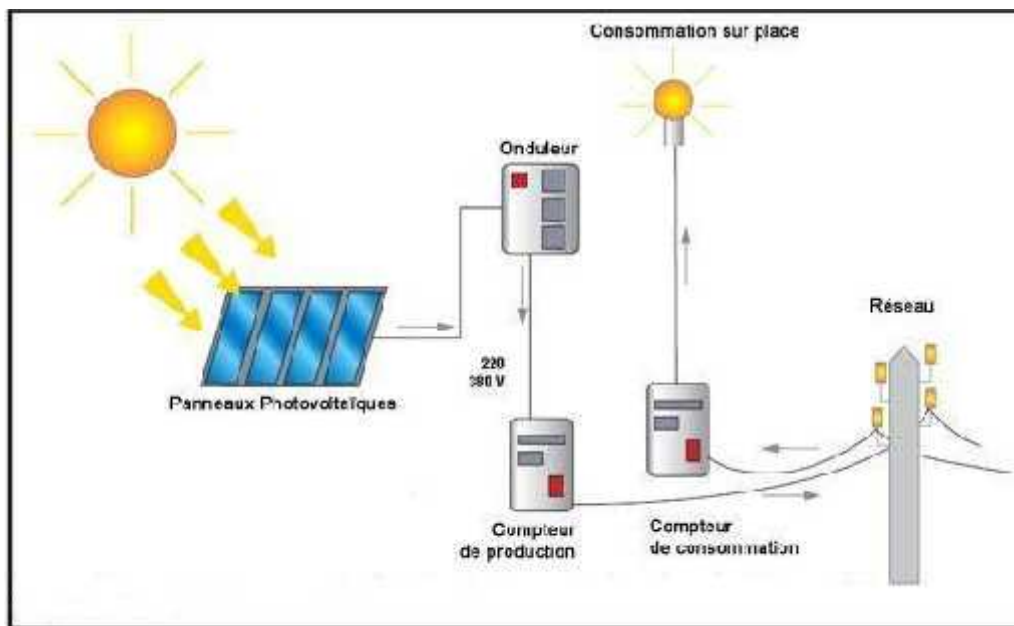


Figure 4 : Schéma d'une installation photovoltaïque connecté au réseau

6.4) Application de l'énergie solaire :

6.4.1) Basse température :

Les installations thermiques solaires à basse température sont considérées comme des installations à énergie solaire produisant de la chaleur utile à des températures inférieures à 100° C grâce à l'énergie solaire. Les panneaux solaires thermiques, ou capteurs solaires thermiques ou chauffe-eau solaire individuel (CESI), sont des éléments qui permettent de chauffer de l'eau grâce à l'énergie solaire. Il ne faut pas les confondre avec les panneaux solaires photovoltaïques qui produisent de l'électricité à partir du rayonnement solaire. Les panneaux solaires thermiques sont le plus couramment destinés à produire de l'eau chaude sanitaire, ils peuvent être utilisés pour le chauffage (voire à la climatisation) d'un logement, ou bien chauffer l'eau d'une piscine.[3]

6.4.2) Haute température :

Une centrale solaire thermodynamique à concentration (ou centrale solaire thermique ou encore héliio-thermodynamique, en anglais CSP pour (Concentrating Solar Power Plant) est une centrale qui concentre les rayons du soleil à l'aide de miroirs afin de chauffer un fluide caloporteur, ainsi l'énergie thermique issue est utilisée pour produire de l'électricité.

Tout comme le solaire photovoltaïque, Le solaire thermodynamique tire profit du rayonnement solaire pour produire de l'électricité. Mais ces deux technologies la valorisent différemment. Alors que pour le photovoltaïque, le rayonnement solaire est directement converti en électricité, Le solaire thermodynamique le converti en chaleur puis fait intervenir un organe de conversion électrique.

Précisément, Le solaire thermodynamique, désigne l'ensemble des techniques visant à transformer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur, puis à convertir cette chaleur en énergie mécanique et électrique au moyen d'un cycle thermodynamique moteur couplé à une génératrice électrique (par exemple une turbine et un générateur). Le solaire thermodynamique est principalement destinée aux pays à fort ensoleillement et se démarque des centrales photovoltaïques par la possibilité de lisser plus facilement la production grâce à un stockage thermique tampon, moins onéreux que les systèmes de batteries.

6.5) Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'une centrale solaire suite en générale le même principe que les autres centrales dites conventionnelles (centrales thermiques, centrales nucléaires), En principe on transforme de la chaleur en énergie électrique, soit en chauffant un fluide caloporteur ou bien un gaz porté à haute température et haute pression qui a son tour fait tourner une turbine. Puis grâce à un couplage entre la turbine et un alternateur, l'énergie mécanique est transmise vers ce dernier, produisant à son tour de l'électricité, cependant, pour avoir un rendement optimal, le fluide caloporteur ou le gaz doivent impérativement être porté à haute température, les capteur solaire ne permettent pas d'obtenir les très hautes température nécessaire pour faire fonctionner le système, donc la solution d'une centrale solaire est de concentrer les rayons du soleil vers un point, de la même manière qu'une loupe focalisassent les rayons pour enflammer les objets.

On peut classer le procédé de production d'électricité par le rayonnement solaire comme un processus direct. Certes l'énergie solaire étant peu dense, concentrer cette dernière permet d'obtenir des températures exploitables, soit en un point ou bien en une ligne, l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur, la donnée la plus importante pour définir l'intensité de la concentration est le **facteur d'interception*** plus il est élevé, plus la température atteinte sera importante.

Facteur d'interception : ce coefficient permet d'évaluer l'intensité de la concentration solaire, plus le facteur de concentration est élevé, plus la température atteinte sera importante.

$$F_a \quad d'ir = \frac{P_a \quad p \quad l \quad s}{P \quad d'ir \quad a}$$

Une centrale solaire thermique est aussi appelée centrale solaire thermodynamique à concentration. Elle se compose de deux éléments principaux :

-) Champ solaire (miroirs, récepteurs, chaudière)
-) Bloc de puissance (turbines, alternateurs,)

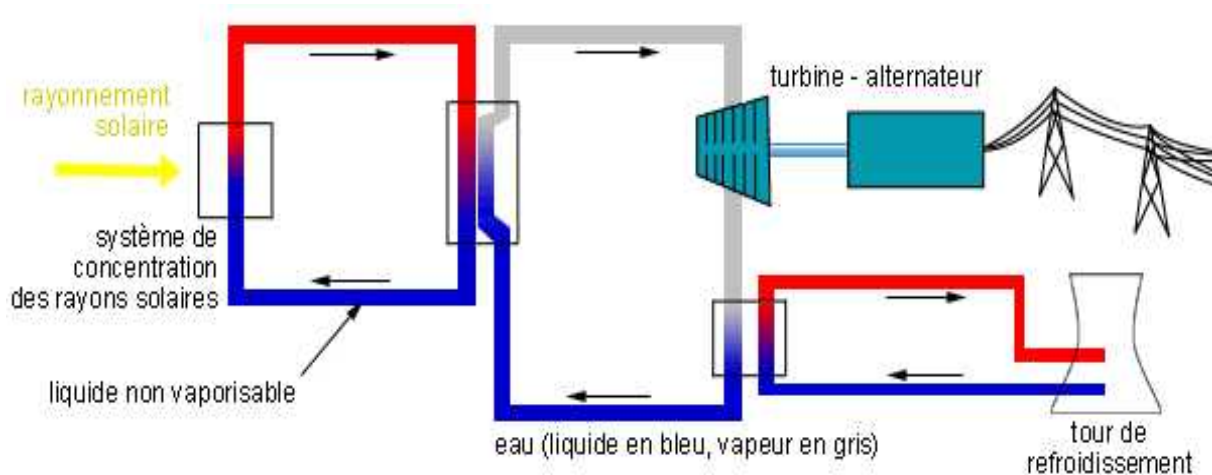


Figure 5 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire

Une centrale solaire est un ensemble d'équipement et de machine qui transforme les rayons du soleil en électricité, vu qu'elles possèdent toutes le même principe de fonctionnement, il existe différents type de centrales solaires, elles concentrent les rayons du soleil pour chauffer à très haute température un liquide spéciale non vaporisable, Ce liquide chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité. La vapeur d'eau est alors condensée (retourne à l'état liquide) grâce à une tour de refroidissement.

Le principal inconvénient d'une centrale solaire est qu'elle ne peut pas produire d'électricité la nuit, ainsi qu'elle est dépendante des conditions météorologiques et de l'ensoleillement.

Certes pour l'inconvénient de la nuit il existe deux solutions pour palier à ce problème :

-) Soit on stocke durant le jour une partie de la chaleur apportée par le fluide non vaporisable dans un accumulateur (cette chaleur sera libérée durant la nuit et exploitée)
-) soit on utilise des carburants fossiles comme le gaz par exemple pour chauffer le liquide non vaporisable. Pour cela, on installe dans la centrale une chaudière à gaz qui prend le relais des miroirs la nuit et qui s'arrête au matin.

Cependant pour les conditions météorologiques il n'existe aucune solution de nos jours.

6.6) Rendement des centrales solaire :

Le rendement d'une centrale solaire est assez faible, environ 16%, en comparaison avec les autres centrales, par exemple les centrales thermiques avec 38.5% et les centrales

nucléaires estimé à 33%. Certes ces données sont des estimations moyennes, il se peut qu'il existe des écarts considérables d'une centrale à une autre. Du fait de ce faible rendement, on installe ces centrales solaires dans des zones dites favorables, c'est-à-dire des zones de climat sec avec un ensoleillement fort (supérieur à $1800 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$) et long durée (supérieure à 3000 heures par an).[4]

7) Potentielle énergétique du soleil :

Chaque année la quantité d'énergie reçue par la Terre est phénoménale, environ 10^{15} Wh , elle est équivalente à près de 8000 fois le besoin énergétique de toute l'humanité, l'exploitation de une infime partie de cette énergie (environ 0.02%) va subvenir tous nos besoins, on remarque aussi que l'énergie issue du soleil est présente dans d'autres formes moins subtiles, elles comprennent aussi l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, une part des énergies marines et la biomasse (bois-énergie, biogaz, biocarburant), étant donné que les rayons du soleil sont un facteur primordial pour les courants marins la photosynthèse.

Wh : unité de mesure d'énergie elle permet de mesurer la **quantité** de travail réalisée ou générée.

Par un temps clair, la surface de la Terre reçoit environ 1000 W/m^2 . Ce rayonnement est constitué de longueur d'onde en grande partie comprise entre 250 nm et 3000 nm. La plus grande partie sont les infrarouges à 50%, de la lumière visible à 40% enfin des Ultra-violet présent à 10%. Cependant, les conditions atmosphériques réduisent habituellement cette irradiation solaire, de 35% en un jour dégagé et sec et jusqu'à 90% pour une journée très nuageuse. Finalement, cela permet d'estimer qu'en moyenne, l'irradiation solaire sur le sol est de **198 W/m^2** . [5]

On remarque que l'irradiation solaire est réduite de 35% en moyenne, elle peut parfaitement varier selon la géolocalisation d'un pays à un autre.

8) Le rayonnement solaire :

8.1) Définition :

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Ce n'est que la manifestation externe des interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et de l'ensemble des interactions secondaires qu'elles génèrent dans son enveloppe. [6]

Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. Une partie de ce rayonnement est filtrée par la couche d'ozone avant d'atteindre la troposphère.

8.2) Absorption et réflexion :

Une partie du rayonnement atteignant un objet est absorbée et le reste réfléchi, habituellement, le rayonnement absorbé est converti en énergie thermique, ce qui augmente la température de l'objet. Les systèmes artificiels ou naturels, cependant, peuvent convertir une partie du rayonnement absorbé en une autre forme telle que l'électricité ou les liaisons chimiques, comme dans le cas des cellules ou des champs photovoltaïques.

8.3) Eclaircissement à la surface de la terre :

Le rayonnement solaire annuel moyen arrivant au sommet de l'atmosphère terrestre est d'environ 1361 W/m^2 . Les rayons du Soleil sont atténués au fur et à mesure qu'ils traversent l'atmosphère, laissant une irradiation de surface normale maximale à environ 1000 W/m^2 au niveau de la mer par temps clair. Lorsque 1361 W/m^2 arrivent au-dessous de l'atmosphère (lorsque le soleil est au zénith dans un ciel sans nuages), le soleil direct est d'environ 1050 W/m^2 , et le rayonnement global sur une surface horizontale au niveau du sol est d'environ 1120 W/m^2 . Ce dernier chiffre comprend le rayonnement diffusé ou réémis par l'atmosphère et ses environs. Le chiffre réel varie en fonction de l'angle du Soleil et des circonstances atmosphériques. Si l'on fait abstraction des nuages, l'insolation moyenne quotidienne pour la Terre est d'environ $6 \text{ kWh/m}^2 = 21,6 \text{ MJ/m}^2$. [32]

8.4) L'irradiation directe normale (DNI):

C'est la quantité de rayonnement solaire reçue par unité de surface par une surface toujours tenue perpendiculaire (ou normale) aux rayons qui viennent en ligne droite de la direction du soleil à sa position actuelle dans le ciel. En règle générale, vous pouvez maximiser la quantité d'irradiation reçue par une surface en la maintenant à la normale au rayonnement entrant. [7] Cette quantité présente un intérêt particulier pour les systèmes à concentrations des rayonnements solaire.

8.5) L'irradiation horizontale diffuse (DHI) :

L'irradiation horizontale diffuse (DHI), ou rayonnement diffus du ciel, est le rayonnement à la surface de la Terre provenant de la lumière diffusée par l'atmosphère. Elle est mesurée sur une surface horizontale avec un rayonnement provenant de tous les points du ciel à l'exclusion du rayonnement circumpolaire (rayonnement provenant du disque solaire). Il n'y aurait presque pas de DHI en l'absence d'atmosphère

8.6) L'irradiation horizontale globale (GHI):

L'irradiation horizontale globale est l'irradiation totale du soleil sur une surface horizontale sur Terre. C'est la somme de l'irradiation directe (après prise en compte de l'angle zénithal solaire du soleil, et de l'irradiation horizontale diffuse

$$H_t \quad (G) = N \quad (D) \times \cos(\theta) + H_d \quad (D)$$

θ : Angle d'incidence formé par la normale de la surface exposé au soleil et les rayons du soleil.

8.7) Instruments de mesure d'irradiation solaire :



Figure 6 : Pyranomètre, utilisé pour mesurer l'irradiation globale



Figure 7 : Pyrhéliomètre, utilisé pour mesurer l'irradiation normale directe

On remarque que l'irradiation directe normale est l'un des aspects les plus cruciaux lors de l'évaluation et de l'optimisation du concept technique pour une centrale CSP. Il convient de mettre l'accent sur une estimation approfondie du DNI pertinent pour un projet particulier et son emplacement spécifique. Chaque réduction de l'incertitude en termes de ressources solaires entraînera directement une meilleure prévisibilité des capacités de production d'énergie d'un concept particulier (qui peut être déterminée par la modélisation des performances).

Ces données, lorsqu'elles sont correctement appliquées, peuvent être corrélées avec des données de satellite. Ceci, conjointement avec des données satellites historiques (étirement au minimum de 10 ans), peut être utilisée pour projeter le potentiel solaire spécifique d'un site de projet pour la durée de vie de la centrale. Sans lectures sur site, l'incertitude dans le DNI pourrait atteindre $\pm 30\%$ dans certaines régions telles que l'Inde ou l'Afrique du Nord.

9) Potentielle de la technologie de la ressource solaire :

Du fait que l'ensoleillement joue un rôle considérable pour le bon fonctionnement et l'optimisation du rendement de cette technologie, le potentielle diffère selon la localisation géographique du site où on souhaite faire notre exploitation.

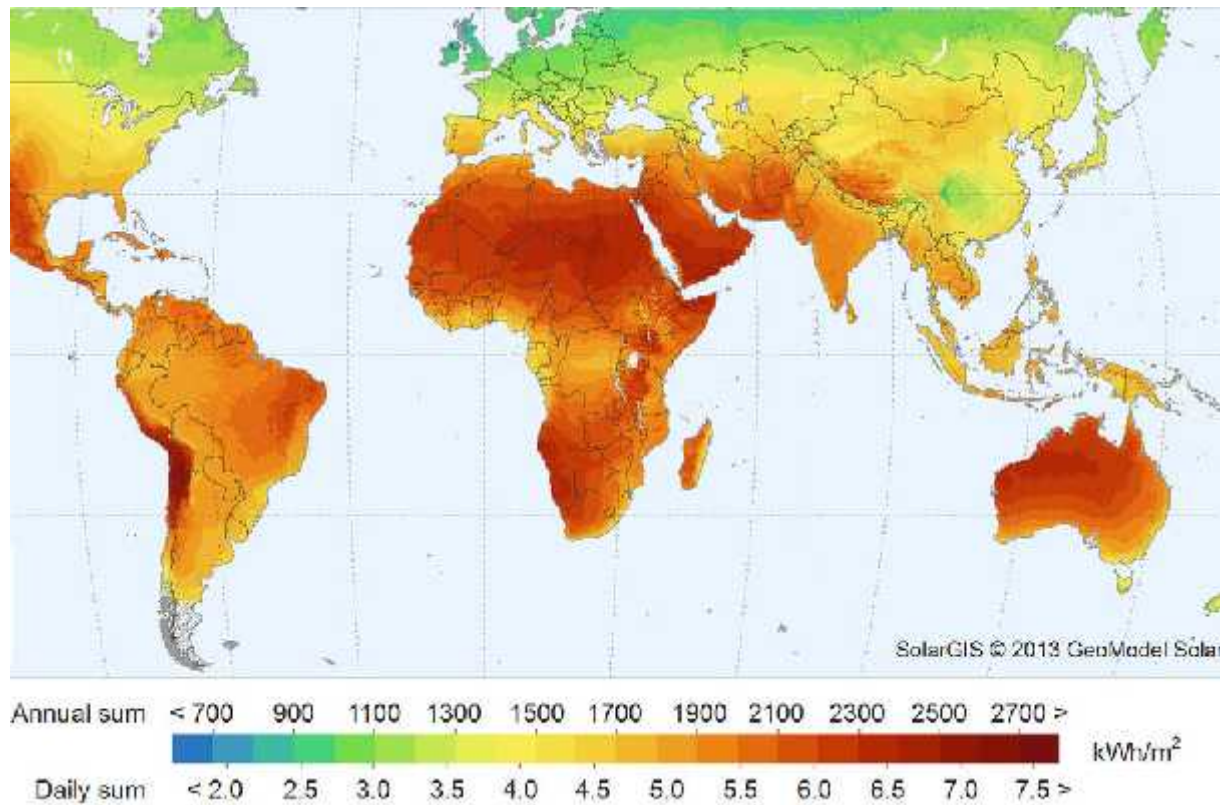


Figure 8 : carte du monde représentant le taux d'ensoleillement direct global[32]

On note que les zones qui tirent aux rouge sont les plus ensoleillé, donc les plus susceptibles d'avoir un rendement optimal et accueillir cette technologie.

Dans certains pays du monde, un kilomètre carré de terrain est suffisant pour générer 120Gwh d'électricité par an, équivalente à la production d'une centrale classique de 50 MW au cours d'une année.

Étant donné qu'il existe plusieurs solutions pour concentrer le rayonnement solaire, on aboutit à différent type de centrales solaire selon leurs caractéristiques.

La haute température est obtenu par la concentration optique des rayons du soleil, ainsi la chaleur atteinte est généralement comprise entre (400 – 1000) °C, on observe deux type d'usages principaux :

-) La production de chaleur (thermique).
-) La production d'électricité (thermodynamique).

En principe les concentrateurs optiques focalisent en un seul point les rayons du soleil réfléchis sur une surface de captage généralement formée de miroirs précisément positionnée afin de rediriger les rayons vers le point désiré. Différentes géométries de concentrateurs ont été expérimentées, des dispositifs de suivi de la course du soleil sont généralement exploités grâce à un dispositif de **Héliostats**, **cylindro-paraboliques**, **miroir de Fresnel** ou **dish-stirling**.

10) Centrale à tour:

10.1) Description :



Figure 9 : vue aérienne d'une centrale à concentration et tour

Dans ce type de centrale, de nombreux miroirs 'Héliostats' sont utilisés pour concentrer les rayons du soleil sur un dispositif de chaudière placé en haut de la tour, ces héliostats sont conçus de telle sorte qu'ils suivent la course du soleil toute au long de la journée, permettant ainsi avec une grande précision de réfléchir les rayons vers le foyer de la chaudière. Grâce à cette technique on peut augmenter le facteur d'interception élevé, ce qui permet d'atteindre des températures allant de 800°C à 1000°C.

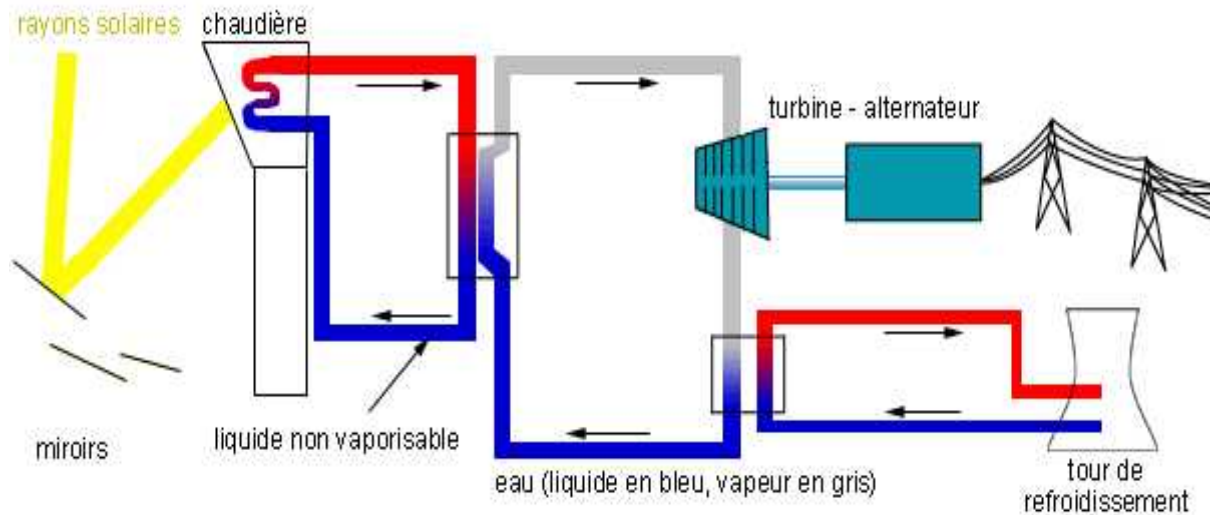


Figure 10 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à tour

10.2) Principales réalisations :

Tableau 2 : représentant des principales réalisations de centrales à tour dans le monde classé selon leur puissance.[8]

	TYPE : centrale à tour		
	Situation	Puissance (MW)	Année de mise en service
Ashalim Plot B	Israël	121	2019
DEWA CSP Tower	Dubaï, UAE	100	2019
Hami 50MW CSP	Chine	50	2020
LunengHaixi 50MW Molten Salt Tower	Chine	50	2019
NOOR III	Maroc	134	2019
TamarugalSolarEnergy	Chili	450	2017

11) Centrale à capteurs Cylindro-paraboliques :

11.1) Description :



Figure 11 : centrales à collecteurs cylindro-paraboliques

Aussi appelé centrales solaires thermiques de type Luz, est la technologie la plus mature actuellement, ce type de centrale se fonde sur des alignements de miroirs incurvés, ou « cylindro-paraboliques ». Au centre de chacun passe le fluide caloporteur, qui traverse l'ensemble du champ de captage.

De longs miroirs d'une forme hémicylindriques (demi-cercle) alignés parallèlement. Ces miroirs tournent autour d'un axe horizontal pour pouvoir suivre le soleil à chaque instant. Ces miroirs permettent de diriger les rayons du soleil vers un liquide caloporteur (liquide qui permet d'extraire la chaleur) qui sera ensuite chauffé d'où la nécessité d'intégrer un mécanisme de poursuite du soleil. La température du fluide peut atteindre 500°C. Lorsque le liquide est bien chauffé, il va être transféré vers un échangeur où le liquide sera mélangé avec de l'eau qui va au final se transformer en vapeur. Cette vapeur va entraîner une turbine qui permettra de produire de l'électricité, de la même manière que les centrales géothermiques. Depuis peu, certaines centrales sont capables de tourner jour et nuit grâce aux importantes capacités de stockage de la chaleur mises en place. [4]

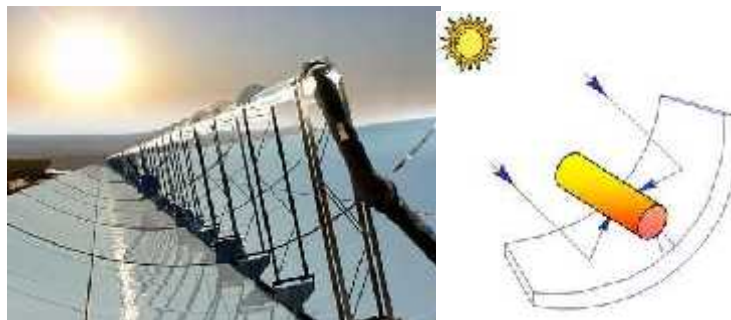


Figure 12 : Capteur de Downtown Beersheba et sa représentation

11.2) Principe de fonctionnement :

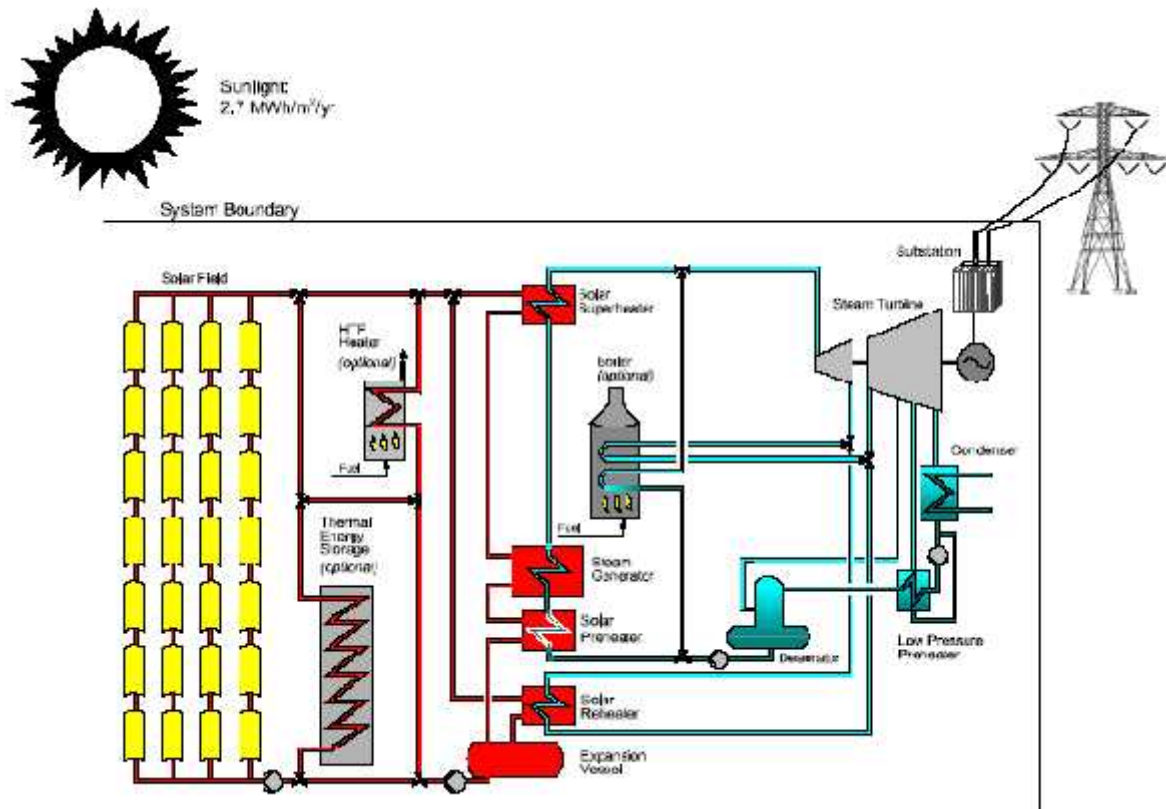


Figure 13 : Configuration typique d'une centrale à collecteursCylindro-paraboliques

11.3)Principales réalisations :

Tableau 3 : Quelle centrale à cylindro-parabolique dans le monde [8]

	TYPE : centrale à cylindro-parabolique		
	Situation	Puissance (MW)	Année de mise en service
Ashlim (Negev)	Israël	121	2019
Delingha 50MW Thermal oil Parabolic Trough	Chine	50	2019
DEWA CSP Trough	Dubaï, UAE	600	2019
Ilanga I	Afrique du sud	100	2018
Kathu Solar Park	Afrique du sud	100	2019
NOOR I	Maroc	160	2017
NOOR II	Maroc	200	2018

12) Centrale solaire à miroir de Fresnel :

12.1) Description :



Figure 14 : Centrale solaire Fresnel

Le principe d'un concentrateur de Fresnel réside dans ses miroirs plans (plats) dits "réflecteurs compacts linéaires". Chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube absorbeur.

Un fluide caloporteur est chauffé jusqu'à 500° en circulant dans ce tube horizontal. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité.[9]

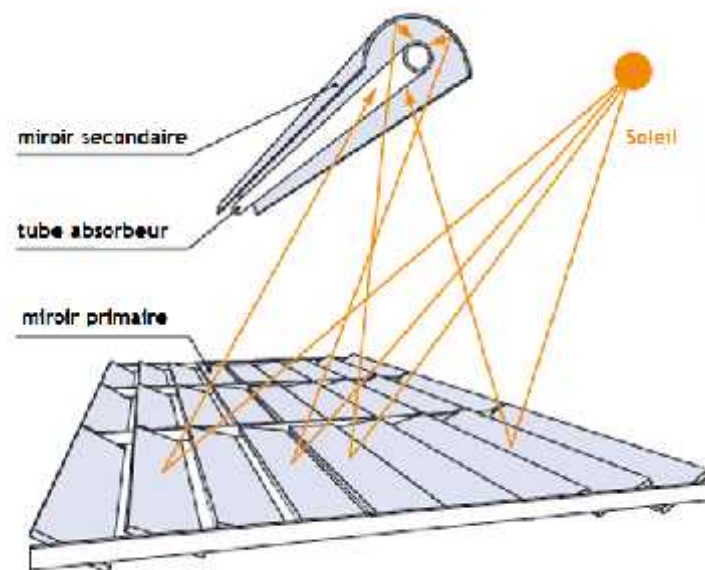


Figure 15 : Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel

Un premier étage de réflecteur est installé sur le sol. Le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur. Ce second étage de réflecteurs, en plus de réfléchir le rayonnement, joue aussi le rôle de récupérer les rayons perdus par débordement. Il est en effet recouvert d'une importante couche d'isolation en sa partie supérieure. La partie inférieure est quant à elle isolée par une vitre. Les principaux avantages de cette technologie par rapport aux concentrateurs traditionnels sont :

- Coût inférieur des miroirs
- Pas de vide à l'intérieur du tube récepteur, ce qui facilite sa conception et sa durabilité.
- Les contraintes mécaniques dus à la poussée du vent sont réduites par la disposition plane des miroirs.

13) Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling:

13.1) Description :



Figure 16 : Centrale parabolique

Le miroir parabolique réfléchit les rayons du soleil vers un point de convergence, le rayonnement solaire est alors concentré sur le récepteur qui monte en température. Le récepteur en question est un **moteur Stirling** qui fonctionne grâce à la montée en température et en pression d'un gaz contenu dans une enceinte fermée.

Ce moteur convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique et ensuite en électricité. Tout au long de la journée, le socle de la parabole s'oriente automatiquement face au soleil pour suivre sa course et ainsi profiter d'un ensoleillement maximum. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre 1000 °C sur le récepteur, et parvenir à des

rendements optimaux de conversion de l'énergie solaire en électricité en utilisant une faible quantité d'énergie.

La performance de l'ensemble du système est étroitement liée à la qualité optique de la parabole et au rendement du moteur Stirling.[9]

13.2) Le concentrateur :

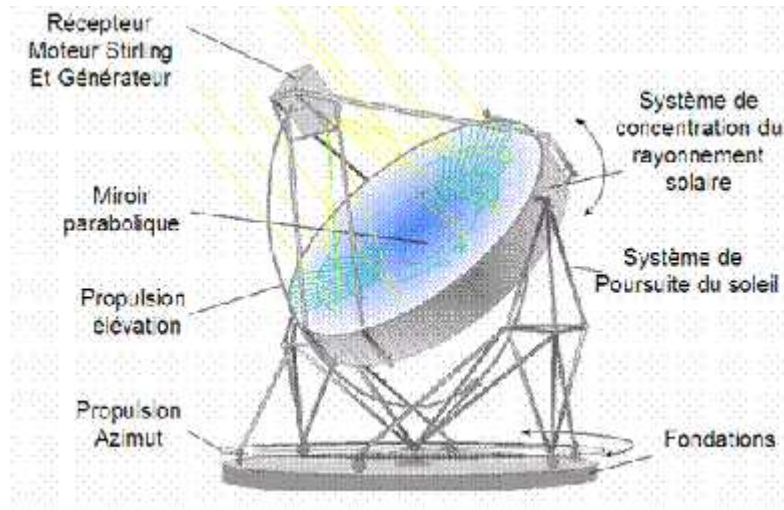


Figure 17 : Représentation d'une centrale dish-stirling

13.3) Le récepteur :

Le récepteur absorbe l'énergie réfléchie par le concentrateur et la transfère au fluide de travail du cycle de puissance. La température de la source chaude peut être adaptée en plaçant le récepteur plus ou moins loin du foyer du collecteur. Deux types de cycles peuvent être utilisés en aval du récepteur : le **cycle de Stirling**.

Dans le cas du moteur Stirling, le flux de chaleur transmis est intermittent, ce qui pose des problèmes de fatigue par dilatation thermique. Pour répondre à ce problème, un fluide intermédiaire (le plus souvent du sodium) est parfois utilisé entre le récepteur et le moteur Stirling. L'efficacité du transfert de chaleur atteint 90%

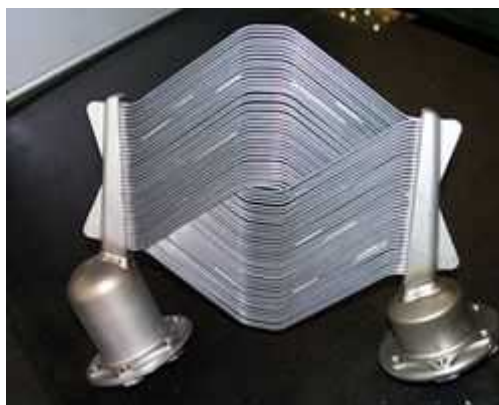


Figure 18 : Récepteur pour un cycle de Stirling

Dans le cas des cycles de Brayton, une technologie semblable à celle des tours solaire est utilisée : le rayonnement solaire est absorbé par une substance poreuse, qui réchauffe l'air d'alimentation du cycle.

14) Les aspects techniques :

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

- La concentration du rayonnement sur l'entrée du récepteur.
- Son absorption sur les parois du récepteur et la transformation de son énergie en chaleur.
- Le transport et, éventuellement, le stockage de cette chaleur.
- Sa délivrance à un cycle thermodynamique associé à un alternateur pour la production d'électricité.[10]

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons vu des généralités concernant les centrales solaires thermodynamiques, en expliquant leurs principes de fonctionnement et leurs classifications, ainsi que l'éclairement du soleil à la surface de la terre.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons des généralités sur les turbomachines et un aperçu sur leurs modes de classification.

Chapitre II : Généralités sur les turbomachines

1) Introduction :

Dans l'industrie de la production de l'énergie électrique l'importance des turbomachines est sans égal, de ce fait, dans ce présent chapitre nous allons s'intéresser à la technologie déployées dans ce secteur, vu la large gamme de choix et la complexité technique de cette dernière, nous allons voir les généralités sur les turbines, ainsi que leurs classifications.

2) Définitions

2.1) Turbomachines :

Les turbomachines sont des machines dans lesquelles un fluide (liquide ou gaz) échange de l'énergie à l'aide d'un ou plusieurs impulseurs (appelés aussi rotors ou roues). Ces derniers sont munis d'aubes (pompes et compresseurs), d'ailettes (turbines à gaz ou à vapeur) ou augets (turbine hydraulique Pelton). Pour une pompe par exemple, les aubes sont des obstacles profilés, plongés dans un écoulement de fluide. Elles constituent entre elles des canaux courbés dans lesquels le fluide s'écoule.[11]

2.2) Grilles d'aubes :

On appelle grille d'aubes, un ensemble fixe ou mobiles d'obstacles (aubes) déduites les unes des autres par un déplacement géométrique périodique utilisé pour guider l'écoulement du fluide et pour échanger avec lui un effort mécanique. L'effort mécanique résulte de la différence de pression entre les deux faces d'une aube. Sur l'Intrados d'une aube, la pression est plus élevée que sur l'extrados.

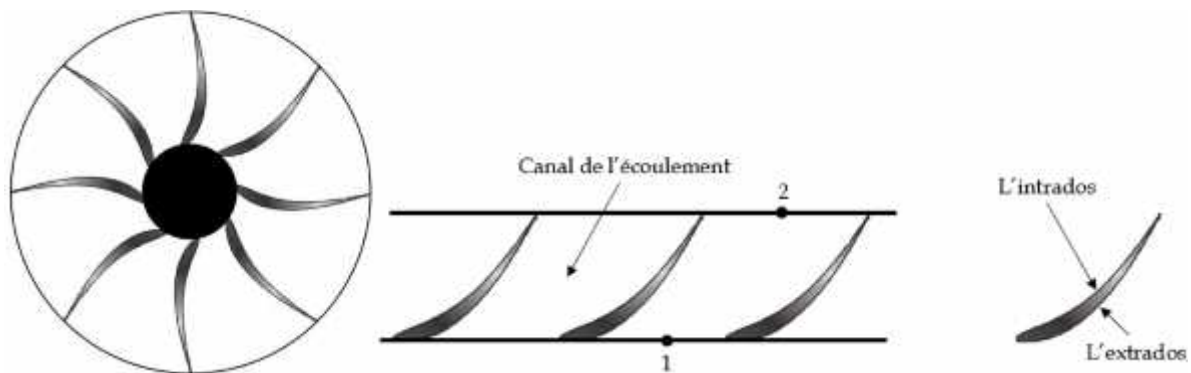


Figure 1 : Grille d'aubes

3) Classifications des turbomachines :

Les turbomachines constituent une grande famille de dispositifs/appareils utilisés dans l'industrie. On peut les situer par rapport aux autres machines à fluide à l'aide du tableau présenté ci-dessous. Selon la nature du fluide, elles sont divisées en deux parties : à fluide compressible et à fluide incompressible.

Tableau 4 : Classification des machines à fluides

Machines à fluides			
Machines volumétriques		Turbomachines	
Alternatives	Rotatives	Compressibles	Incompressibles
A piston	A vis	Turbine à gaz	Turbopompes
A membrane	A palettes	Turbine à vapeur	Turbines Hydrauliques
	A engrenages		

3.1) Selon la trajectoire du fluide :

La forme de trajectoire du fluide dans la roue d'une turbomachine fournit également une base de classification des types de turbomachines. En générale, on distingue :

3.1.1) Turbomachines radiales :

Dans ce type de turbomachine, le fluide traverse la roue (rotor) perpendiculairement à l'axe de l'arbre de la machine. Pour les machines radiales, on distingue les machines centrifuges (écoulement s'éloigne de l'axe) et les machines centripètes (l'écoulement se rapproche de l'axe). [11]

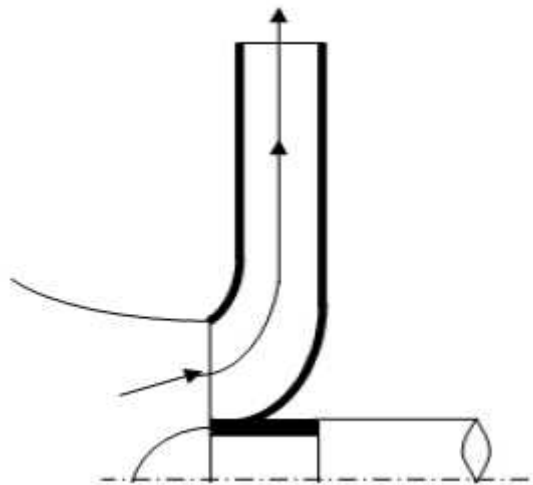


Figure 2 : Roue d'une turbomachine radiale

3.1.2) Turbomachines axiales :

Ici, le fluide traverse la roue de la machine parallèlement à l'axe.

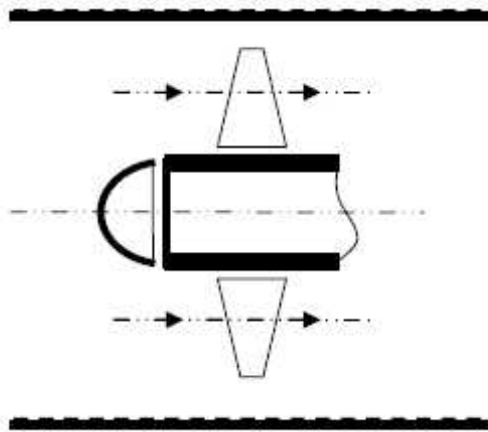


Figure 3 : Roue d'une turbomachine axiale

3.1.3) Turbomachines semi-axiales :

Ce sont des machines où le fluide traverse la roue de façon diagonale. Elles sont aussi appelées machines hélico-centrifuges ou hélicoïdale.

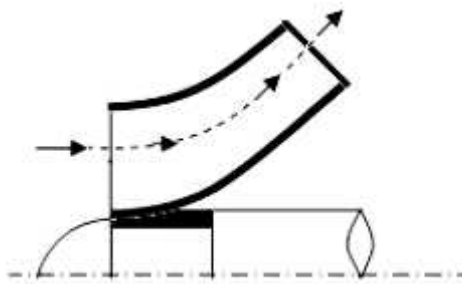


Figure 4 : Roue d'une machine semi-axiale

3.2) Selon la fonction de la machine :

Le sens de transfert de l'énergie entre la machine et le fluide peut aussi définir un type de classification de turbomachines. Dans le cas où la machine transmet de l'énergie au fluide (transfert d'énergie mécanique en énergie hydraulique), la machine est motrice (pompes, compresseurs). Dans le cas inverse (transfert de l'énergie hydraulique en énergie mécanique), la machine devient réceptrice (Turbines).

4) Turbine à gaz :

4.1) Définition :

La turbine à gaz est un moteur à combustion interne de tous les points de vue. Elle peut être considérée comme un système autosuffisant. En effet, elle prend et comprime l'air atmosphérique dans son propre compresseur, augmente la puissance énergétique de l'air dans sa chambre de combustion et convertit cette puissance en énergie mécanique utile pendant les processus de détente qui a lieu dans la section turbine. L'énergie mécanique qui en résulte est

transmise par l'intermédiaire d'un accouplement à une machine réceptrice, qui produit la puissance utile pour le processus industriel. [12]

Sous sa forme la plus simple, une turbine à gaz comprend un compresseur axial qui aspire l'air à la pression atmosphérique ; une chambre de combustion, où l'air comprimé est réchauffé à pression constante par la combustion d'une certaine quantité de combustible (gaz naturel, gasoil ou kérosène) et enfin une turbine de détente des gaz jusqu' à la pression atmosphérique.

4.2) Les éléments d'une turbine à gaz :

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

- Un compresseur axial qui a pour rôle de comprimer de l'air ambiant à une pression comprise aujourd'hui entre 10 et 30 bars environ ;
- Une chambre de combustion, dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement ;

Une turbine, généralement axial, dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion.[13]

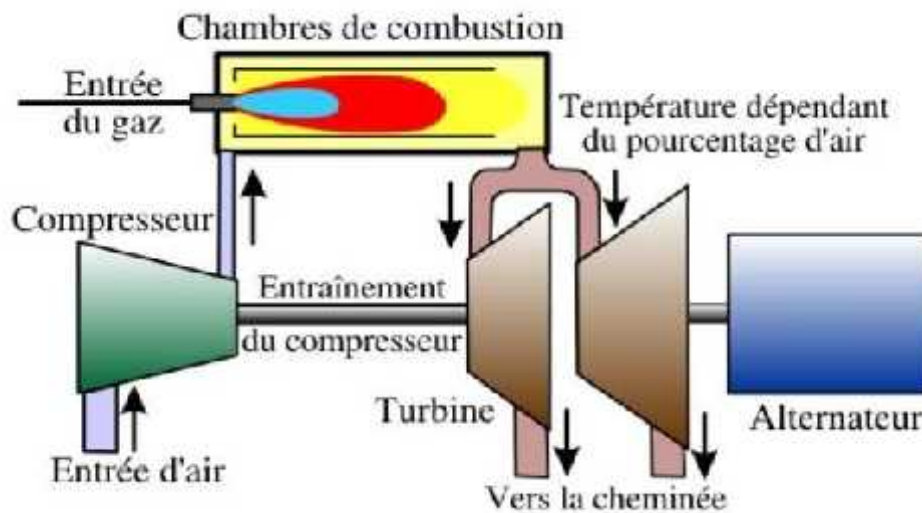


Figure 5 : éléments de la turbine à gaz

4.3) Classification des turbines à gaz :

On peut classer les turbines selon différents points :

-) Par le mode de travail.
-) Par le mode de fonctionnement thermodynamique.
-) Par le mode de construction.

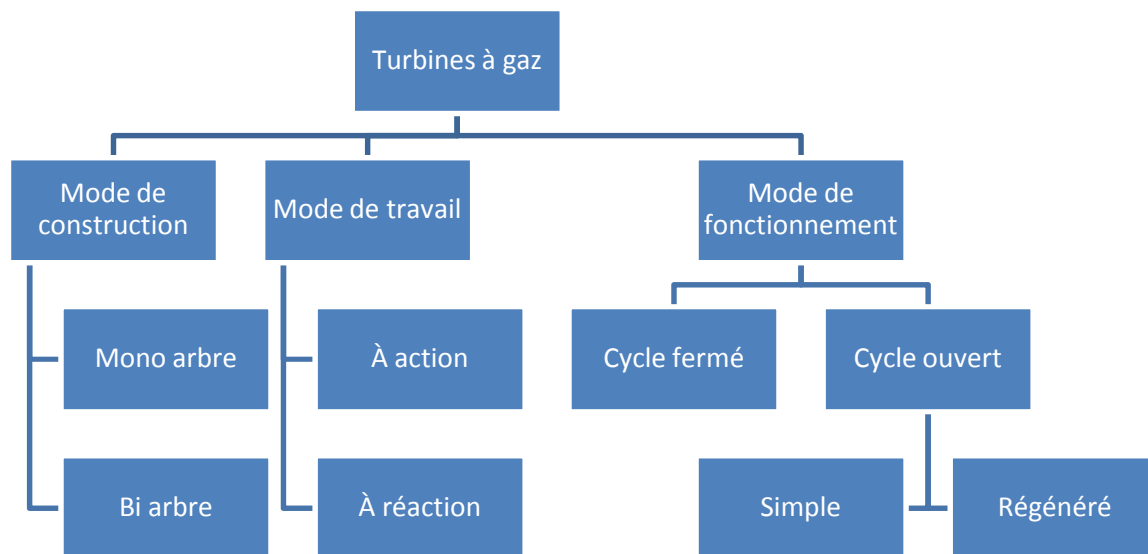


Figure 6 : Diagramme de classification des turbines à gaz

Explication :

4.3.1) Par le mode de construction :

L'objectif pour lequel, on utilise la turbine à gaz définit le type qu'on doit choisir. Dans l'industrie, on trouve les turbines à un seul arbre, dites aussi **monoarbre**. Elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entraîner les générateurs d'électricité). Un deuxième type, englobe les turbines à deux arbres (**bi-arbres**) ; elles ont l'avantage d'entraîner des appareils à charges variables (pompes, compresseur, ...). Elles se composent de deux parties, la première assure l'autonomie de la turbine, la deuxième est liée à la charge. Un troisième type peut être aussi cité, ce sont les turbines dites dérivées de l'aéronautique ; Elles ont une conception spéciale suivant le domaine dans lequel elles sont utilisées. Dans ce troisième type, la partie qui assure l'autonomie de la turbine existe toujours, et l'énergie encore emmagasinée dans les gaz d'échappement est utilisée pour créer la poussée, en transformant cette énergie (thermique et de pression) en une énergie cinétique de jet dans une tuyère.[14]

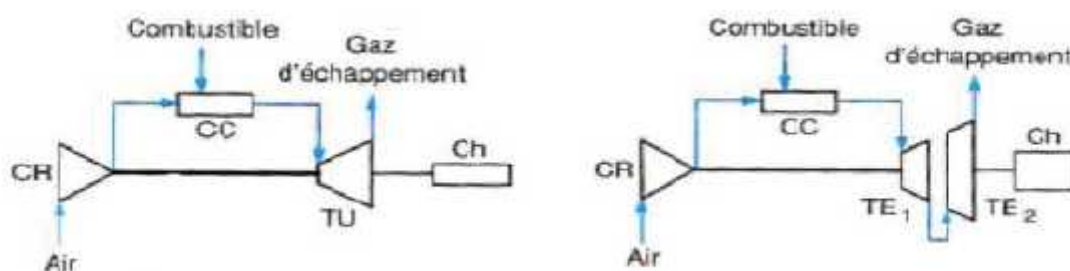


Figure 7 : schématisation de la turbine mono-arbre et bi-arbre

CR : compresseur d'air
CC : chambre de combustion
Ch : charge
TU : turbine
TE₁ : turbine d'entraînement du compresseur
TE₂ : turbine d'entraînement de la charge

4.3.2) Par le mode de travail :

On distingue deux types de turbine :

- a- **Turbine à action** : Où l'énergie thermique est transformée complètement en énergie cinétique dans la directrice. L'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression statique $P_1 > P_2 = P_3$.
- b- **Turbine à réaction** : Une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue en énergie cinétique et mécanique. L'évolution des gaz dans la roue se fait avec variation de la pression statique $P_1 > P_2 > P_3$. Le taux de réaction ϵ caractérisera le % d'énergie thermique totale.[12]

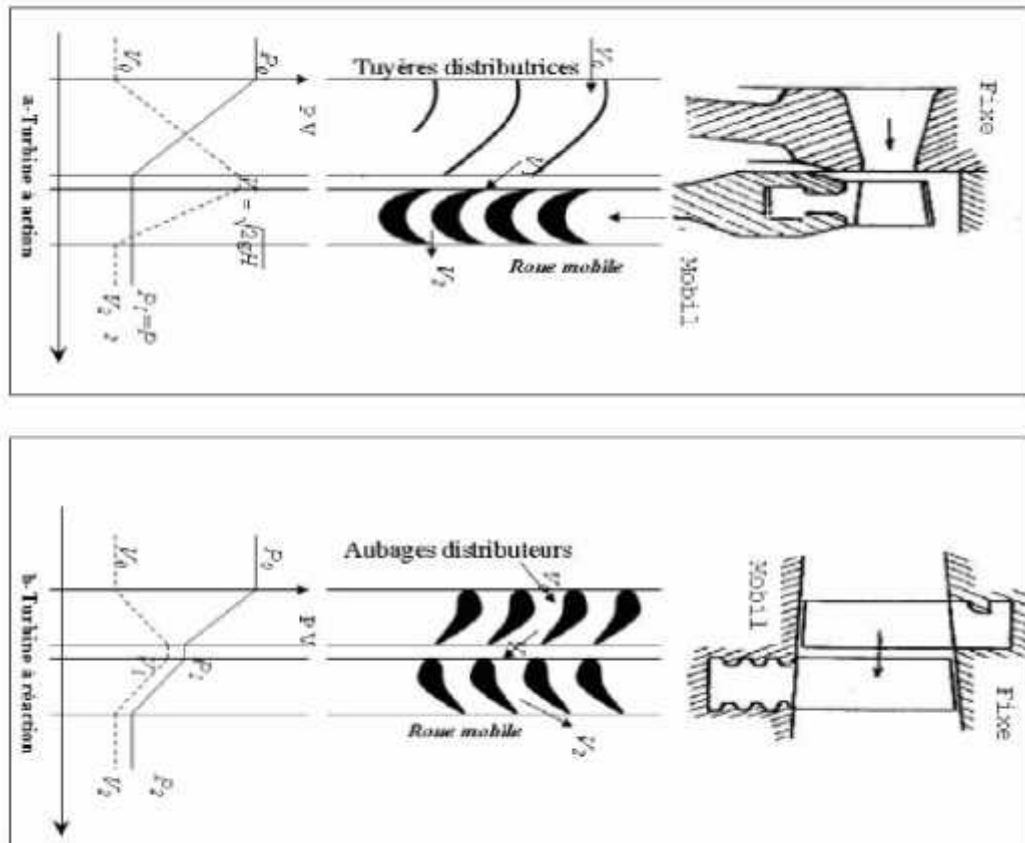


Figure 8 : Mode de travail

4.3.3) Par le mode de fonctionnement thermodynamique :

Il existe deux cycles thermodynamiques :

- a- **Turbine à gaz à cycle fermé :** Dans laquelle le même fluide est repris après chaque cycle.
- b- **Turbine à gaz à cycle ouvert :** C'est une turbine dont l'aspiration et l'échappement s'effectuent directement dans l'atmosphère.

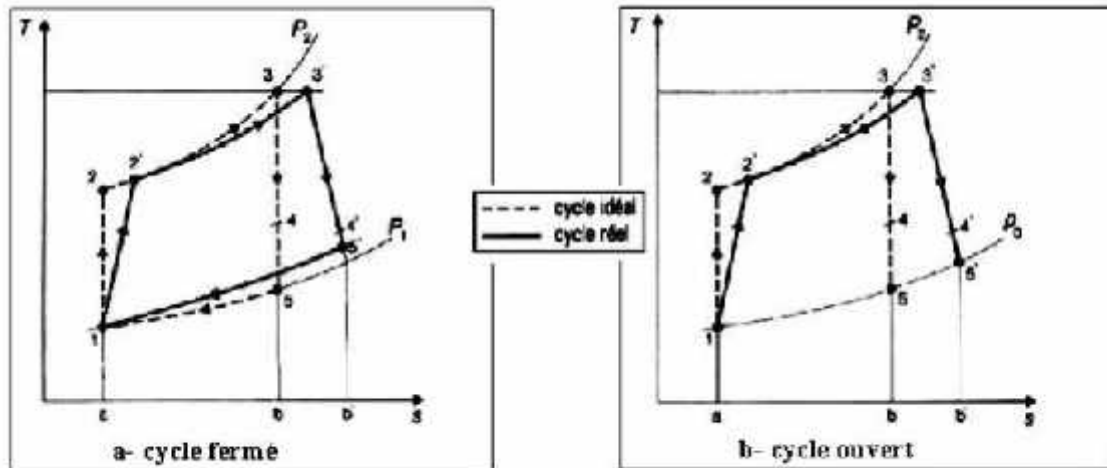


Figure 9 : Diagramme du cycle de Brayton des cycles ouvert et fermé[14]

4.3.3.a) Turbine à cycle simple :

C'est une turbine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique, après la détente les gaz possédant encore un potentiel énergétique sont perdus dans l'atmosphère à travers l'échappement. [14]

4.3.3.b) Turbine à cycle régénéré :

C'est une turbine dont le cycle thermodynamique fait intervenir plusieurs fluides moteurs dans le but d'augmenter le rendement de l'installation. De nos jours la turbine à gaz connaît une large utilisation et dans différents domaines et en particulier dans le domaine des hydrocarbures à cause de leur grande gamme de puissance et leurs propres avantages. [14]

4.4) Principe de fonctionnement de la turbine à gaz :

Après avoir aspiré de l'air du milieu extérieur, il sera comprimé à une pression plus élevée, amenée vers la chambre de combustion et enrichi par un combustible le mélange explose et sera augmenté vers un niveau d'énergie plus élevé, ainsi à température et pression plus élevées il est acheminé vers la section de la turbine qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre, ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie utile à la machine conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement et, de l'autre côté à fournir l'énergie nécessaire pour la compression de l'air, qui a lieu dans un compresseur relié directement à la section turbine, en fin, elle décharge à l'atmosphère les gaz à basse pression et température résultant de la transformation mentionnée ci-dessus.

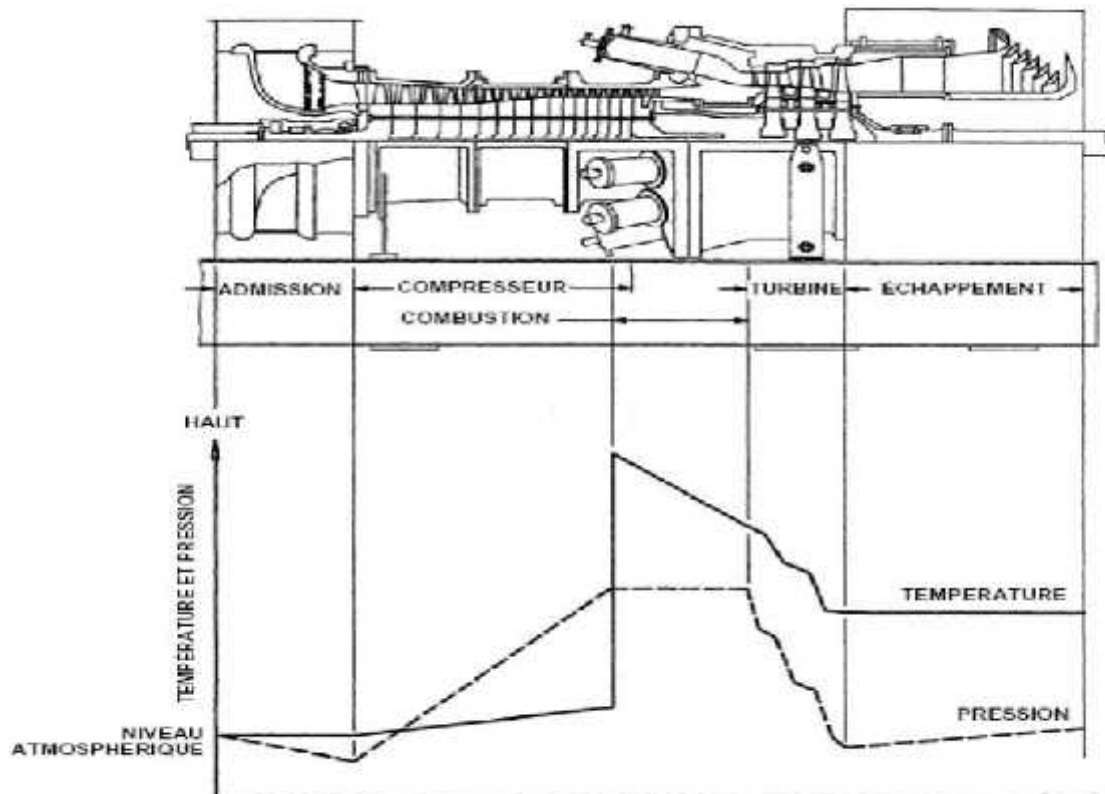


Figure 10 : Les variations de pression et de température dans les différentes sections de la turbine.

Le schéma montre les variations de pression et de température dans les différentes sections de la machine correspondant aux phases de son fonctionnement.[14]

4.5) Domaines d'application des turbines à gaz :

-) Des petites turbines à gaz sont utilisées pour motoriser les hélicoptères.
-) Des trains (Turbotrain).
-) Des chars d'assaut et des navires.
-) Aéronautique.
-) L'industrie pétrolière.
-) Centrale électrique.

5) Turbine à vapeur :

5.1) Définition :

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de Clausius-Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau. Elle transforme l'énergie thermique de la vapeur d'eau pendant la détente en énergie mécanique de rotation d'arbre pour entraîner un dispositif mécanique tournant.[15]

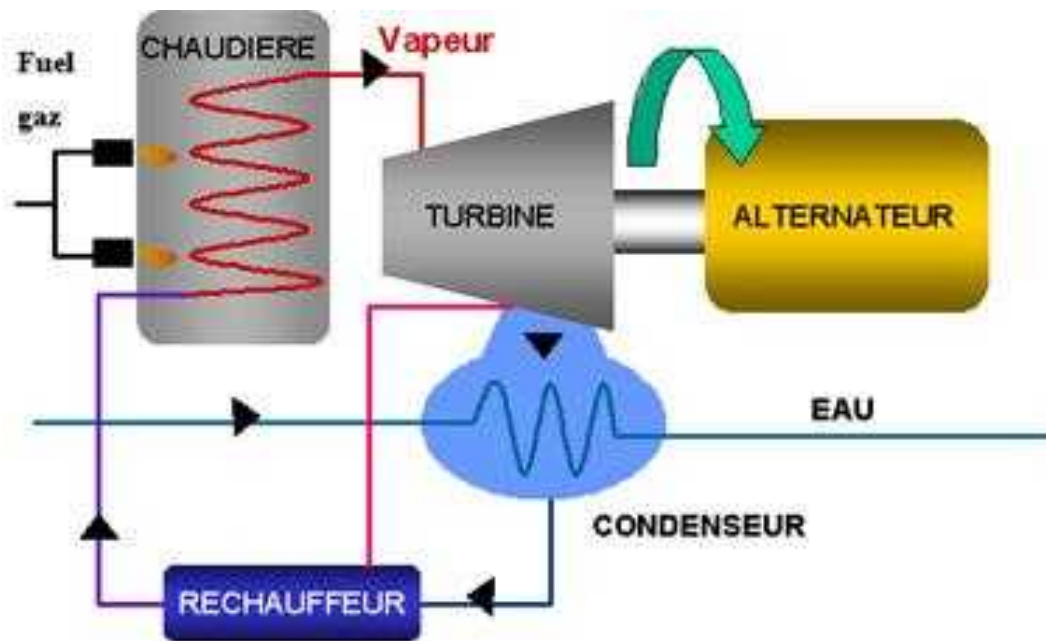


Figure 11 : Schéma d'une turbine à vapeur

5.2) Classification des turbines à vapeur :

On peut classer les turbines à vapeur selon plusieurs critères les plus importants sont les suivants :

-] La nature de fonctionnement thermodynamique.
-] La méthode de fonctionnement de la vapeur.
-] Le sens d'écoulement de la vapeur.
-] Le mode de construction.
-] La méthode de transmission d'énergie thermique.

5.2.1) La nature de fonctionnement thermodynamique :

a - Turbine à condensation : La vapeur circule suivant un cycle fermé, et l'opération de détente permet de détendre la vapeur jusqu'à des pressions très basses (0.05 bar). Généralement ce type de turbines est composé de turbines haute pression, moyenne pression et basse pression.

b - Turbine à contre pression : La vapeur circule suivant un cycle ouvert, à l'échappement les pressions sont toujours supérieures à la sortie est utilisée pour d'autres fins (séchage, chauffage industrie chimique, ...)

5.2.2) La méthode de fonctionnement de la vapeur :

On distingue les turbines suivantes :

a- Les turbines à action :

Où la chute d'enthalpie est utilisée en totalité dans la tuyère pour engendrer de l'énergie cinétique, qu'est transformée à son tour en énergie mécanique dans la roue figure **12-a** La turbine peut être monocellulaire, bicellulaire, ou multicellulaire. Dans les deux derniers cas, la transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique a lieu en plusieurs étapes. Dans les canaux fixes intermédiaires, entre les canaux mobiles, il n'existe aucune transformation d'énergie, seule la direction de la vitesse est modifiée.

b- Les turbines à réaction :

Dans lesquelles une partie seulement de la chute thermique mise à la position de l'étage, est transformée en énergie cinétique dans le distributeur ; le reste est transformé en énergie cinétique dans les aubages mobiles de la roue figure **12-b**

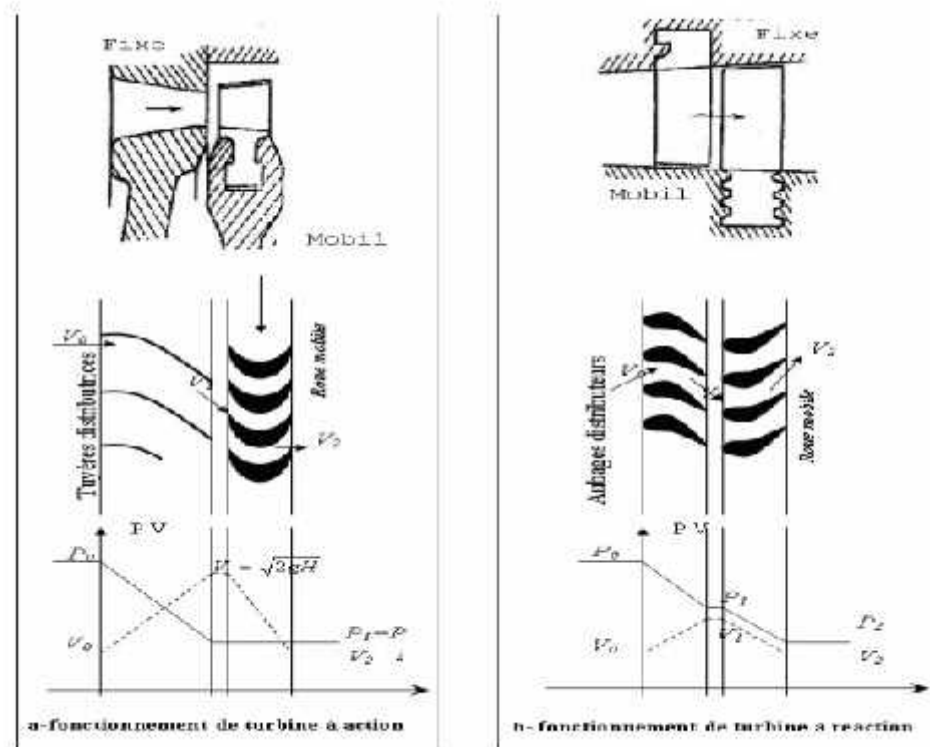


Figure 12 : Mode de fonctionnement de la vapeur

5.2.3) Le sens d'écoulement de la vapeur :

- a- **Turbine axial** : C'est le type le plus utilisé où les aubes sont placées radialement sur la roue ce qui exige un déplacement de vapeur presque parallèle à l'axe de la turbine (figure suivante).



Figure 13 : Turbine axial

- b- Turbine radiale :** L'écoulement de la vapeur se fait dans toutes les directions perpendiculaires à l'axe de la turbine.



Figure 14 : Turbine radiale

5.2.4) Le mode de construction :

- a- Turbine à disque :** Les roues à disque sont construites séparément et calée sur un arbre.



Figure 15 : disque de turbine

b- Turbine à tambour : Les aubes sont calées sur un tambour rapporté sur l'arbre.

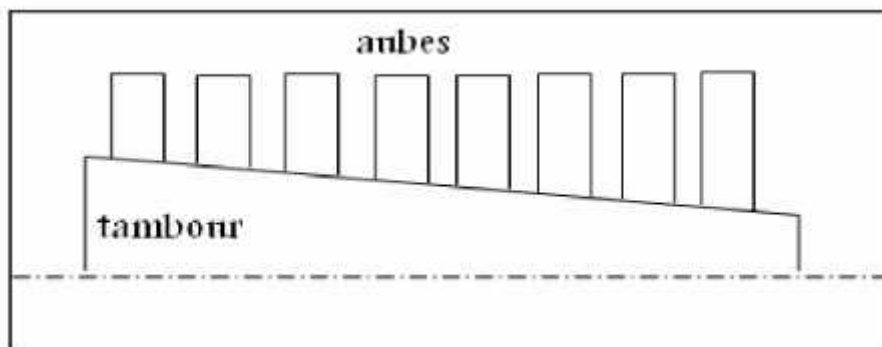
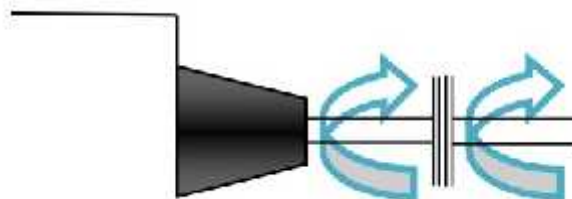


Figure 16 : turbine à tambour

5.2.5) Le mode de transmission d'énergie thermique :

a- Transmission directe : L'énergie mécanique produite est transmise directement à la génératrice à la même vitesse de rotation.



transmission directe

Figure 17 : Mode de transmission directe

b- Transmission indirecte : L'installation nécessite un réducteur de vitesse, comme c'est le cas de la turbine de bateaux ou les vitesses d'hélices sont plus petites.

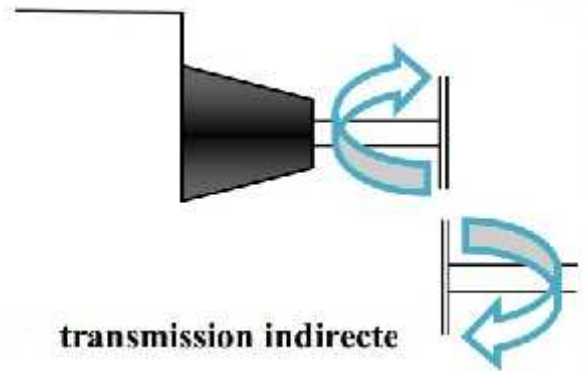


Figure 18 : Mode de transmission indirecte

5.3) Principe d'une turbine à vapeur :

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau. Ce cycle comprend au moins les étapes suivantes :

-) L'eau liquide est mise en pression par une pompe et envoyée vers la chaudière
-) L'eau est chauffée, vaporisée et surchauffée,
-) La vapeur se détend et refroidit dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique,

La vapeur détendue est condensée au contact de la source froide sous vide partiel.[16]

5.4) Domaine d'application de la turbine à vapeur sont :

-) Centrale électrique.
-) Des navires.
-) Les usines des raffineries et des papeteries

6) Turbine à cycle combiné :

6.1) Définition :

Un cycle combiné de puissance est la juxtaposition de deux ou plusieurs cycles thermodynamiques destinés à convertir plus efficacement l'énergie fournie en travail en adaptant deux ou plusieurs fluides de cycle. Avec le développement de la turbine à gaz, le terme «cycle combiné» se réfère plus spécialement à un système composé d'une turbine à gaz, d'un récupérateur de chaleur générateur de vapeur, et d'une turbine à vapeur.[17]

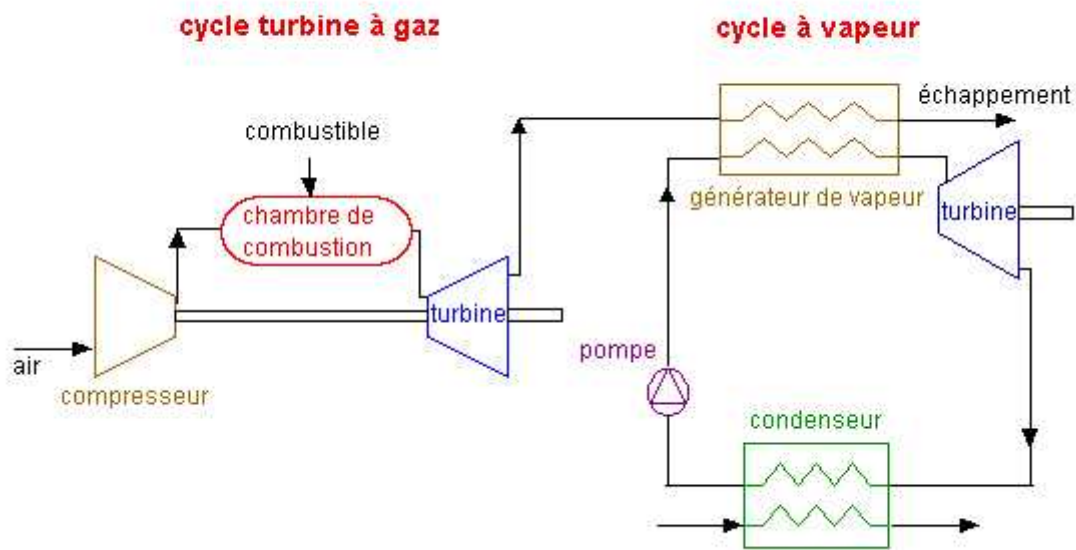


Figure 19 : Schéma à cycle combiné

6.2) Principe :

Le principe d'un cycle combiné consiste à faire fonctionner en cascade une ou plusieurs turbines à gaz, suivies d'une centrale à vapeur dont la source chaude est la source froide des turbines à gaz. Dans ces conditions, les gaz d'échappement de la turbine à gaz sont valorisés dans une chaudière de récupération où l'on produit de la vapeur qui est ensuite détendue dans une turbine à condensation. Le cycle combiné ainsi obtenu est un mariage particulièrement réussi dans la recherche de l'amélioration du rendement thermique : avec les matériels disponibles actuellement, les rendements atteints dépassent 55 % et sont donc supérieurs à ceux que l'on peut espérer, même à moyen terme, des futures centrales à vapeur les plus avancées.[18]

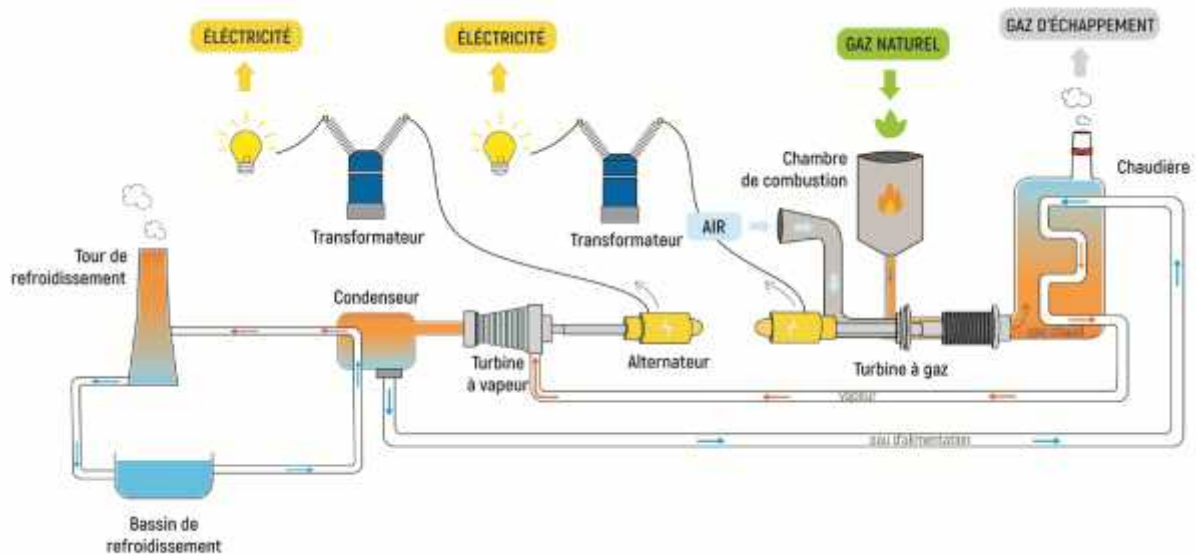


Figure 20 : Principe fonctionnement du cycle combiné gaz/vapeur

Conclusion :

Dans ce présent chapitre, nous avons résumé une brève introduction concernant les turbomachines et les turbines en générales, en les classifiant et spécifiant leurs principes de fonctionnements.

Dans le chapitre suivant, nous allons procéder au dimensionnement de la centrale CSP de Hassi R'mel.

Chapitre III : Dimensionnement de la centrale HassiR'mel

1) Introduction:

Le projet HassiR'mel est un projet de grande envergure inauguré le 15 juillet 2011 et mis en service en 2012, initié par NEAL* (New EnergyAlgeria), en collaboration avec les entreprises nationales SONATRACH et SONELGAS, ce projet est réalisé pour but de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire et du gaz naturel.

Cette centrale a été dénommée SPP I, du nom de l'entreprise qui l'a réalisée, Solar Power Plant One. Les principaux actionnaires de SPP I sont :

- ABENER à hauteur de 51%
- NEAL (New EnergyAlgeria) : 20%
- COFIDES (une compagnie espagnole de financement de projets dans les pays en voie de développement) : 15%
- SONATRACH : 14%

La centrale de HassiR'mel est une centrale solaire hybride à cylindro-parabolique, elle est dotée d'une technologie des centrales à cycles combinés intégrée avec le solaire (ISCCS*), elle est la première centrale de ce type qui a été réalisée en Algérie, avec une superficie de 150 hectare.

Vu que la superficie exposée au soleil est identique, une possible augmentation de sa puissance est donc réduite à celle de la consommation du gaz. Ainsi elle pourrait générer une puissance totale maximum de 150 MW dont 30 MW et d'origine solaire.



Figure 1 : centrale ISCCS HassiR'mel

2) Localisation géographique :

La centrale se situe dans le champ gazier de HassiR'mel a la zone dédié a l'exploitation industrielle, A environ 470 KM de la capitale (Alger), à la limite sud de la wilaya de Laghouat. Elle est implantée sur un terrain qui s'étend sur une superficie de 130 hectares. On y accède par la route nationale N° 1.

Coordonnées géographiques de la centrale: 33° 07' 29" N, 3° 21' 07" E (33.125 : 3.356).



Figure 2 : Localisation géographique de la centrale ISCCS HassiR'mel

3) Généralités sur la centrale :

3.1) Description :

La centrale hybride HassiR'mel est composé de deux partie, un champ solaire avec des miroirs cylindro-parabolique d'une puissance nominale d'environ 30 MW (soit un apport de 20% de la production énergétique de la centrale), Le cycle combiné est constitué de 2 turbines à gaz (fonctionnant au gaz naturel) dont la puissance nominale unitaire est de 45 MW. La chaleur de combustion de ces turbines est récupérée dans deux chaudières horizontales à circulation naturelle. Ces dernières font fonctionner une turbine à vapeur d'une puissance nominale de 80.08 MW.

Il est à noter que le point fort de cette centrale hybride est la cogénération, c'est-à-dire qu'on ajoute de la vapeur produite par le champ solaire à celle récupérée des turbines à gaz pour alimenter la turbine à vapeur. La puissance électrique produite par la centrale augmente en conséquence.[19]

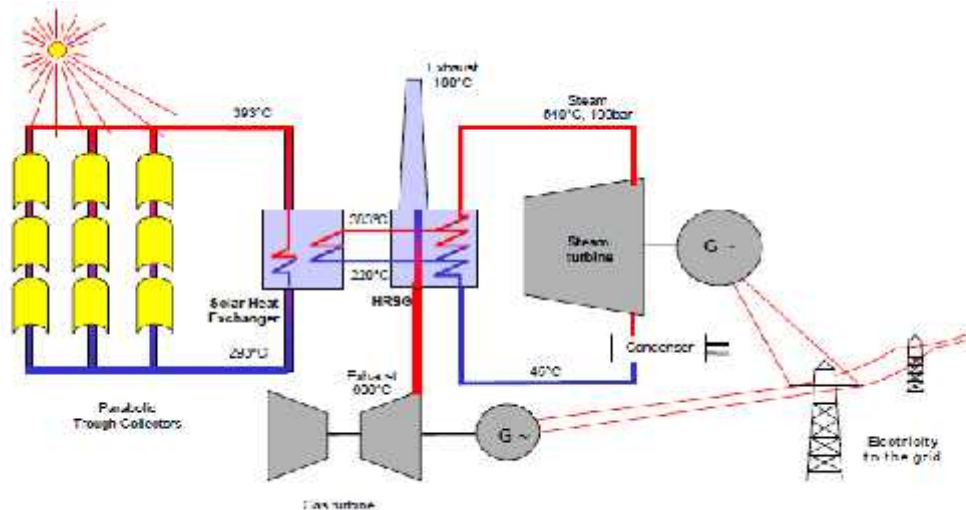


Figure 3 : Schéma de la centrale ISCCS de HassiR'mel.

Le choix s'est porté sur le site de HassiR'melà cause des avantages qu'il offre, le principaux sont comme suite :

-] Disponibilité du gaz naturel sur place.
-] Proximité avec le réseau électrique.
-] Disponibilité d'une source d'eau environ 3000 m³/j.
-] Ensoleillement moyenne mensuelle de la durée de 3200 h/an.
-] Des températures chaudes.
-] Faible pluviosité.

Moyenne mensuelle du rayonnement solaire direct normale de 2478.4KW/m²/an.

3.2)Caractéristiques :

Tableau 5 : caractéristiques de la centrale ISCC HassiR'mel[20]

Caractéristique	
Type d'installation :	Centrale électrique hydride Solaire-Gaz.
Capacité électrique :	150MW → 130MW cycle combiné à gaz. 25MW champ solaire.
Spécification de la turbine :	2 turbines à gaz de type : Siemens SGT-800.
Spécification du système solaire :	Technologie : Centrale solaire thermodynamique. Capteur : Cylindro-parabolique. Nombre de capteurs : 224. Superficie de la centrale : 180000 m ² . Superficie des collecteurs : 130ha dont le champ solaire occupe 90ha. Type de collecteur : LS-2 et LS-3. Type de fluide caloporteur : Huile Therminol VP-1. Consommation d'eau : 2500 – 3000 m ³ /jour.

3.3) Les composantes de la centrale :

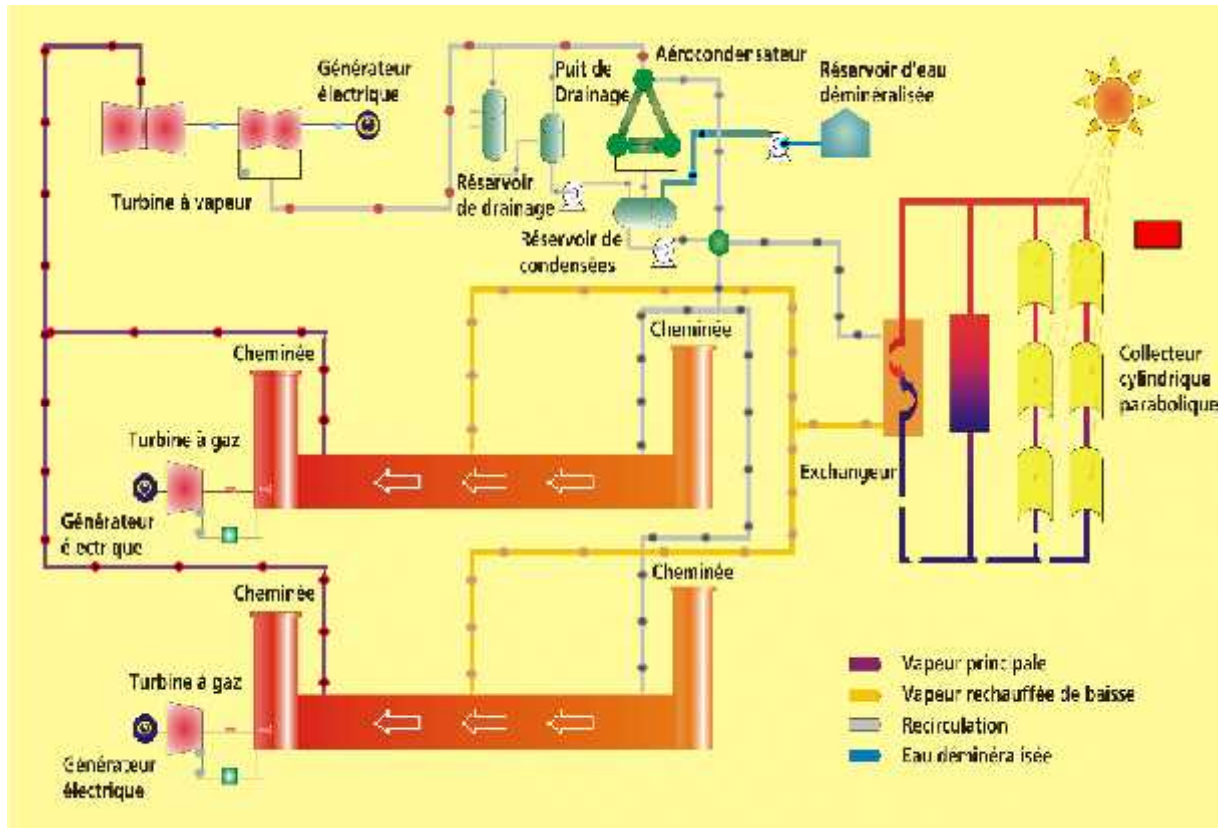


Figure 4 : Principe de fonctionnement de la centrale ISCC HassiR'mel

4) Turbine à gaz SIEMENS SGT-800 :



Figure 5 : Turbine à gaz SIEMENS SGT-800.

4.1) Description :

La turbine à gaz utilisé dans cette centrale est la SGT-800 de SIEMENS, c'est une TAG à un seul arbre avec prise de mouvement avant, avec un rendement de 37.5 %. Dans les conditions ISO la SGT-800 produit 47 MW. Elle fonctionne principalement au gaz naturel, l'utilisation d'autres combustibles gazeux ou liquides est tout à fait possible. Sa consommation de chaleur est de 9597 kJ/kWh.

La centrale sera équipée de deux turbines à gaz de type industriel, chacune avec une production de 47 MW dans les conditions ISO. Le système de combustion de ces turbines à gaz est équipé d'un brûleur de type DLN (dry Low NO_x), afin d'éviter les émissions de (NO_x) dans les gaz d'échappement de la turbine.

Le système de réfrigération du groupe alternateur serait composé d'aéro-réfrigérants, de conception modulaire avec un module de réserve en stand by. L'unité serait conçue pour assurer un haut niveau de rentabilité, de fiabilité et d'exploitation. Système de prise d'air, avec filtre à air autonettoyant et silencieux, équipé de tous les systèmes de contrôle et appareils nécessaires pour un fonctionnement entièrement automatique.

4.2) Caractéristiques :

Tableau 6 : caractéristiques techniques de la turbine à gaz SIEMENS SGT-800 [21]

Caractéristique technique de la SGT-800	
Production d'électricité	47,00 MW(e)
Combustible	gaz naturel
Vitesse de la turbine	6 608 trs/mn
Consommation de chaleur	9 597 kJ/kWh
Température	544 °C
Rendement	37,5%
Consommation de chaleur	9 597 kJ/kWh
Fréquence	50/60Hz
Débit-masse des gaz d'échappement	131,5 kg/s
Taux de compression	19
Émissions de NO_x(avec système DLE, dans les gaz secs ramenés à 15% d'O₂)	≤ 15 ppm

On remarque que :

NO_x : oxydes d'azote sont des composés chimiques formés d'oxygène et d'azote.

Pour le combustible : il est utilisé sans pertes d'admission ou d'échappement ; autres options disponibles à combustibles gazeux, liquides et/ou fonctionnement bicom bustible.

5) Turbine à vapeur SIEMENS SST-900 :

5.1) Description :

Une turbine à vapeur commune aux tranches de production, du type à condensation, à trois niveaux de pression de vapeur selon le standard proposé et resurchauffe, d'une puissance nominale d'environ 80 MW. Le dimensionnement de la turbine à vapeur correspond à la production maximum de vapeur du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) additionnée de la production nominale de chaleur du générateur de chaleur solaire. Pendant les heures d'ensoleillement maximum, la turbine à gaz fonctionnera au niveau nécessaire, afin de réduire la production du HRSG de telle sorte qu'il n'y ait pas de rejet de chaleur solaire.

La turbine à vapeur sera munie d'un système de by-pass de fonctionnement conçu pour détendre le plein débit de vapeur. Le matériel de TAV comprendra de façon non limitative les accessoires indispensables tel que vannes d'arrêt, soupapes de réglage, les organes de la vitesse et de la charge ainsi que ceux de sécurité, le système de commande associé à tous ces organes, le système de lubrification et étanchéité, le système de réfrigération de l'huile paliers, les robinets et les vannes motorisées de purge et de vidange, toute la tuyauterie-robinetterie. Toutes les liaisons électriques avec armoires de régulation, les capteurs et les appareils transmetteurs de mesure. Système pour la conservation de la turbine pendant des périodes d'arrêt de longues durées.

La turbine à vapeur utilisée dans cette centrale est la SST-900 de SIEMENS, elle composée de deux corps de détente (HP et MP/BP) et d'un module d'entrée et d'échappement normalisé.

Ces modules font partie des composantes pour TAV qui peuvent être combinés pour s'adapter au grand nombre de conditions de vapeur, de puissance nominale et de configuration.



Figure 6 : Image réelle de la TAV SIEMENS SST-900

5.2) Les dimensions de la turbine SST-900 :

Tableau 7 : Dimensions de la turbine à vapeur SIEMENS SST-900 [22]

Les dimensions typiques	
La longueur	20.5m/67ft.
La largeur	11m/36ft.
La Hauteur	10m/33ft.

5.3) Données techniques:

Tableau 8 : Caractéristiques techniques de la turbine à vapeur SIEMENS SST-900 [23]

Données technique de la SST-900	
Puissance de sortie jusqu'à	250MW
Pression d'entrée (avec réchauffage)	jusqu'à 165 bar / 2395 psi
La température d'admission (avec réchauffage)	jusqu'à 585 ° C / 1085 ° F
Réchauffer la température	jusqu'à 580 ° C / 1075 ° F
Vitesse de rotation	3000 - 3600 tr / min;
HP	jusqu'à 13.200 tr / min (pour réchauffer)
Purger	jusqu'à 7; jusqu'à 60 bar / 870 psi
Extraction contrôlée (simple ou double)	pression: jusqu'à 55 bar (a) / 800 psi température: jusqu'à 480 ° C / 895 ° F
Conditions de vapeur d'échappement	contre-pression: jusqu'à 16 bar (a) / 230 psi de condensation: jusqu'à 0,6 bar (a) / 8,5 psi zone d'échappement: 1,7 - 11 m ² - 118 sq. ft.
Zone d'échappement	de 1,7 à 11 m ² / 18,3 à 118 sq. ft.

5.4) Principales domaine d'application de la SST-900 :

-) Installations industrielles
-) Installations à cycle combiné
-) Centrales à vapeur de combustibles fossiles
-) Usines de valorisation énergétique des déchets
-) Installations de chauffage urbain
-) Centrales électriques dans l'industrie pétrolière et gazière

6) Chaudière de recuperation (HRSG) : Heat Recovery Steam Generators

6.1) Description :

La chaudière de récupération ou (HRSG), est un élément essentiel dans les installations à cycle combiné, elle le lien entre le cycle à gaz (turbine à gaz) et le cycle eau-vapeur (turbine à vapeur). La chaudière de récupération serait de type horizontal, à circulation naturelle, à trois niveaux de pression selon la technique utilisée, resurchauffe et préchauffage

du condensat. Son rôle est de récupérer la chaleur restante des gaz d'échappement de la TAG afin de l'utiliser pour la génération de vapeur nécessaire au circuit eau-vapeur.

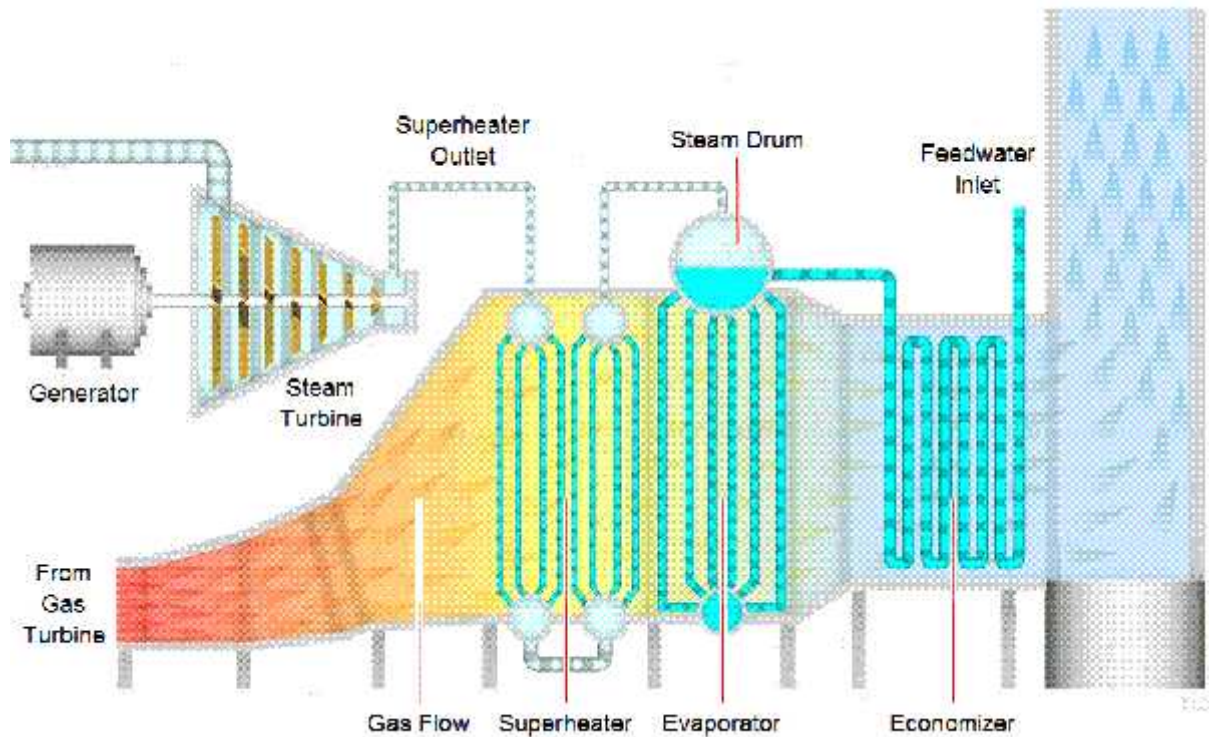


Figure 7 : Eléments et fonctionnement du système HRSG

Dans la centrale ISCC HassiR'mel on utilise le HRSG THERMAX INDIA.

6.2) Le HRSG THERMAX INDIA :

Tableau 9 : Caractéristiques du HeatRecoverySteamGenerators THERMAX INDIA [24]

Caractéristiques	
Capacités	Turbine à gaz de 320 MW
Pression	jusqu'à 175 kg /cm ²
Température	jusqu'à 603 ° C
Carburants	gaz naturel / naphta / HSD / kérosène / gaz de raffinerie, carburant lourd à haute teneur en soufre, etc.

7) Condenseur :

Le refroidissement pour l'huile de lubrification et l'huile du système de contrôle de la turbine à vapeur se fera par un circuit fermé d'eau de refroidissement.

Les gaz non-condensables seront évacués du condenseur par des pompes vacuum. La vapeur excessive sera retournée au condenseur. L'eau condensée est pompée vers les préchauffeurs du HRSG. Généralement, il y aura deux pompes d'extraction d'eau condensée (CEP), une sera en fonctionnement, l'autre en attente.

La vapeur générée dans le générateur de vapeur du champ solaire sera conduite vers les surchauffeurs de chaque générateur de vapeur à récupération de chaleur. Elle sera alors surchauffée, puis transmise à la TAV en même temps que la vapeur générée dans le HRSG. Une station by-pass à travers la TAG servira à faciliter les conditions de démarrage /charge partielle/ mise à l'arrêt de la centrale.

La vapeur d'échappement de la TAV sera condensée dans le condenseur et pompé au condenseur à presse-étoupe et vers le dégazeur du HRSG. Le dégazeur fera partie de la section LP (lowpressure, basse pression) de chaque HRSG.

Le dégazeur sera de type intégral et la vapeur générée dans l'évaporateur LP sera utilisée pour dégazer. Les besoins de la centrale en vapeur auxiliaire proviennent du circuit principal de vapeur par une station adéquate de réduction de pression et de sur-chauffage.

8) Aérocondenseur :

Un système de réfrigération atmosphérique du type sec, en mode direct avec aérocondenseurs serait prévu dans la centrale. Ces aérocondenseurs seront de conception modulaire.

Les échangeurs devraient être correctement dimensionnés pour permettre un fonctionnement en pleine charge de la centrale même dans les conditions extrêmes de température ambiante du site. Les aérocondenseurs recevraient directement la vapeur détendue dans les étages de la TAV et la condense. Les condensats collectés au puits seront restitués sur la chaudière de récupération et le générateur de vapeur du champ solaire au moyen de pompes de reprise.[25]

9) Absorbeur :

9.1) Description :

C'est un tube de 4 mètres de long placé dans la ligne focale des miroirs. Il est isolé thermiquement par un vide contenu dans une gaine en verre. Les tubes sont fabriqués en verre borosilicate pourvu d'un revêtement optique, il est doté d'une grande transparence et résistance mécanique. Il s'agit d'un revêtement antireflet innovant dont la particularité consiste en sa résistance durable à l'abrasion tout en laissant passer 96% du rayonnement solaire. Le revêtement permet d'atteindre une absorption des rayons de 95%, l'émission thermique restante est limitée à 14%, en conséquence de quoi la température du caloporteur peut atteindre les 400 °C. Le joint verre-métal et le soufflet destinés à compenser les différents effets de dilatation du verre et du métal, sont superposés l'un à l'autre et non pas disposés côte-à-côte. Cette astuce permet d'atteindre une longueur effective de 96% de la longueur totale du récepteur.

Le récepteur utilisé dans la centrale de HASSI R'MEL est le récepteur SCHOTT PTR 70 Les dimensions des tubes absorbeurs sont 4 m de long, 0.065 m de diamètre intérieur et de 0.07 m de diamètre extérieur.



Figure 8 : Tube SCHOTT PTR 70

9.2) Caractéristiques techniques :

Tableau 10 : Caractéristiques de l'absorbeur SCHOTT PTR-70 [26]

Caractéristiques de l'absorbeur SCHOTT PTR 70	
Diamètre extérieur / intérieur du tuyau en acier absorbeur	0.070/0.066 (m)
Diamètre extérieur / intérieur de l'enveloppe en verre	0.120/0.115 (m)
Rugosité intérieure des tubes absorbants en acier	$4.5 \cdot 10^{-5}$ (m)
Absorption d'absorbeur	0.96
Emittance de l'absorbeur	0.095
Transmittance de l'enveloppe de verre	0.97
Revêtement sélectif	Noir Cr
Pertes de chaleur	58.29 (W/m)
Pertes thermiques	77.03 (W/m) /15.40 (W/m ²)
Efficacité optique	0.75

10) Système HTF (Heat transfer fluid), Fluid caloporteur (Huile Therminol VP-1):

Les **fluides HTF** qui transportent la chaleur dans les **centrales thermo-solaires** se dégradent au fur et à mesure de leur utilisation. Afin de connaître l'état de ce type de fluides, il est nécessaire d'effectuer une série d'analyses périodiques qui évaluent divers paramètres et déterminent si le fluide présente la capacité suffisante pour satisfaire encore son rôle, ou si au contraire, il doit être remplacé par un nouveau fluide.

Pour des raisons techniques, il est nécessaire d'évaluer les paramètres suivants :

10.1) Apparence :

Un simple contrôle visuel peut parfois suffire afin de déterminer si l'état du fluide HTF est adéquat. Un fluide en utilisation et en bon état présente une couleur sombre et une viscosité similaire à celle d'un nouveau fluide. La présence d'humidité peut être détectée dès lors qu'une turbidité ou qu'une séparation de phases est constatée dans le fluide. Une quantité élevée de solides peut être mise en évidence grâce à la présence de sédiments dans la partie inférieure du réservoir.

10.2) Viscosité :

La viscosité est liée à la masse moléculaire des composants du fluide HTF. Les composants de faible masse moléculaire abaissent généralement la valeur de la viscosité tandis que les composants de masse molaire élevée augmentent au contraire la valeur de cette dernière.

La modification de la viscosité peut indiquer une contamination causée par une fuite lors du processus de génération de vapeur (ajout de composés indésirables dans le système dans lequel se trouve le fluide caloporteur), par la présence de solvants issus du liquide de nettoyage, par un stress thermique et/ou par une dégradation par oxydation.

Il est fondamental de garder à l'esprit que des problèmes d'exploitation peuvent être provoqués aussi bien par un fluide présentant une viscosité élevée que par un fluide à faible viscosité. Si la viscosité est trop élevée, le système peut présenter des problèmes de circulation lors du démarrage, avec le « brûlage » du fluide qui en découle. Si la viscosité est faible, il peut y avoir une présence excessive de composants à faible masse moléculaire, et par conséquent, des problèmes de cavitation dans les pompes et une réduction du débit.

Afin de supprimer les composés à faible masse moléculaire, faire circuler le fluide à travers le réservoir d'expansion avec un gaz inerte de purge. Une viscosité élevée nécessite généralement le remplacement du fluide par un nouveau fluide. On peut parfois y remédier en ajoutant du nouveau fluide.

10.3) Taux d'acidité :

Une valeur d'acidité élevée indique une éventuelle contamination du fluide par une substance ajoutée au système par inadvertance ou par une fuite dans les processus parallèles.

Elle peut également témoigner d'une sévère oxydation du fluide si le système n'est pas protégé par un gaz inerte en phase vapeur du réservoir d'expansion (oxydation par apport d'oxygène dans le système). L'identification du pH peut être très utile afin de s'assurer de l'état du système.

Si l'acidité est trop élevée, le système peut se corroder et peut tomber en panne. Les produits corrosifs forment des boues et des dépôts qui entravent le transfert de chaleur. On

peut remédier à un état de contamination ou d'oxydation du système par le remplacement du fluide par un nouveau fluide.

10.4) Eau :

La présence d'humidité peut indiquer une fuite dans le système de l'un des processus parallèles et/ou que du fluide humide a été ajouté. Les nouveaux systèmes ou ceux qui ont été nettoyés avec un solvant aqueux peuvent laisser de l'eau résiduelle. L'eau peut également être issue d'infiltrations provenant des événements des réservoirs d'expansion ou de stockage.

La présence d'eau libre dans le système de transfert de chaleur peut causer des problèmes de volatilisation du fluide, tels que l'écoulement de fluide en deux phases et une pressurisation excessive du système, en particulier lors du démarrage de l'usine. Elle peut également causer une corrosion, une cavitation des pompes et un blocage par vapeur. Une action corrective consiste en une augmentation progressive de la température du fluide lors du démarrage de l'usine jusqu'à dépasser la température d'évaporation de l'eau.

10.5) Matières insolubles :

La présence de matières insolubles dans l'acétone ou le pentane indique généralement une contamination due à la saleté, à des produits de corrosion, à une oxydation sévère ou à un stress thermique important. Ceci est à l'origine d'une diminution du transfert de chaleur avec les surfaces, d'un éventuel colmatage ou d'un blocage des conduites, ainsi que d'une usure et d'un colmatage des joints et des vannes.

10.6) Contenu en composés à bas et haut point d'ébullition :

Ces composés sont habituellement mesurés par chromatographie gazeuse (GasChromatography), indiquant généralement une contamination, une oxydation ou un stress thermique du fluide.

La présence de ces composés peut conduire à une cavitation dans les pompes, à une mauvaise circulation du fluide à travers le système et à une diminution du transfert de chaleur. En phase avancée, cela pourrait même conduire à une perte de transfert de chaleur des surfaces et à la formation de matière solide.

Pour y remédier, il faut éliminer les sources de contamination, corriger l'état anormal de stress thermique et purger les produits à bas point d'ébullition du système. Un contenu en composés à haut et bas point d'ébullition peut nécessiter le remplacement du fluide. Les composants à faible masse moléculaire abaissent la valeur de la viscosité.

10.7) Point d'inflammation :

Ce paramètre est utilisé pour des questions de sécurité, mais également afin de détecter la présence de « low boilers » dans le fluide. L'entrée d'une contamination externe peut avoir un effet similaire.

10.8) Analyse spéciale :

Il est recommandé d'effectuer un autre type d'analyse, tel que l'analyse de composants solides, afin d'identifier la source de la contamination, une cause de dégradation ou un problème de contamination.

Rechercher la compatibilité entre les fluides, les composants et les matériaux de construction peut être un bon moyen de minimiser les problèmes suivants :

- J Une valeur de pH en dehors de la plage attendue peut indiquer une contamination dans le système avec de l'oxygène ou une autre matière étrangère, pouvant conduire à la corrosion du système.
- J Une concentration en résidus solides au-dessus de 1 % peut indiquer des problèmes mécaniques associés au système de transfert de chaleur en raison de l'érosion des surfaces métalliques. Une cause fréquente est la présence de « millscale » issues des conduites installées associées à l'installation de nouveaux systèmes.[27]

11) Système de pressurisation du système HTF :

Pour maintenir l'inertie nécessaire à l'intérieur du réservoir d'expansion et des réservoirs de débordement, due au changement de densité de l'huile à cause de la température, l'azote sera utilisé ; celui-ci sera délivré aux réservoirs à travers un pressostat, qui permettra l'envoi d'azote à l'intérieur du réservoir. En même temps, une vanne de ventilation sera installée pour expulser l'azote des réservoirs lorsque lesdits réservoirs commenceront à se remplir d'huile.

12) Champ solaire :

Deux champs de capteurs cylindro-paraboliques d'une surface de captage totale de 183120 m², on été placés sur deux îlots solaires, le premier prendra place au Nord du bloc de puissance et le deuxième au Sud. Le champ solaire est constitué de deux parties des capteurs cylindro-parabolique une partie Nord et une autre Sud ; dans chaque partie on a 28 rangées de concentrateurs dont deux entre eux sont plus grand et plus résistant que les autres (ils se trouvent aux extrémités).

Alors dans toute la centrale il y a **56** rangées de concentrateurs :

Tableau 11 : Type et nombre de rangées de miroirs utilisé

Type de concentrateur	Nombre de rangées
Concentrateurs normaux (miroirs model LS-2)	52
Grands concentrateur (miroirs model LS-3)	4

Dans chaque rangée on a **48** concentrateurs, Ils cumulent un total de **2688** collecteurs d'une **longueur théoriquement calculé de 12.5m** chacun. Les rangées des collecteurs de **600m** de long sont implantées selon l'axe Nord-Sud pour une poursuite du soleil Est-Ouest. La surface au sol occupée par les capteurs est de 90 ha.

A l'apparition de la première irradiation solaire au lever du jour et dès que celle-ci atteint une valeur minimale appelée seuil d'irradiation, les pompes à impulsion commence à faire circuler l'huile à travers le champ de capteur cylindro-parabolique avec un débit initial.

Ce débit est juste suffisant pour qu'il existe des turbulences dans les tubes absorbeurs. De cette manière l'huile va petit à petit monter en température à la sortie de l'îlot solaire. Lorsque l'huile atteint la température de 393 °C à la sortie avec un débit minimal, l'échange de chaleur commence dans l'échangeur HTF-eau (échangeur de chaleur circuit solaire). Lorsque plus d'énergie est disponible dans le champ de capteurs, le débit se verra augmenté pour maintenir toujours les 393 °C à la sortie. Ainsi, tout le long de la journée le débit variera en fonction de l'énergie utile captée par l'îlot solaire à tout moment. Ce débit variera donc entre une valeur minimale et une valeur maximale tout en maintenant la température de sortie à 393 °C.

À L'arrivée du crépuscule, les niveaux d'énergies utiles vont baisser, le débit de l'huile diminuera jusqu'à sa valeur minimale. Une fois ce débit minimal ne permet plus d'avoir les 393 °C à la sortie, la circulation est interrompue pour qu'une nouvelle période nocturne commence.

Calcule théorique de la longueur (L) du collecteur (LS-2 ET LS-3) :

Nombres de collecteur dans une rangée : **48**

Longueur d'une rangée : **600m**

LS-2, LS-3	X48 ...
-----------------------	---------


Collecteur de longueur L


Rangée de collecteur de 600m

$$L = \frac{600}{48} = 12.5 \text{ m}$$

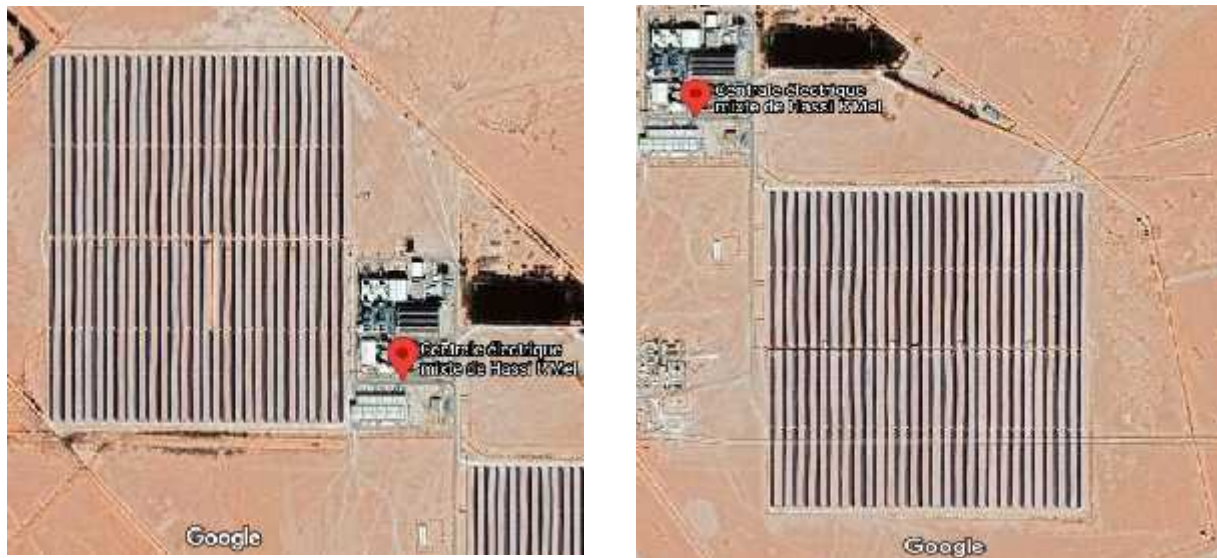


Figure 9 : vu aérien du champ solaire

Tableau 12 : Champ solaire du site de HassiR'Mel[28]

Superficie (m ²)	Surface du champ solaire (ha)	Type de réflecteur	Type du récepteur	Type du HTF	Lavage des miroirs
183120	654	Luz LS-2, Luz LS-3	Schott PTR70	Therminol VP-1	0.7 l/m ² 63 fois/an

13) Système de stockage de la centrale :

Tableau 13 : Système de stockage de la centrale [28]

Type	Fluide de stockage	Capacité Thermique (MW _t)	Volume (m ³)	Durée
2 réservoirs	Therminol VP-1	421.348	8236.87	6 h

Conclusion :

Dans ce présent chapitre nous avons étudié et dimensionné la centrale CSP de HassiR'mel en spécifiant ses caractéristiques, les composants de la centrale et leurs caractéristiques et son principe de fonctionnement.

Dans le chapitre suivant, nous allons procéder à la simulation de la partie solaire de la centrale.

Chapitre IV : Simulation de la centrale solaire Hassi R'mel

1) Introduction :

Dans ce présent chapitre, à l'aide de logiciel Meteonorm, nous allons définir tous les paramètres nécessaires afin de générer un fichier qui porte des données météorologiques exploitable dans le logiciel SAM, aussi introduire toutes les données, que ce soit, la capacité de la turbine, cycle de la turbine, dimension du champ solaire, type de collecteur utilisé, type de fluide caloporteur, DNI et la durée d'ensoleillement, pour faire une simulation de la partie solaire de la centrale HassiR'mel le plus fiable possible.

2) Présentation de logiciel Meteonorm :

Meteonorm est une combinaison unique de sources de données fiables et d'outils de calcul précieux. Il donne accès aux années typiques et aux séries chronologiques historiques.

Meteonorm génère des années typiques précises et représentatives pour n'importe quel endroit sur Terre. Vous pouvez choisir parmi plus de 30 paramètres météorologiques différents. La base de données comprend plus de 8000 stations météorologiques, cinq satellites géostationnaires et une climatologie des aérosols calibrée à l'échelle mondiale. Sur cette base, des modèles d'interpolation sophistiqués, basés sur plus de 30 ans d'expérience, fournissent des résultats avec une grande précision dans le monde entier.[29]

Ce logiciel utilisé dans plusieurs domaines, en général les domaines qui nécessitent l'utilisation des données météorologiques comme l'ingénierie, le bâtiment, l'éolienne et les énergies solaire.

3) Détermination et spécificités des paramètres :

Vu la masse considérable de paramètres disponible dans Meteonorme, il se doit de sélectionner que les paramètres utiles, dans notre cas, ces derniers sont listés dans la case Variables de sortie (fig.1), aussi, les unités sont sélectionnées afin de correspondre aux normes système international (S.I).

Note : les données disponibles sont d'une période de 20 ans qui s'étendent de 1991 à 2010 pour le rayonnement il peut être utile de limiter les résultats à une période de dix dernières années (de 2000 à 2010).

Un autre fichier qui porte l'extension (.csv) directement exploitable, ce dernier porte tous les données à la norme du logiciel SAM.

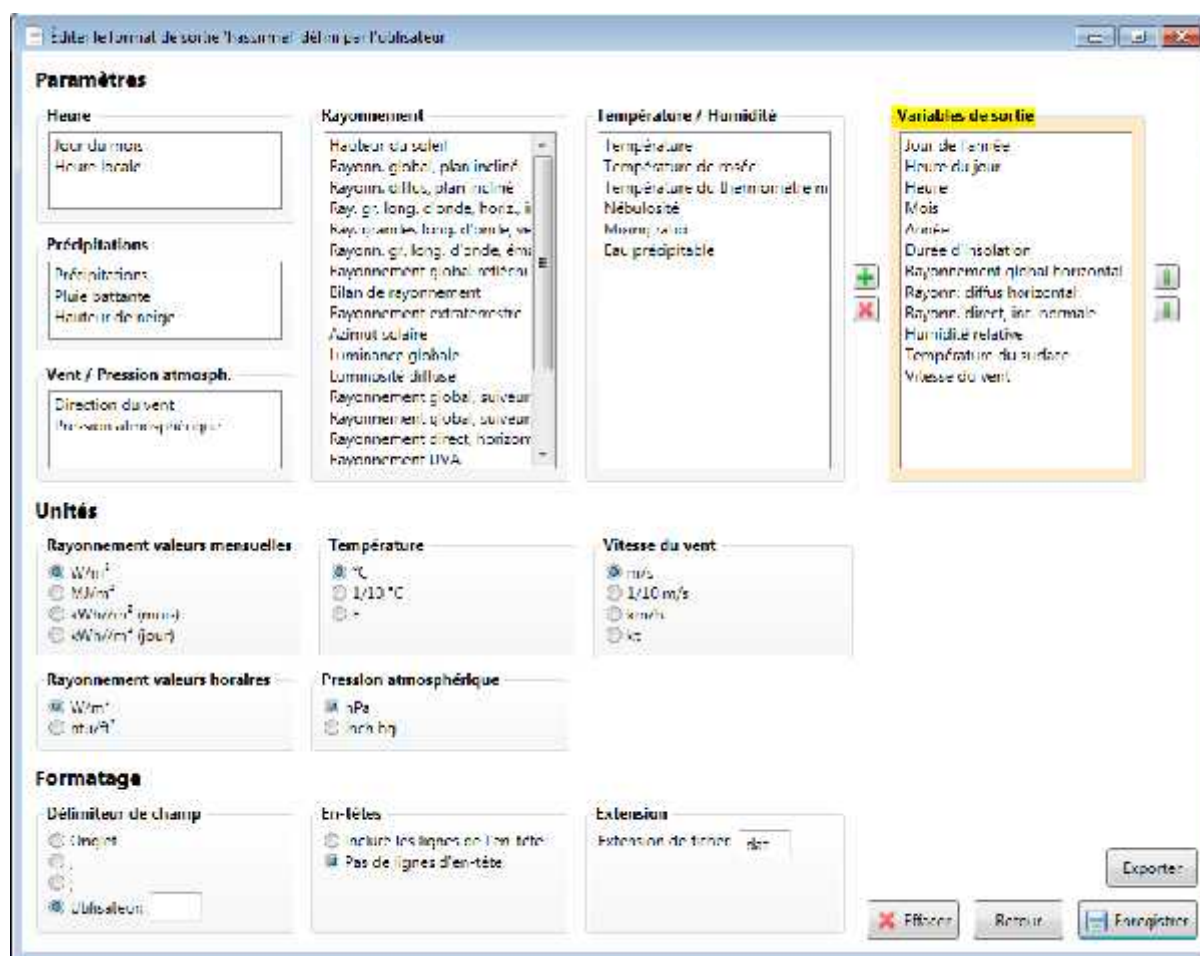


Figure 1 : Interface de configuration Meteonorm

4) Choix des jours type :

Du fait que le logiciel génère des données moyennes qui s'étendent sur une période de 10 ans résumées sur une année, il est au moins nécessaire de prendre des dates témoins, afin de faciliter l'analyse des données.

Le choix se porte sur les deux journées du solstice et de l'équinoxe.

Tableau 14 : Choix des jours types

Solstice	Equinoxe
21 Juin	21 Mars
21 Décembre	23 Septembre

Note : les deux solstices (21 Juin et 21 décembre) sont les jours le plus long de l'année où on aura un temps d'ensoleillement le plus grand et le jour le plus petit de l'année avec un temps d'ensoleillement le plus petit.

Les deux équinoxes les durées entre le jour et la nuit sont égales.

5) Evolution du GHI, DNI et DHI pour le site de HassiR'mel :

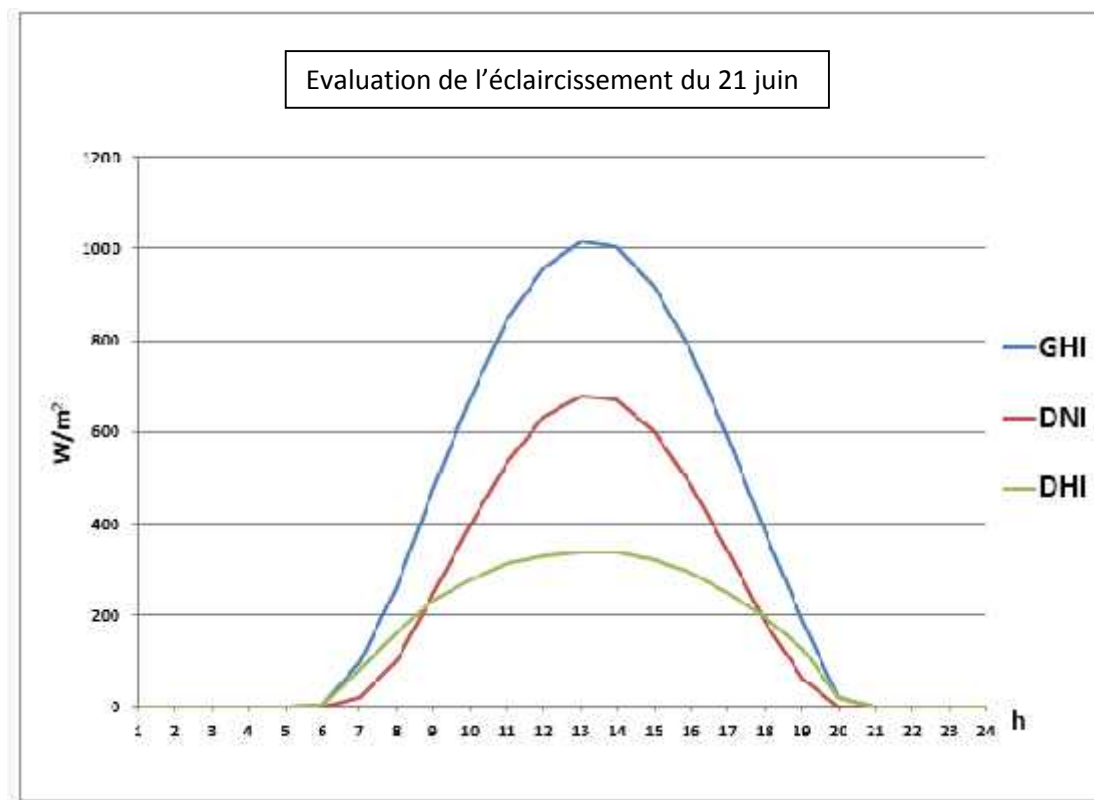


Figure 2 : Evolution du GHI, DHI et DNI le 21 Juin

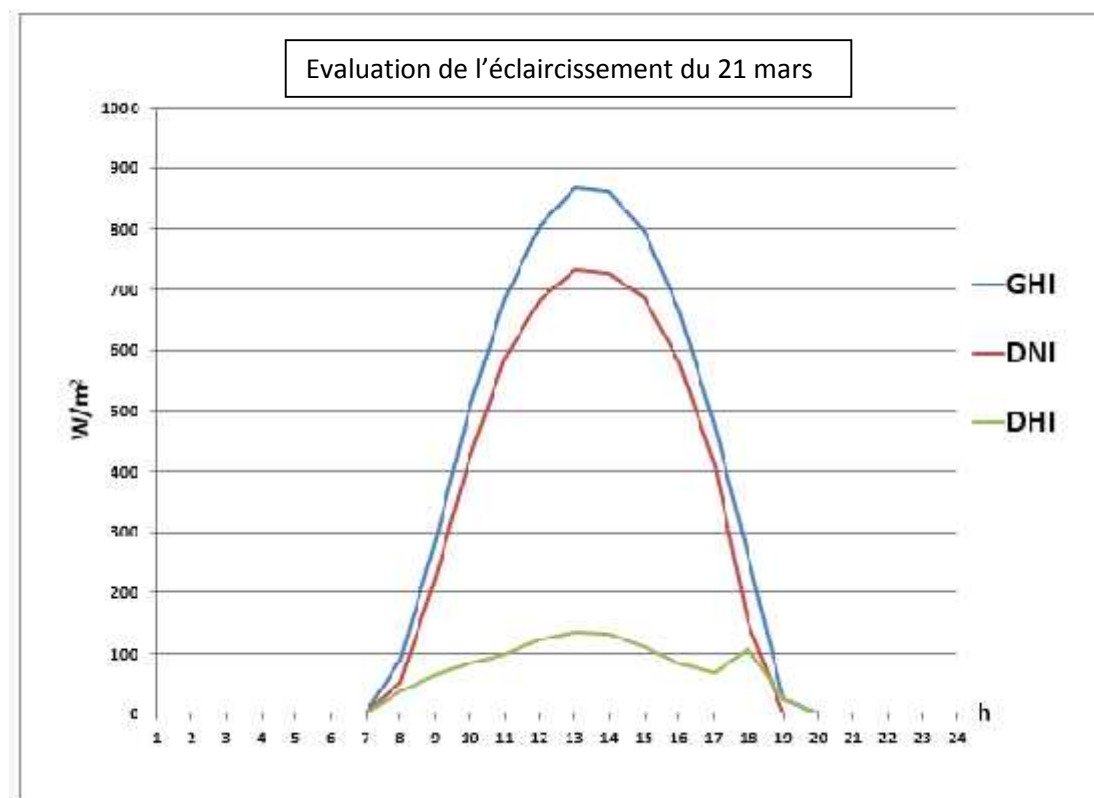


Figure 3 : Evolution du GHI, DHI et DNI le 21 Mars

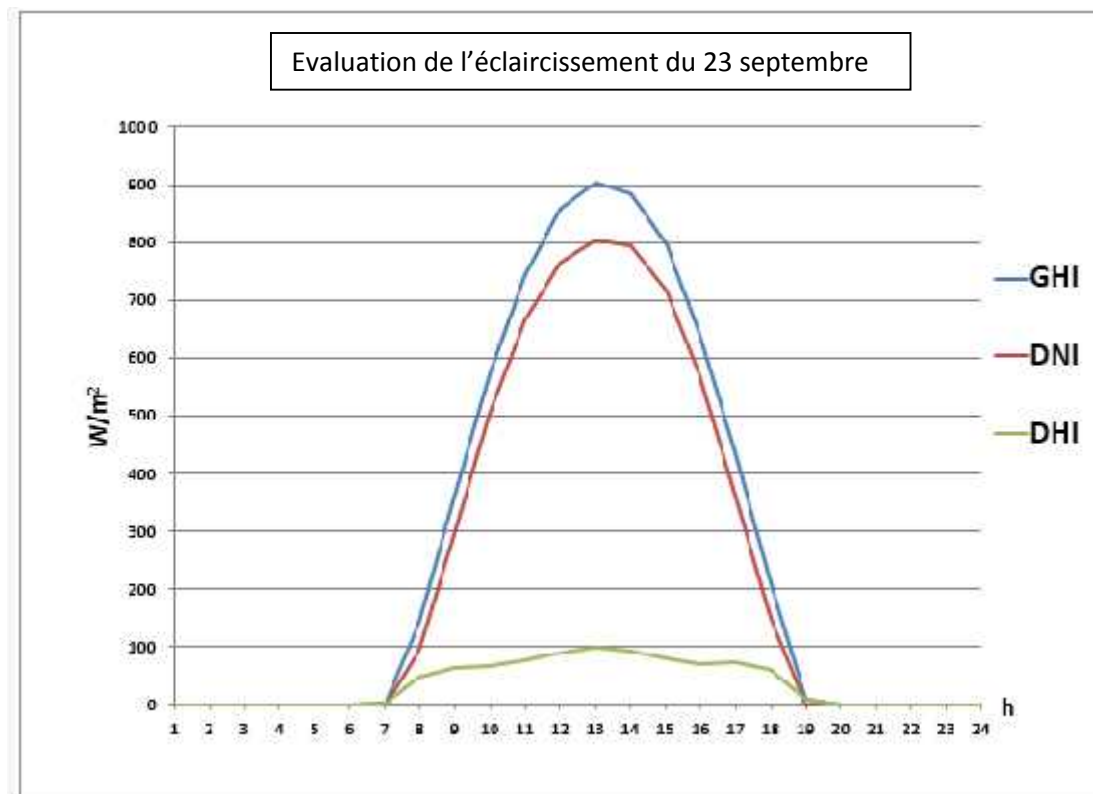


Figure 4 : Evolution du GHI, DHI et DNI le 23 Septembre

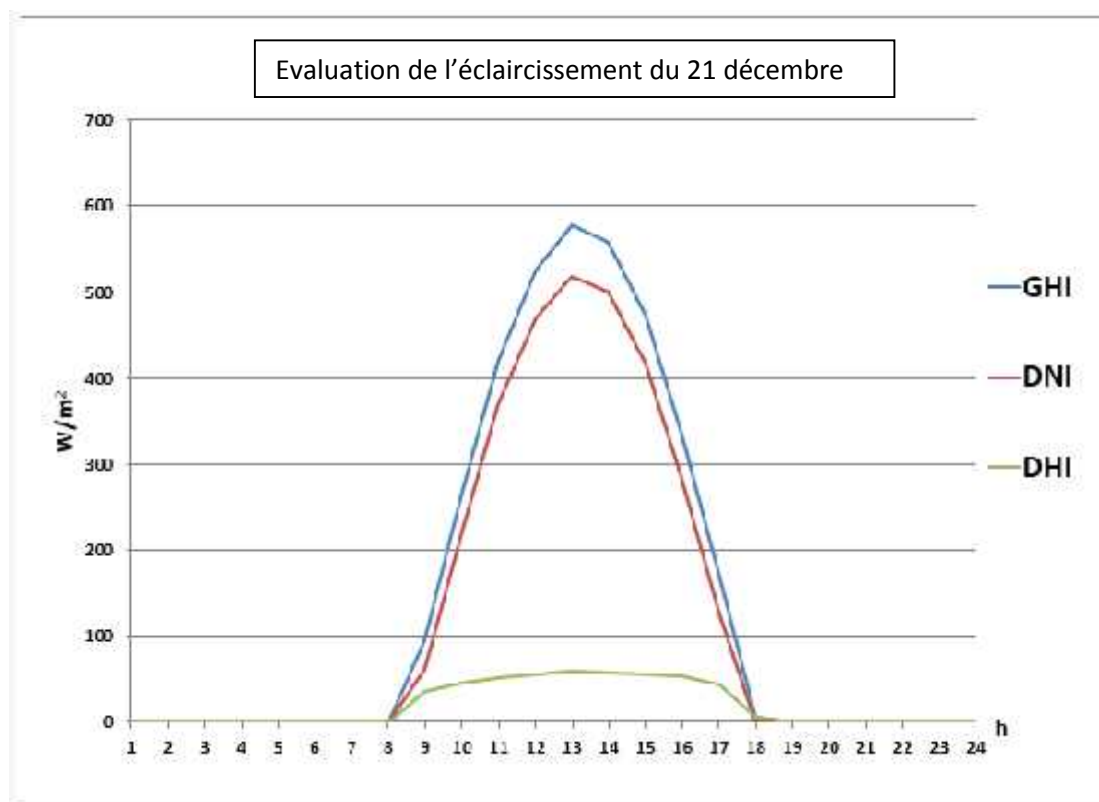


Figure 5 : Evolution du GHI, DHI et DNI le 21 Décembre

Note : La donnée la plus importante est le DNI qui se définit par la relation suivant

$$GHI = DNI * \cos \theta + DHI$$

D'un manier simplifie, les rayons du soleil frappent le capteur directement, autrement dit, l'angle formé entre les rayons solaire et le capteur est égaleàzéro, de ce fait : $\cos \theta = 1$

On peut réécrire l'équation comme suite : $GHI = DNI + DHI$

$$\rightarrow DNI = GHI - DHI$$

6) Temps d'ensoleillement du site HassiR'mel:

La durée d'ensoleillement défaire d'une période a une autre, en d'autre terme, la durée d'ensoleillement les mois de Mai, Juin et Juilletsontnettementplus longs que les autres mois (Fig.6), en règle générale, plus le durée d'ensoleillement est grande, plus on pourrait récupérer plus d'énergie pour alimenter la turbine à vapeur.

centrale CSP Hassi R'mel

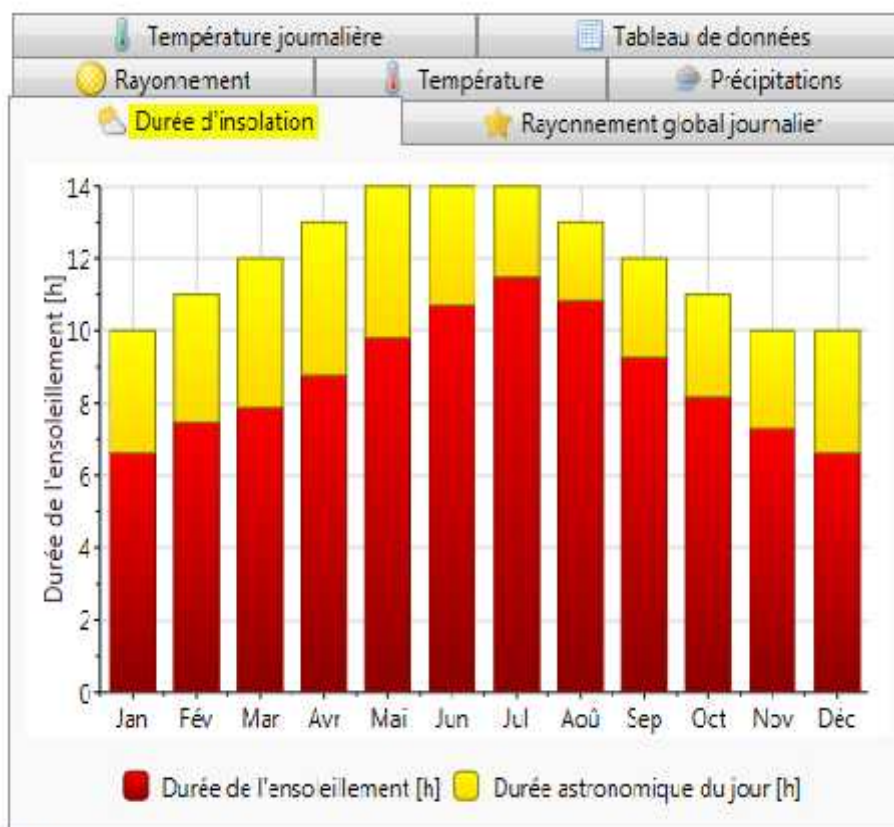


Figure 6 : Diagramme de la durée d'ensoleillement a la centrale HassiR'mel

7) Température moyenne :

La température moyenne est souvent supérieur à zéro (Fig.7), dû au climat chaud présent àHassiR'mel (environnement désertique), de ce fait, on pourrait négliger le système de antigivre des panneaux et sa consommation.

centrale CSP Hassi R'mel

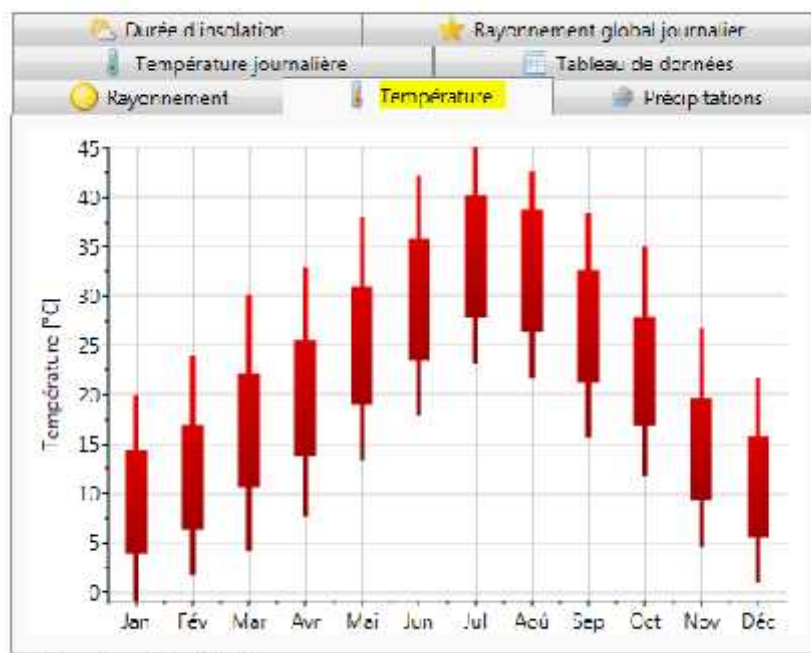


Figure 7 : Diagramme des températures à HassiR'mel

Note : on n'aura pas besoin d'exploiter les données relatives aux précipitations étant donné que la pluviosité est quasiment nulle.

8) SYSTEM ADVISOR MODEL :



Figure 8 : interface d'ouverture de SAM

8.1) Présentation du logiciel :

SAM est un logiciel développé par le laboratoire national des énergies renouvelables (NREL) avec des fonds du département de l'énergie des États-Unis. L'équipe de développement SAM collabore avec les partenaires de l'industrie, le personnel de Nrel et les stagiaires et d'autres organismes de recherche développent et améliorent le modèle. Les modèles solaires originaux ont été développés en collaboration avec Sandia National Laboratories et le laboratoire d'énergie solaire de l'Université du Wisconsin.[30]

SAM est un modèle technico-économique qui calcule les performances et les paramètres financiers des projets d'énergies renouvelables.

-) SAM simule la performance de l'énergie solaire photovoltaïque (PV), centrale solaire thermodynamique, du chauffage solaire de l'eau, de l'énergie éolienne, de la géothermie et de la biomasse.[31]
-) SAM ne modélise pas les systèmes d'alimentation hors réseau ou les systèmes d'alimentations hybrides avec plus d'une source de production d'énergie.[31]

8.2) Simulation de la centrale hassir'mel :

Introduction des paramètres :

Au départ le fichier (.csv) issu de Meteonorm est introduit dans SAM.

Note : la longitude, la latitude, le fuseau horaire ainsi que l'altitude correspondent parfaitement à la localisation de la centrale (Fig.9).

The screenshot shows the 'Weather Data Information' window in SAM. It displays the following information:

- Weather file:** C:\Users\VM\Desktop\Nouveau dossier\centrale_CSP_hassi_rmel-hour.csv
- Header Data from Weather File:**
 - Latitude: 11.175 DD
 - Longitude: 3.356 DD
 - Time zone: GMT-1
 - Elevation: 744 m
 - Time step: 60 minutes
 - Station ID: 988
 - Data Source: MNT
- Annual Averages Calculated from Weather File Data:**
 - Global horizontal: 6.00 kWh/m²/day
 - Direct normal (beam): 7.20 kWh/m²/day
 - Diffuse horizontal: 1.21 kWh/m²/day
 - Average temperature: 20.9 °C
 - Average wind speed: 3.6 m/s
- Optional Data:** (Empty section)

A note at the bottom right states: *NaN indicates missing data.

Figure9: Introduction des paramètres météorologiques dans SAM

La superficie du champ solaire (Field aperture) est introduite afin de correspondre aux champs solaire de la centrale HassiR'mel (183120 m²) (Fig.10).

La capacité de production de la turbine à gaz (Design turbine gross output) correspond à (25 MWe), ainsi que la durée de capacité de stockage thermique (6h) (Fig.10).

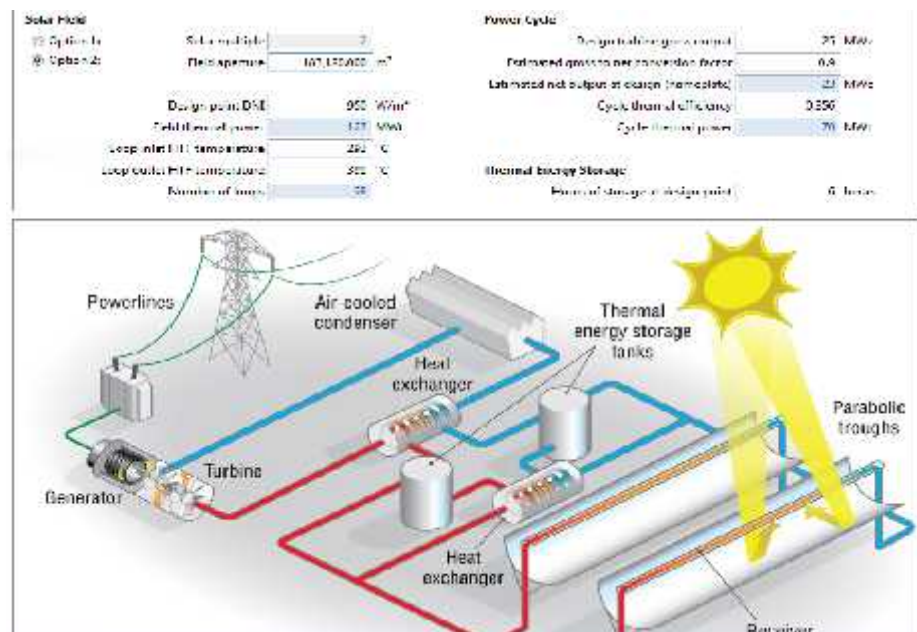


Figure 10 : Introduction des paramètres du champ solaire et capacité de la turbine

Récapitulatifs des paramètres du champ solaire (Solarfield) et introduction des paramètres HTF (Therminol VP1) (Fig.11).

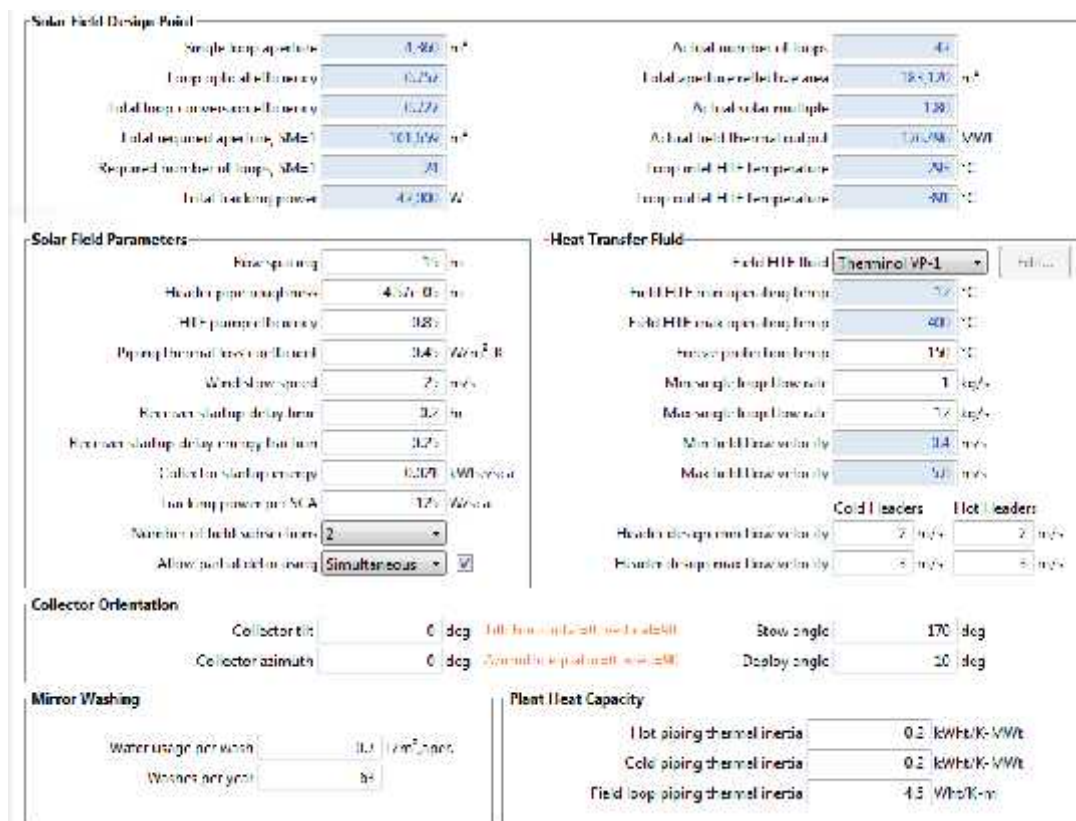


Figure 11 : Récapitulatif des paramètres et introduction du type de fluide caloporteur

[illegible]

Figure 12 : Paramètres des collecteurscyndro-paraboliques

Receiver Type: **1**

Receiver name from library: **Schott PTF70** Apply Values from Library

Receiver Geometry

Absorber tube inner diameter	0.066 m	Absorber flow plug diameter	0 m
Absorber tube outer diameter	0.07 m	Internal surface roughness	4.5e-03
Glass envelope inner diameter	0.115 m	Absorber flow pattern	Turn flow
Glass envelope outer diameter	0.12 m	Absorber material type	304L

Parameters and Variations

	Variation 1	Variation 2	Variation 3	Variation 4*
Variant weighting fraction†	0.985	0.00	0.000	0
Absorber Parameters				
Absorber absorptance	0.96	0.96	0.2	0
Absorber emittance	Edit...	0.65	0.65	0
Envelope Parameters				
Envelope absorptance	0.02	0.02	0	0
Envelope emittance	0.86	0.86	1	0
Envelope junction distance	0.063	0.063	1	0
	☐ Broken Glass	☐ Broken Glass	☒ Broken Glass	☐ Broken Glass
Gas Parameters				
Annulus gas type	Hydrogen	Air	Air	Hydrogen
Annulus pressure (bar)	0.000	150	150	0
Heat Loss at Design				
Estimated avg. heat loss (W/m)	100	1100	1500	0
Optical Effects				
Bellows shadowing	0.96	0.96	0.96	0.960
Dir on receiver	0.98	0.98	1	0.98

* The variant weighting fractions and Variation 4 values are all part of the library.

Figure 13: Paramètres de l'absorbeur

Le mode de fonctionnement de la turbine à vapeur est défini par le cycle de Rankine (Fig.14).

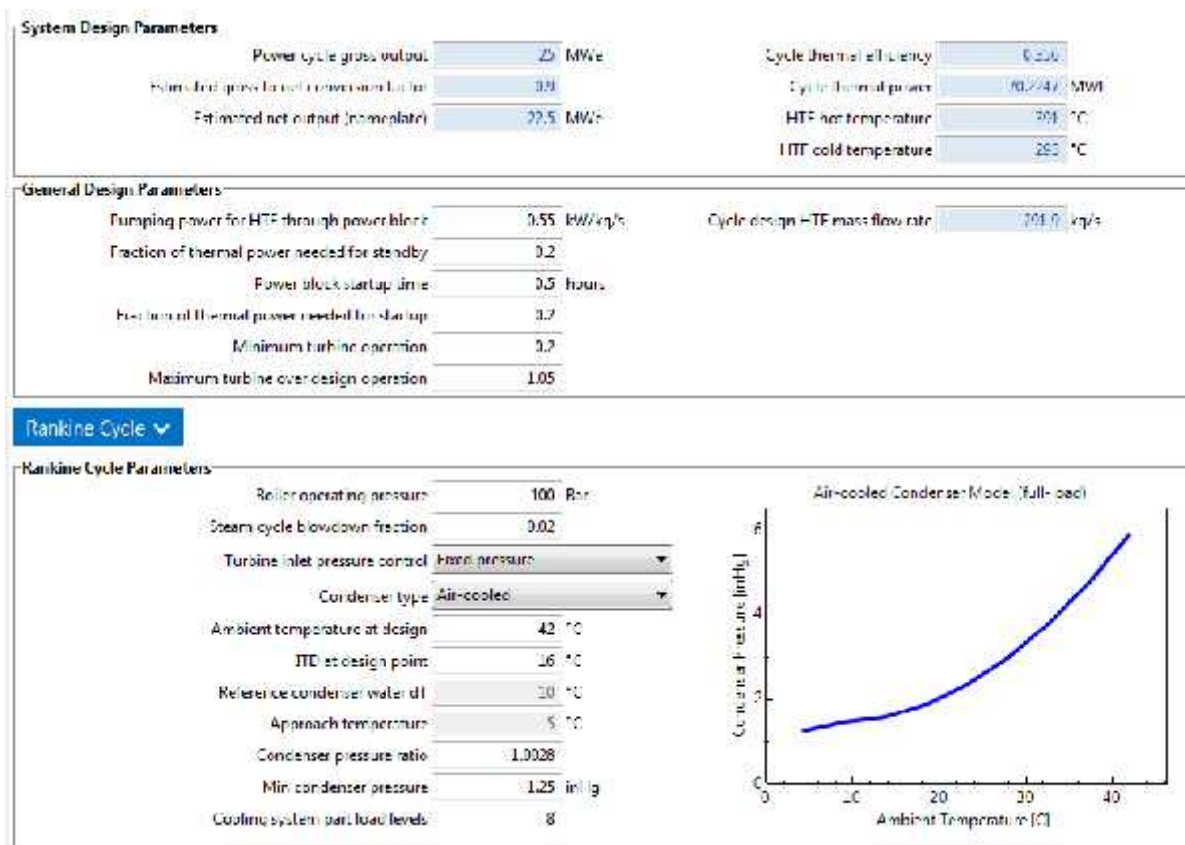


Figure 14 : Cycle de la turbine

Récapitulatifs des paramètres introduits (Fig.15).

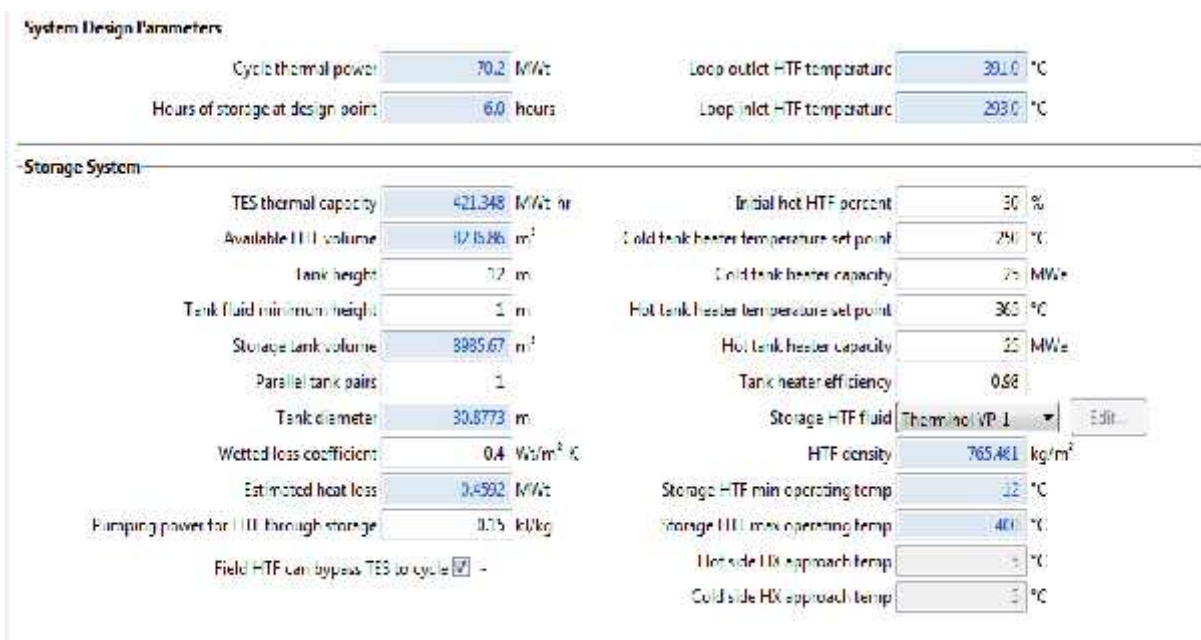


Figure 15 : Paramètres de stockage thermique

Note : la capacité de stockage thermique a été prédéfinie par le logiciel SAM, ainsi elle correspond aux valeurs déjà mentionné dans le chapitre III.

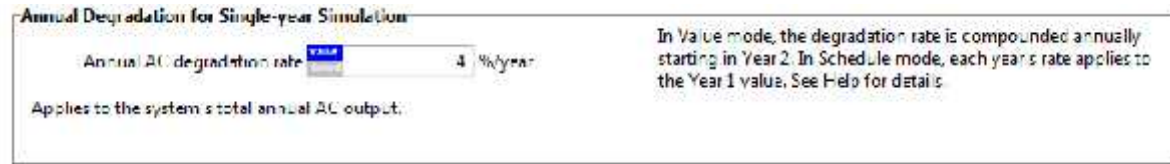


Figure 16 : Dégradation

La dégradation (Fig.16) est calculé selon le temps total de fonctionnement de la centrale, en général c'est 25 ans de service, on obtient alors une dégradation de 4% chaque année.

$$D = (1 * 1) \div 25 = 0.04 = 4\%$$

9) Résultats et interprétations :

9.1)Electricityfrom/togrid :

La consommation d'électricité par le système (Electricityfromgrid) est faible, mais ni ou moins n'égale pas à zéro, du fait que le système consomme de l'énergie pour se maintenir en fonctionnement durant la nuit, les valeurs négatifs signifie que le système consomme de l'énergie (Fig.17). Contrairement à l'électricité fournie au réseau électrique (Electricity to grid), cette dernière fournie un apport considérable des que le jour se lève (Fig.18).

Note : l'électricité fournie au réseau est d'autant plus grande les jours où on aura une durée d'ensoleillement plus longue où un DNI plus grand, de ce fait, on observe que le 21 décembre est faible.

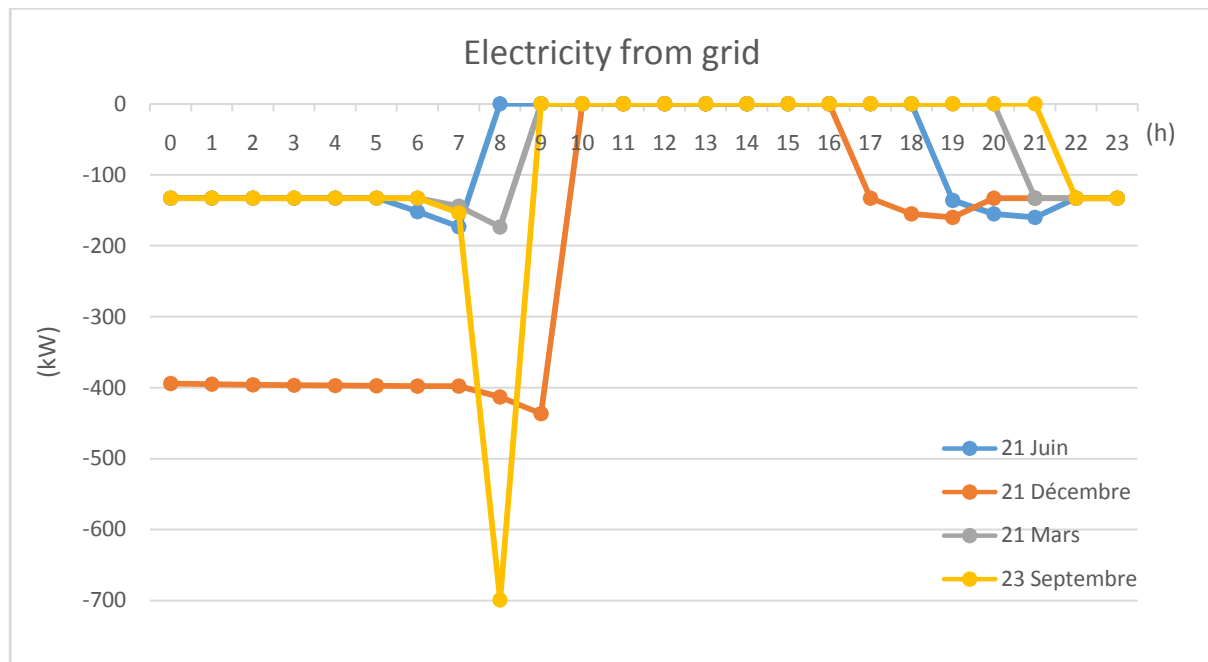


Figure 17 : Diagramme d'électricité reçu du réseau

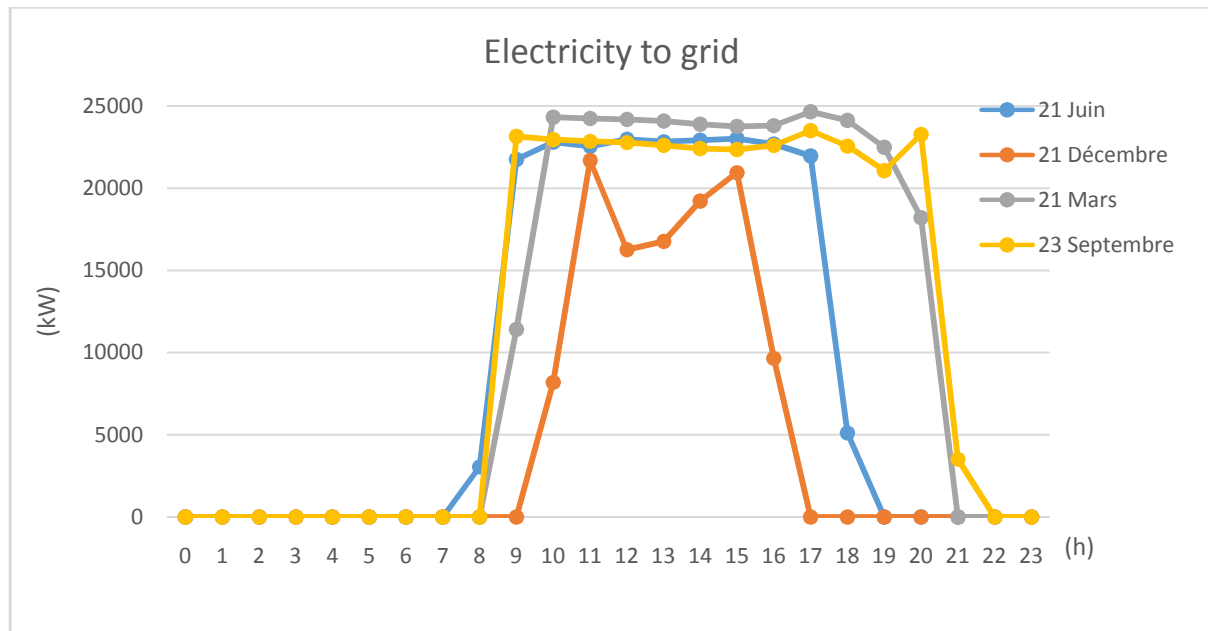


Figure 18 : Diagramme d'électricité fournie au réseau

9.2) la capacité de collecteur :

L'évolution de la capacité des collecteurs à capter les rayonnements solaire (Field collector DNI – cosineproduct), est particulièrement changeante selon les mois de l'année, pour les jours types, le 21 Mars et le 23 Septembre, on a, un captage d'autant plus grand, jusqu'à 840 W/m^2 , contrairement au 21 Juin et 21 Décembre, une valeur crête de 680 W/m^2 (Fig.19).

L'efficacité (Field collector cosine efficiency) de celle-ci, varie nettement, on observe que le 21 Décembre, atteint une valeur crête minimale de 0.55 (Fig.20), signifie que les conditions météorologiques influencent drastiquement sur la capacité des collecteurs.

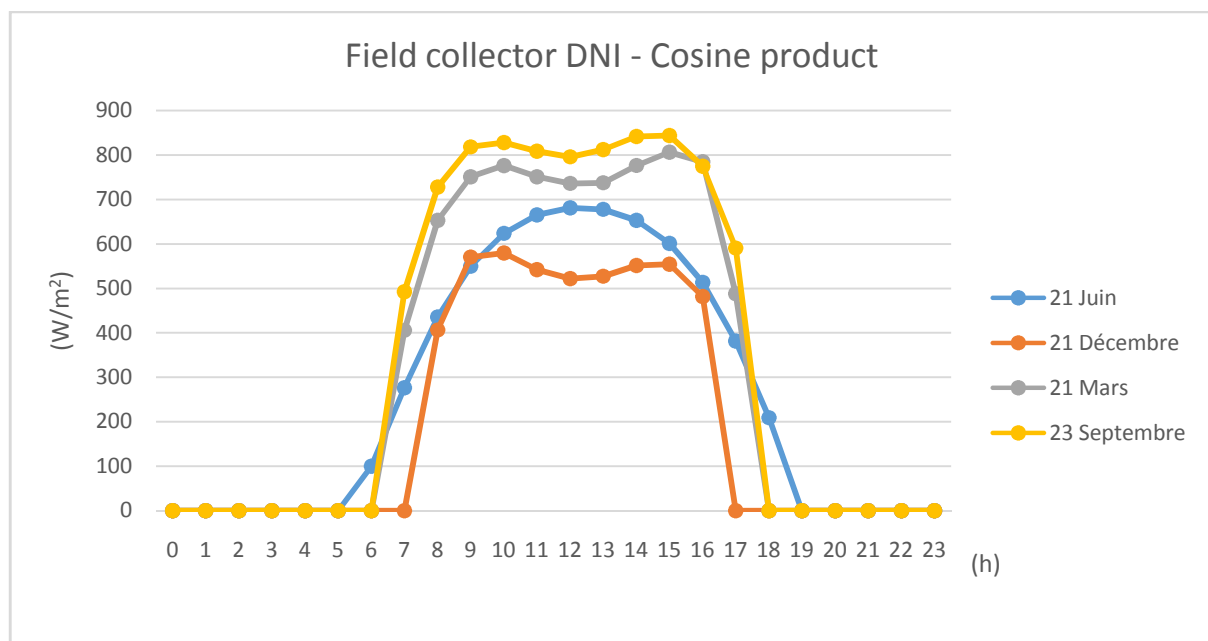


Figure 19 : Diagramme du DNI collecté

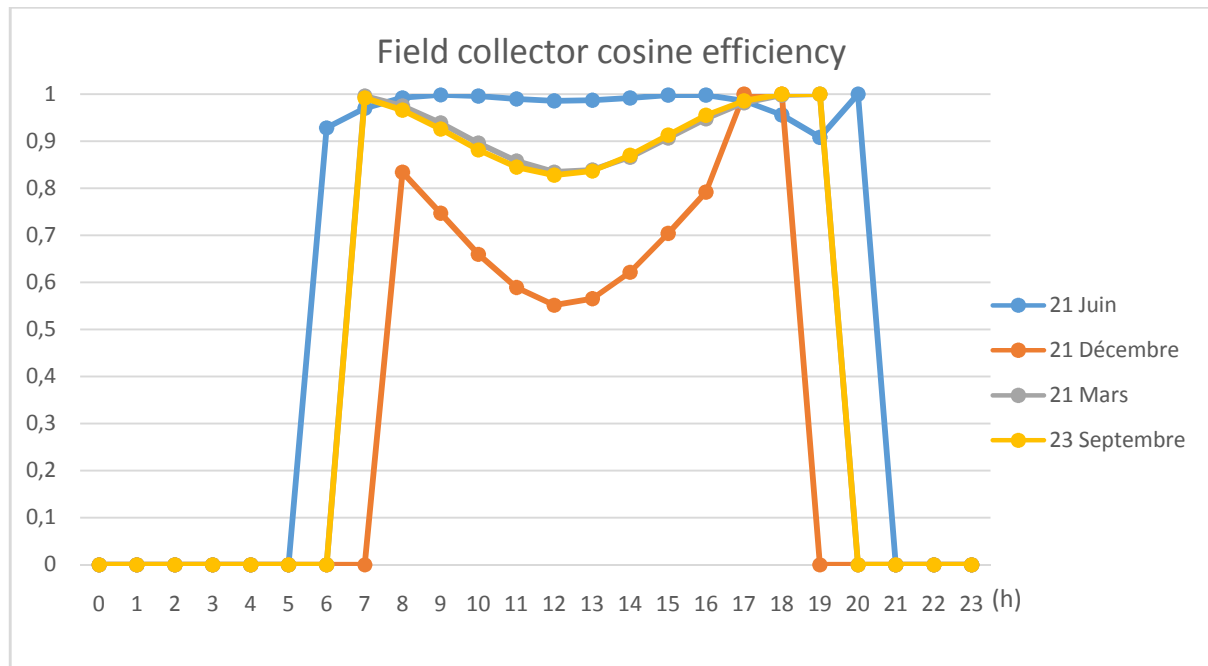


Figure 20 : Diagramme de l'efficacité des collecteurs

9.3) Pertes optiques et thermiques:

L'évolution des pertes liées à l'optique des collecteurs son assez prévisible, les diagrammes (Fig.21) et (Fig.22) reflètent une évolution presque binaire, des valeurs 0 signifie que les collecteurs ne capte aucune radiation, la valeur 1 est quantà elle, signifie que les collecteurs captent 100% de leurs capacité, certes, elles varient en avance ou en retard selon le lever de soleil.

Les pertes thermiques dues à la tuyauterie du champ solaire (Field piping thermal losses) sont relativement prévisibles pendant toute l'année, certes, une léger baisse est observable pendant la nuit de 0.065MWt jusqu'à 0.055MWt, une forte augmentation est visible pendant les premières heures de la journée pour attendre une valeur crête maximale de 0.1MWt ainsi elle reste stable jusqu'au crépuscule, pour en fin, diminuer pendant la nuit (Fig.23).

Note : ces pertes sont en corrélation avec l'isolation thermique des conduites qui acheminent le fluide caloporteur.

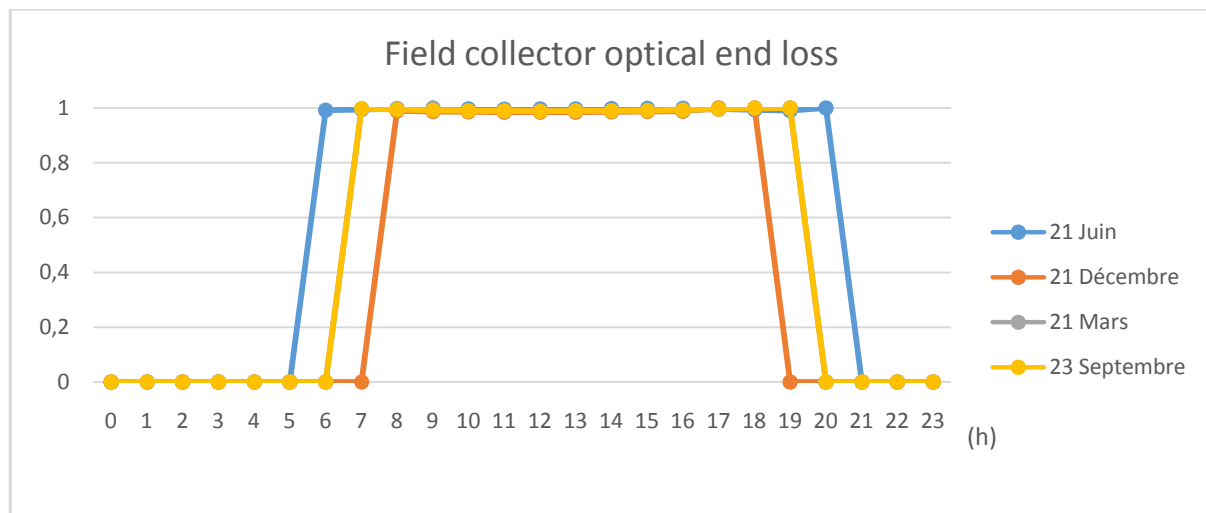


Figure 21 : Diagramme des pertes liées à l'optique des collecteurs

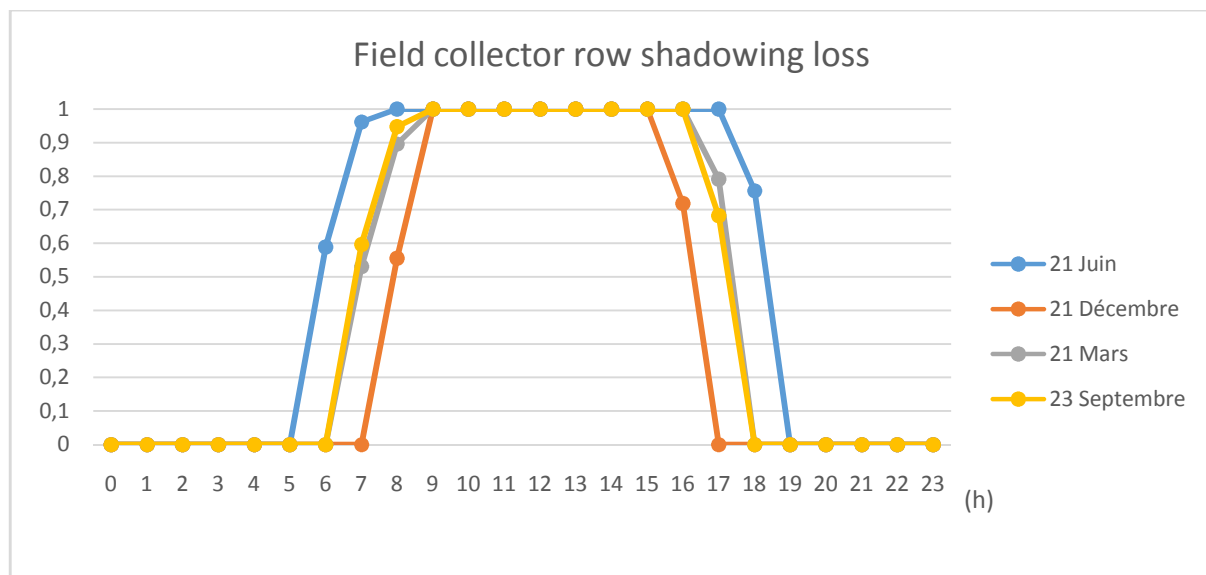


Figure 22 : Diagramme des pertes liées à l'ombrage des collecteurs

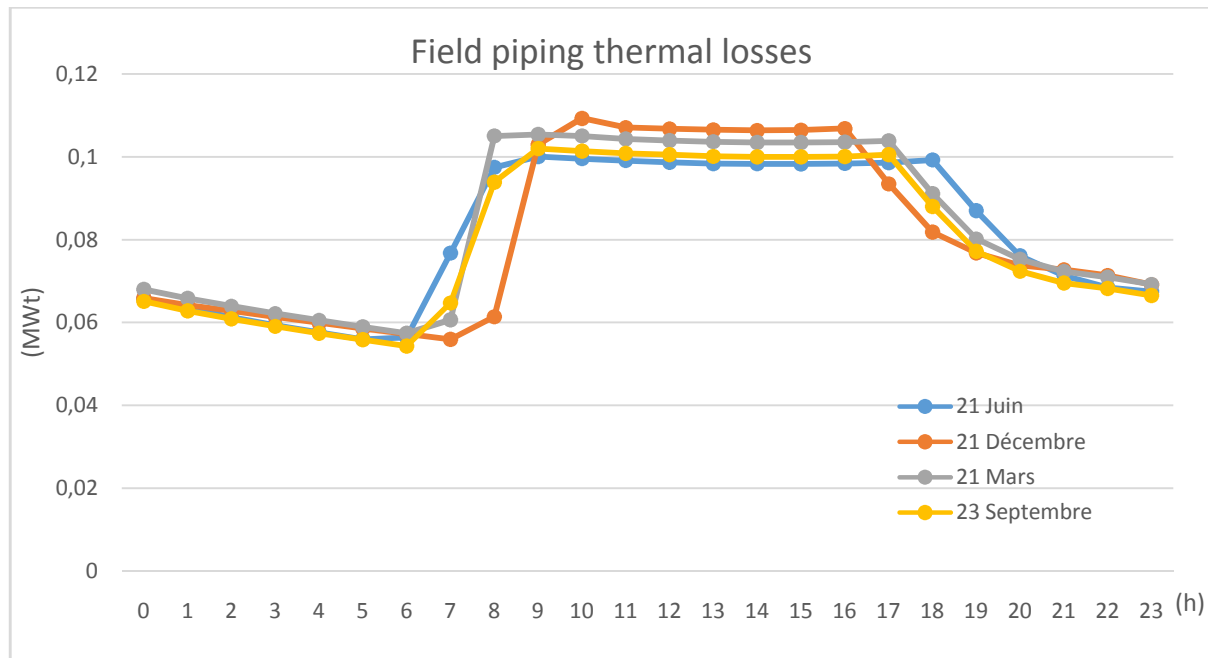


Figure23: Diagramme des pertes thermique du la tuyauterie

9.4)Température :

L'évolution destempératures d'entre et de sortie du fluide caloporteur du champ solaire (Field timestep - averagedinlettemperture)(Field timestep - averagedoutlettemperture) sont relativement stable au cours de l'année, pour les journées types, on observe :

A l'entrée, une diminution de la températurependant la nuit de 250°C jusqu'à 200°C, résultat de la faible consommationde la turbine de l'énergie thermique présente dans le fluide caloporteur pour se maintenir en fonctionnement, en suite, une forte augmentation pour atteindre une valeur crête de 290°C le reste de la journée dû au retour du fluide, et en fin descendre progressivement au coure de la nuit (Fig.24).

A la sortie, une diminution de la température pendant la nuit de 250°C jusqu'à 200°C, en suite, une forte augmentation jusqu'à atteindre et se stabilise à 390°C, résultat de la collecte thermique des collecteurs, et en fin descendre progressivement au cours de la nuit (Fig.25).

Note : les températures de sortie son nettement supérieures à celle d'entrée, les températures pendant la nuit sont égales.

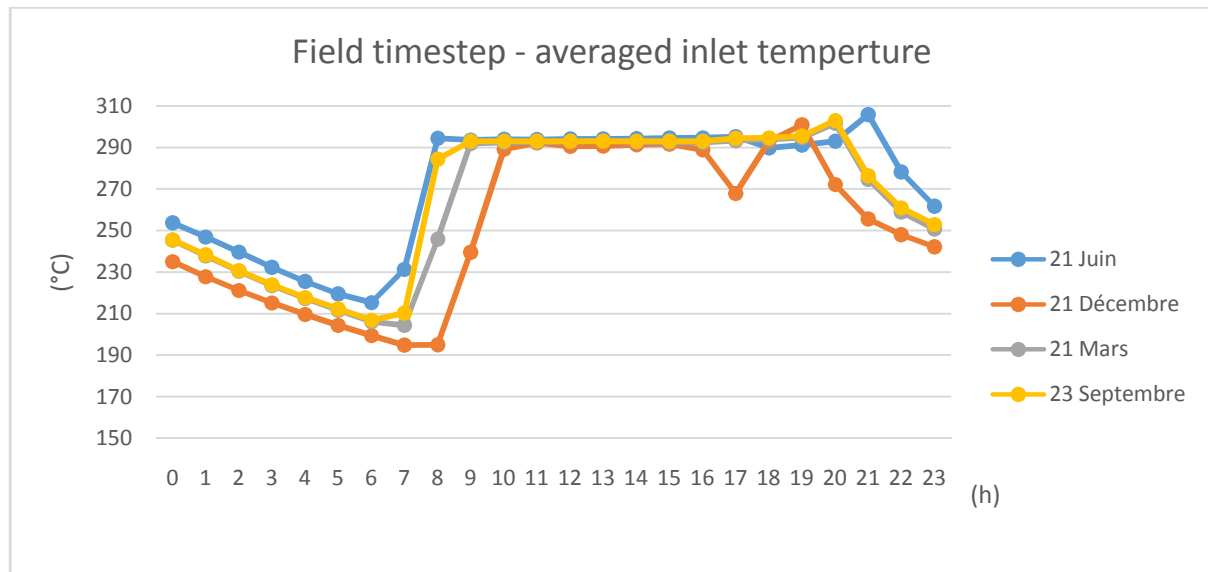


Figure 24 : Diagramme des températures d'entrée du champ solaire

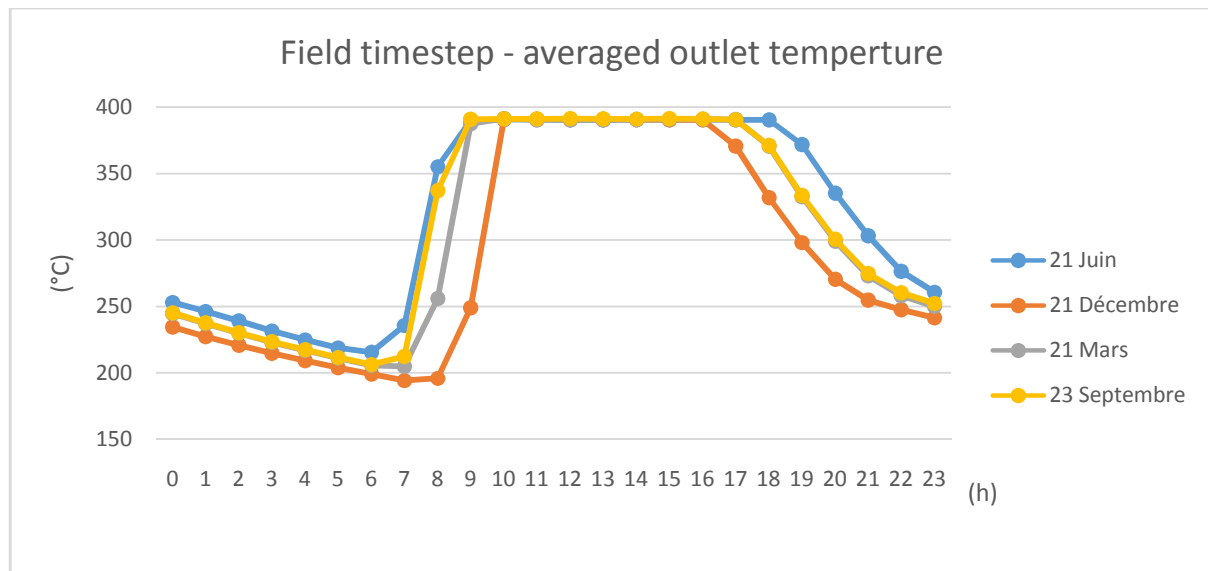


Figure 25 : Diagramme des températures de sortie du champ solaire

9.5) Débit :

Le débit massique du fluide caloporteur délivré par le champ solaire (Field mass flow delivered) varie significativement selon les jours. Pour nos journées types, on observe un fort débit le 21 Mars et 23 Septembre, une valeur crête de 430Kg/s est atteinte, un faible débit relative aux autres journées est observé le 21 Décembre avec une valeur maximale de 240Kg/s (Fig.26).

L'évolution de la recirculation du fluide caloporteur dans le système est assez prévisible, le débit de 42Kg/s pendant la nuit signifiant qu'il est sollicité pour maintenir la turbine en fonctionnement à bas régime (Fig.24).

On remarque une forte corrélation entre le débit massique du fluide caloporteur délivré par le champ solaire (Field total mass flow delivered) (Fig.26) et la capacité des collecteurs à capter les rayonnements solaire (Field collector DNI – cosineproduct) (Fig.19).

Note : le débit est d'autant plus élevé durant les journées longues et avec un DNI élevé, contrairement aux journées courtes, ou on a une faible durée d'ensoleillement et un DNI petit.

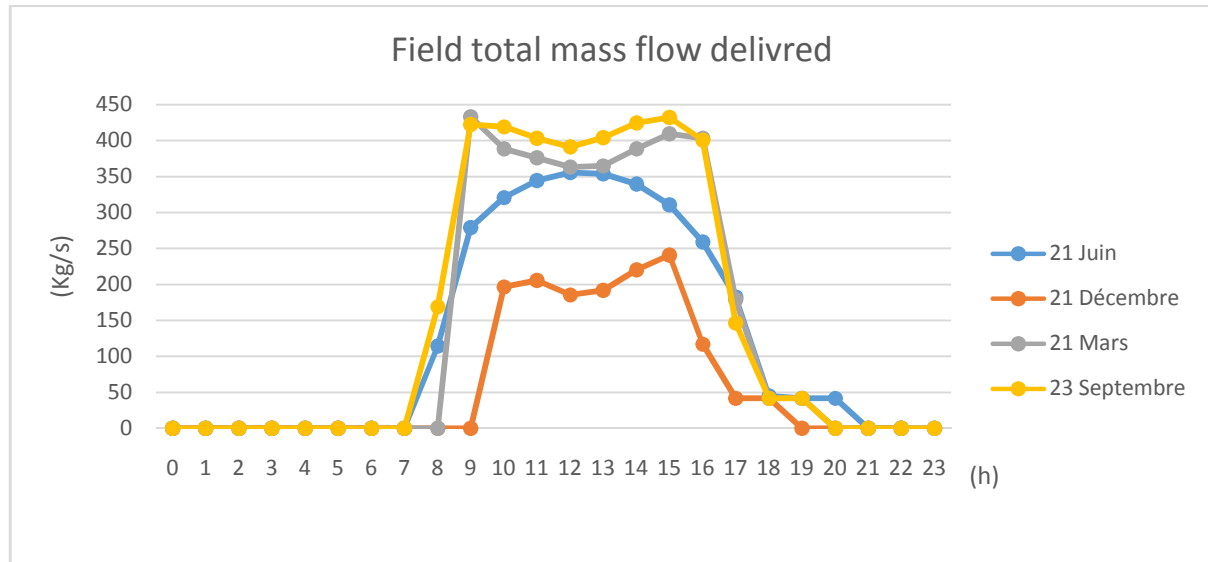


Figure 26 : Diagramme du débit délivré par le champ solaire

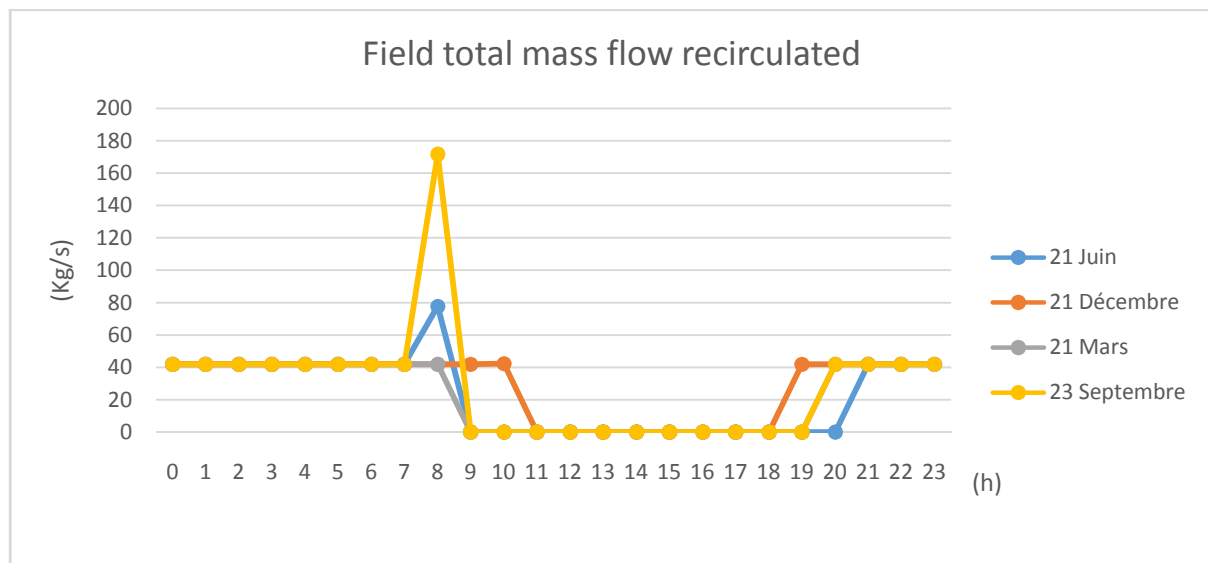


Figure 27 : Diagramme du débit ré-circulé dans le système

9.6) Température de fluide caloporteur :

L'évolution de la température du fluide caloporteur dans le cycle de puissance (Cycle de Rankine) est très prévisible, une diminution pendant la nuit est observée et une forte augmentation jusqu'à avoir une crête maximale de 390°C stable pendant les heures de services (Fig.28) en parfaite corrélation avec la température moyenne de sortie du fluide caloporteur du champ solaire (Field timestep - averaged outlet temperature) (Fig.25).

La température moyenne de sortie du fluide caloporteur du cycle de puissance est stable et ne présente pas de grande déviance (Fig.29).

Le débit du fluide caloporteur dans le cycle de puissance reste prévisible, il augmente brusquement dès le lever du jour pour atteindre une valeur crête maximale de 300Kg/s le 21 Juin, 21 Mars et 23 Septembre, son évolution est inférieure le 21 Décembre, du fait de, faible rendement de la centrale (Fig.30).

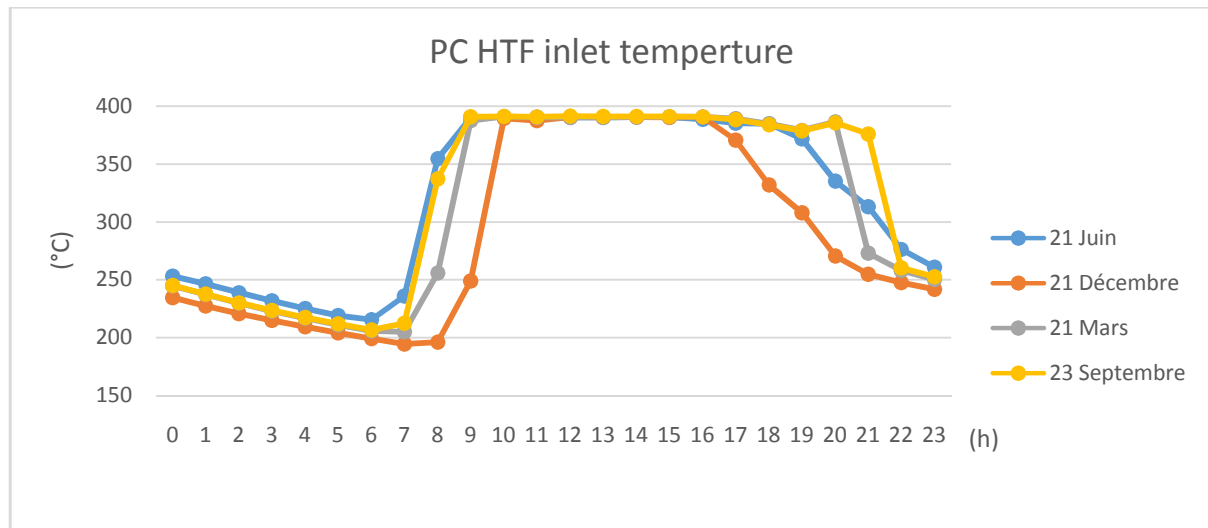


Figure 28 : cycle de puissance d'entrée du HTF

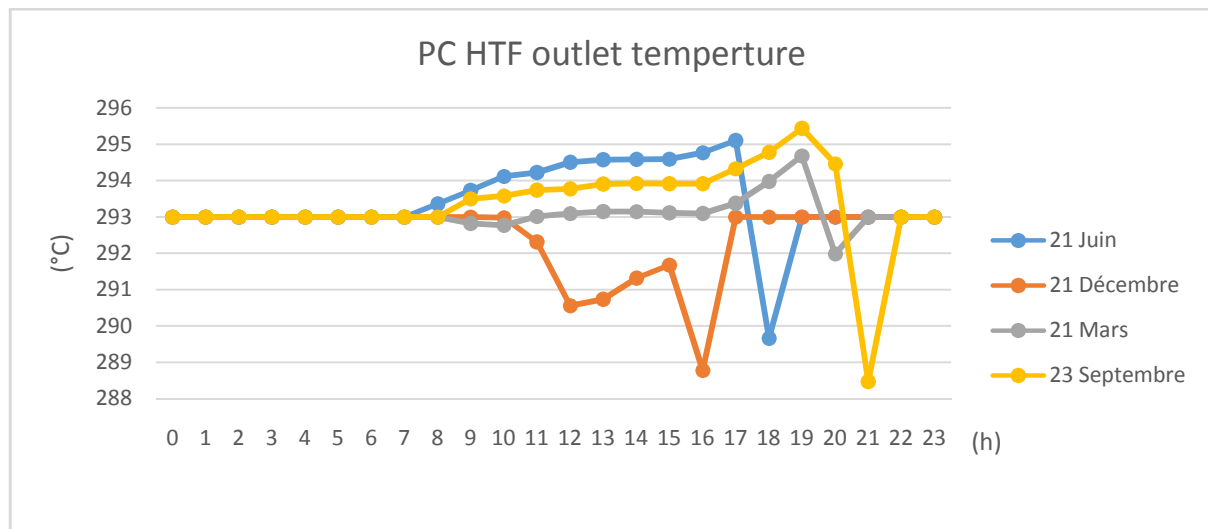


Figure 29 : cycle de puissance de sortie du HTF

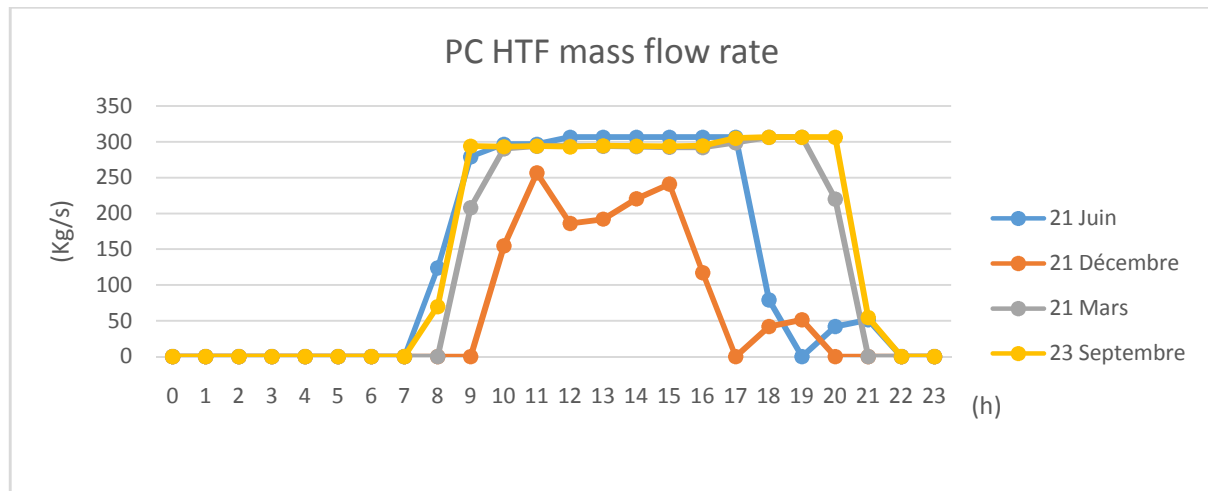


Figure 30 : cycle de puissance du débit HTF

9.7) Absorbeur :

Diagramme représentant le débit du fluide caloporteur à l'intérieur de l'absorbeur (Receiver mass flow rate) (Fig.31), on observe des valeurs crêtes maximales de 10Kg/s le 21 Mars et 23 Septembre, aussi un maximum de 8,5Kg/s le 21 Juin et en fin 5,7Kg/s le 21 Décembre, cela est dû à l'activité de la centrale, il varié selon le DNI.

Note : le débit du fluide caloporteur à l'intérieur de l'absorbeur (Fig.31) est particulièrement réduit par rapport à celui du cycle de puissance (PC) (Fig.28) et (Fig.29), cela est volontaire afin de permettre un échange thermique optimale.

Les pertes thermiques(Receiver thermal losses) diminuent pendant la nuit, et augmentent durent la journée avec l'augmentation de l'activité de la centrale (Fig.32).

L'évolution de la puissance thermique absorbédans l'absorbeur (Receiver thermal power absorbed)est typique, une forte absorption les jours avec un ensoleillement fort jusqu'à 105MWt, et une faible absorption les jours avec un ensoleillement faible (Fig.33).

Le diagramme (Fig.34) représente la puissance thermique incidente, autrement dit, le produit de taux de rayonnement et la superficie du capteur, on remarque que qu'il peut être exprimé par la somme de la puissance thermique absorbé (Receiver thermal power absorbed) et les pertes thermique de l'absorbeur (Receiver thermal losses).

Note :

Puissance Incidente = Puissance absorbé + Pertes de Puissance thermique

$$P_i = A * H$$

P_i : Puissance incidente en (W).

A : Superficie du capteur en (m^2).

H : Rayonnement énergétique en (W/m^2).

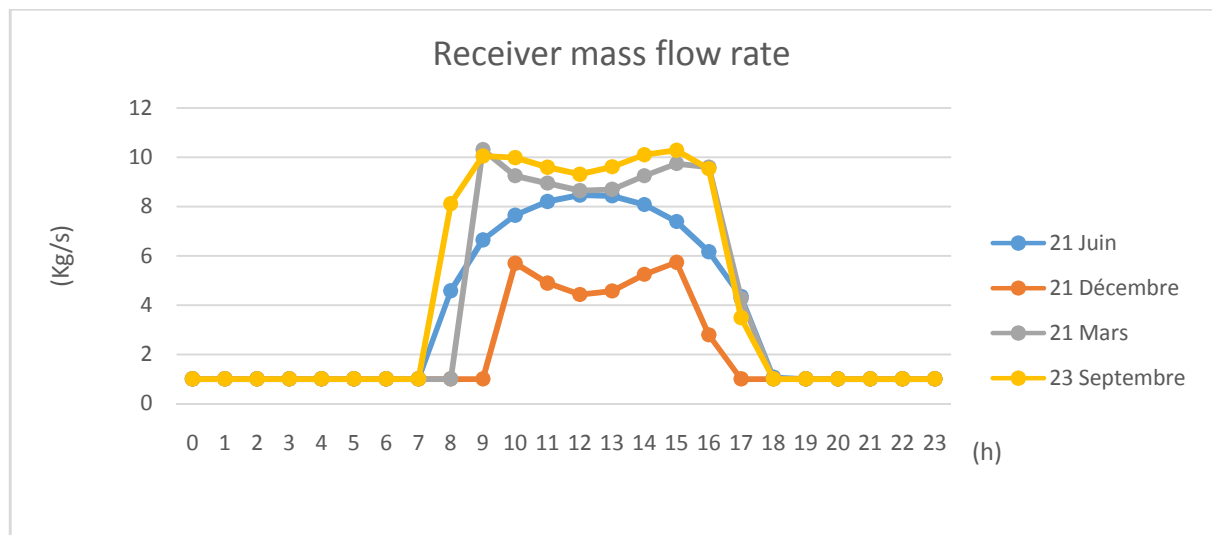


Figure 31 : Diagramme du débit d'écoulement dans les absorbeurs

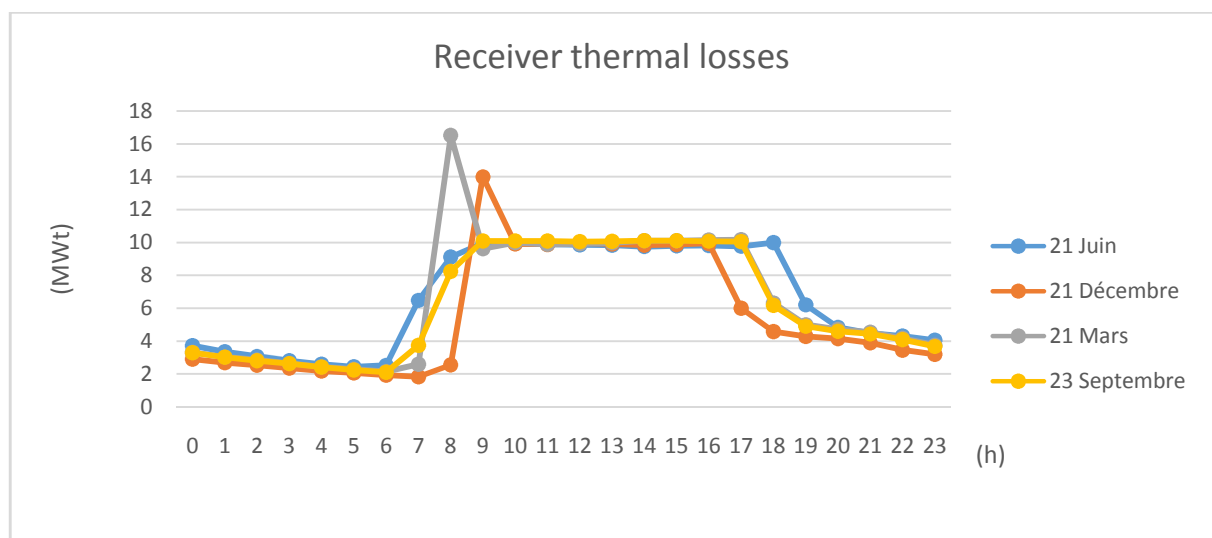


Figure 32 : Diagramme des pertes thermiques des absorbeurs

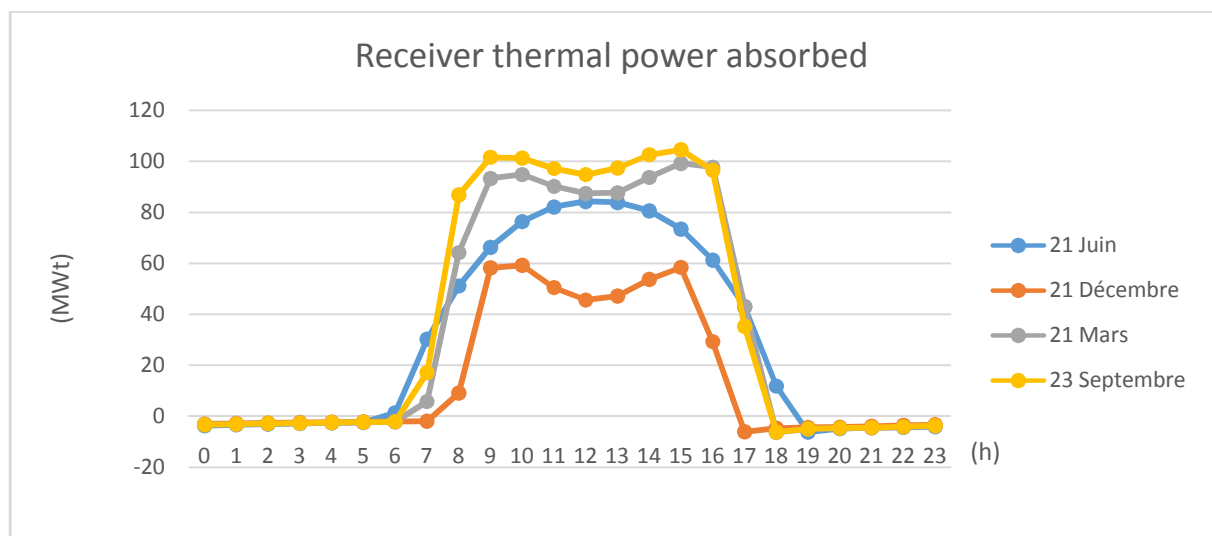


Figure 33 : Diagramme de la puissance thermique absorbée dans les absorbeurs

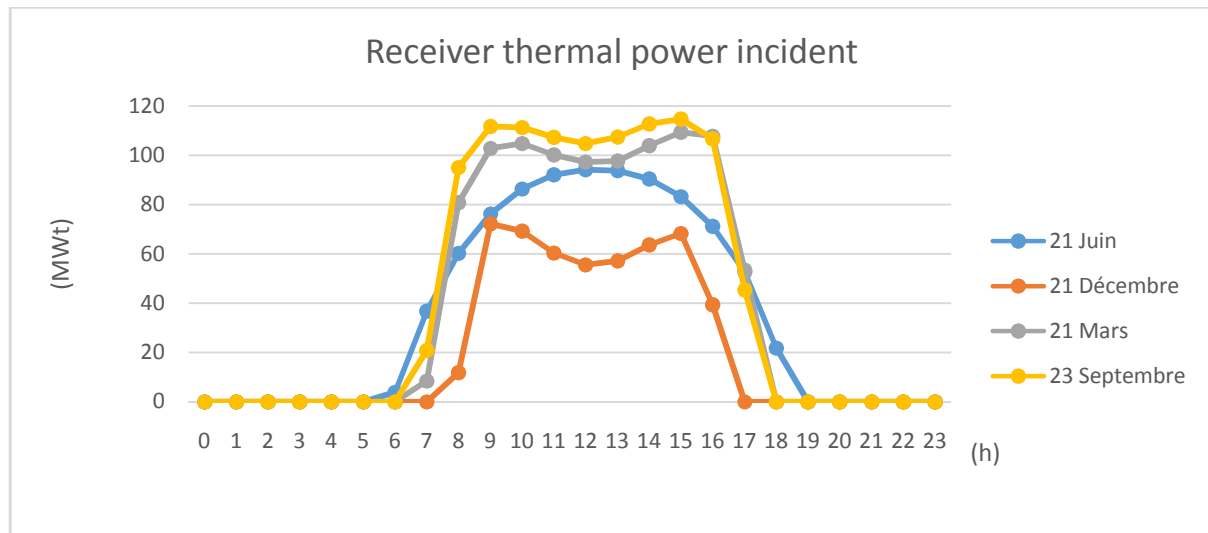


Figure 34 : Diagramme de la puissance thermique incidente

9.8) Stockage thermique de l'énergie :

L'évolution des températures froides du fluide de stockage (TES cold temperature) est relativement stable selon les périodes de l'année, pour nos jours types, on observe que les jours où on aura un ensoleillement élevé le 21 Juin, 21 Mars et le 23 Septembre, la température reste relativement élevée 291°C, par contre, le 21 Décembre elle prend la valeur de 268°C, ce que il n'ait pas très loin des températures typiques, cela est dû aux conditions météorologiques en hiver, du fait que le champ solaire reçoit moins de rayonnement solaire (Fig.35).

L'évolution des températures chaudes du fluide de stockage (TES hot temperature) suit une courbe assez prévisible, une légère diminution pendant la nuit signifie que le fluide transmet de l'énergie thermique, et une accumulation pendant la journée impacté par le rayonnement solaire (Fig.36).

Les courbes des pertes thermiques du stockage (TES thermal losses) restent stables et comprises entre 0,45MWt et 0,5MWt, ce qui est relativement petit par rapport aux capacités de stockage thermique de la centrale (Fig.37).

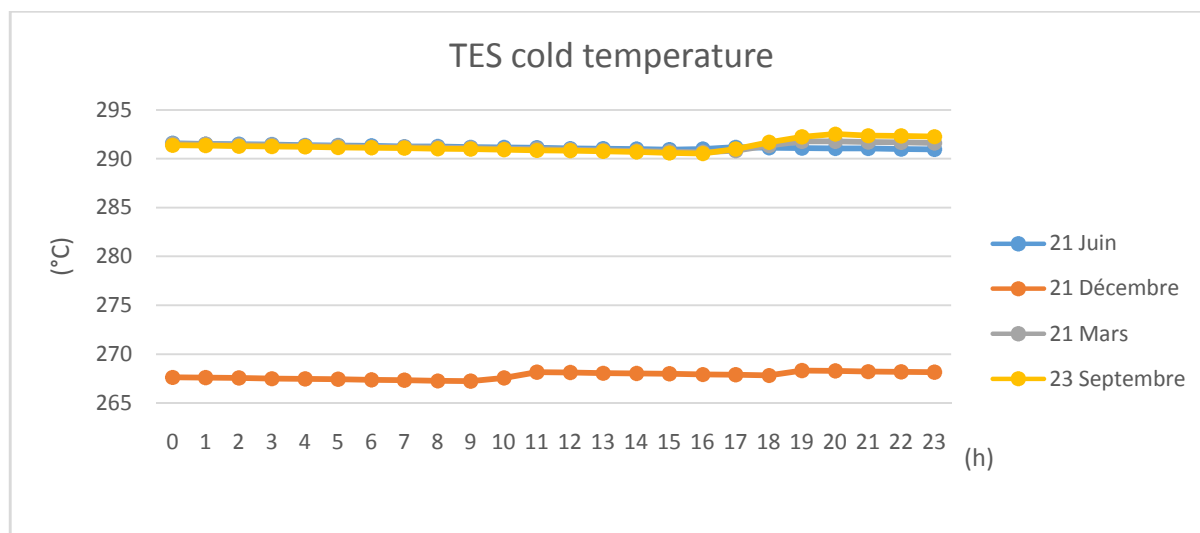


Figure 35 : Diagramme des températures du fluide de stockage initiales

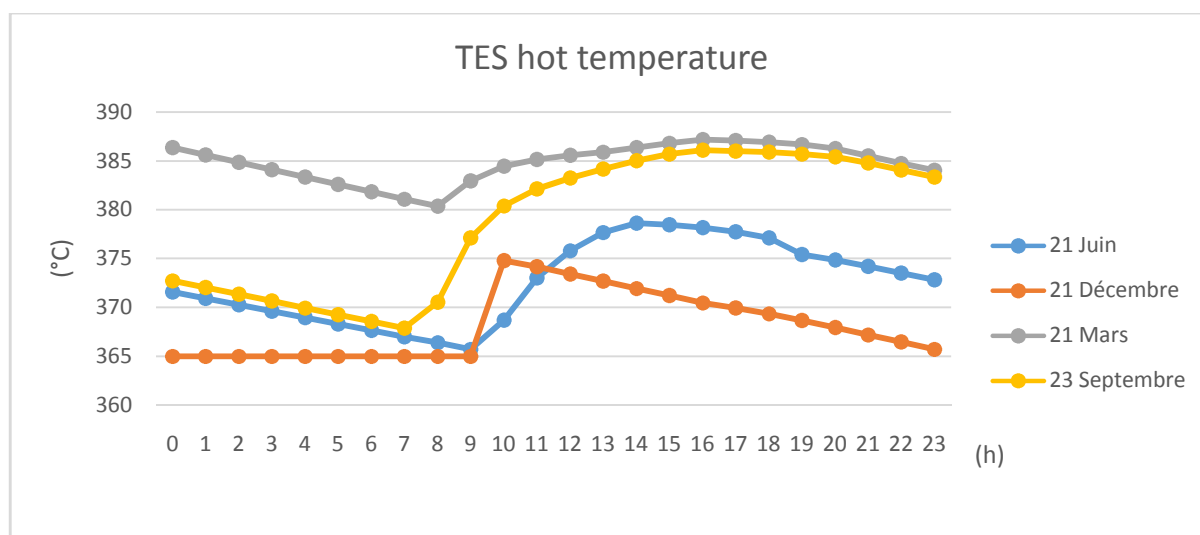


Figure 36 : Diagramme des températures du fluide de stockage chaudes

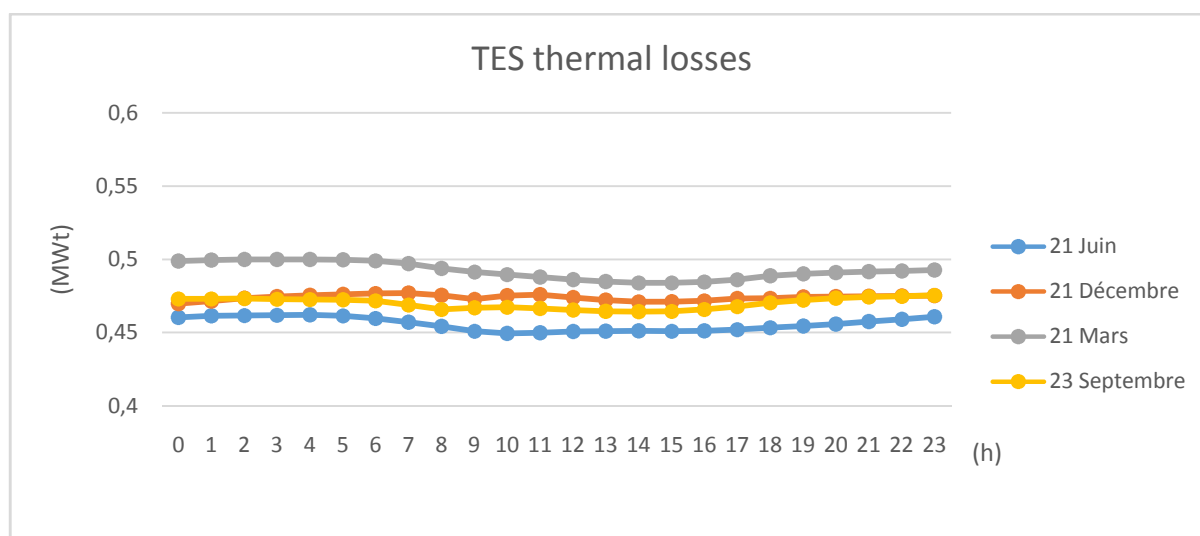


Figure 37 : diagramme des pertes thermique du fluide de stockage

9.9) Total de la puissance électrique fournie au réseau :

La puissance électrique totale délivrée au réseau (Total electric power to grid) et une donnée capitale pour une centrale électrique, cette dernière nous apprend en (MWe) la puissance générée par l'alternateur.

Dans le graphe ci-dessous on remarque que la puissance est quasiment nulle pendant la nuit, dû à l'absence d'ensoleillement et du fonctionnement réduit de la centrale, et presque optimal durant la journée plus au moins selon la période de l'année, des crêtes maximales sont observés les jours du 21 Juin, 21 Mars et 23 Septembre 24MWe, une valeur très proche de la capacité optimale de la turbine, elle se retrouve réduite 21 Décembre du faite de l'ensoleillement réduit (Fig.38).

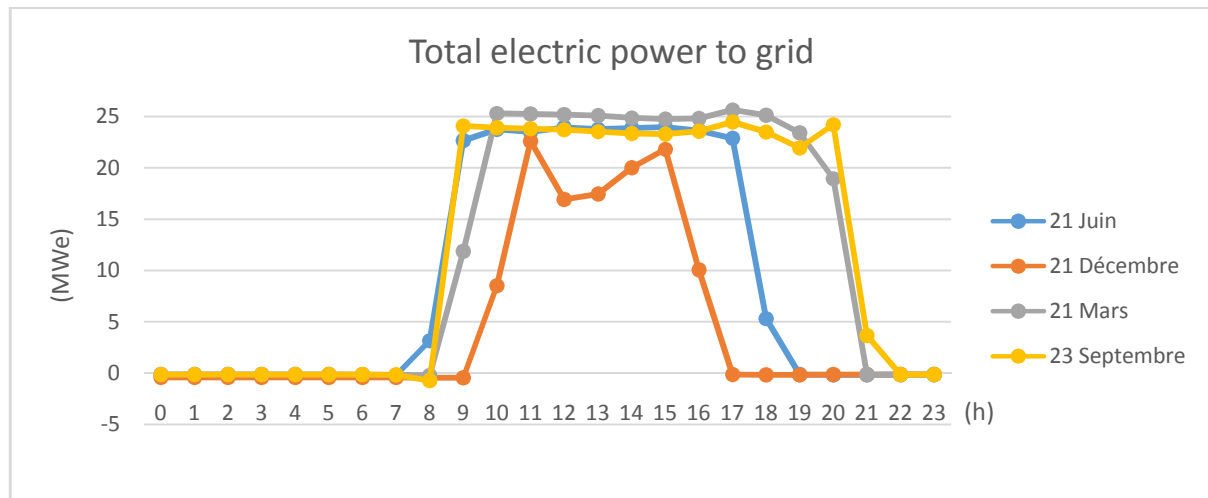


Figure 38 : Diagramme du total d'électricité délivré au réseau

10) Comparaison de la puissance électrique et du DNI capté :

Le graphe représente la moyenne mensuelle journalière de la puissance électrique fournie au réseau électrique ainsi que la moyenne mensuelle journalière du DNI collecté par le champ solaire.

On remarque une corrélation presque parfaite entre la puissance électrique délivré par l'alternateur avec le DNI collecté par le champ solaire, ce résultat signifie qu'il existe une relation étroite entre les deux (Fig.39).

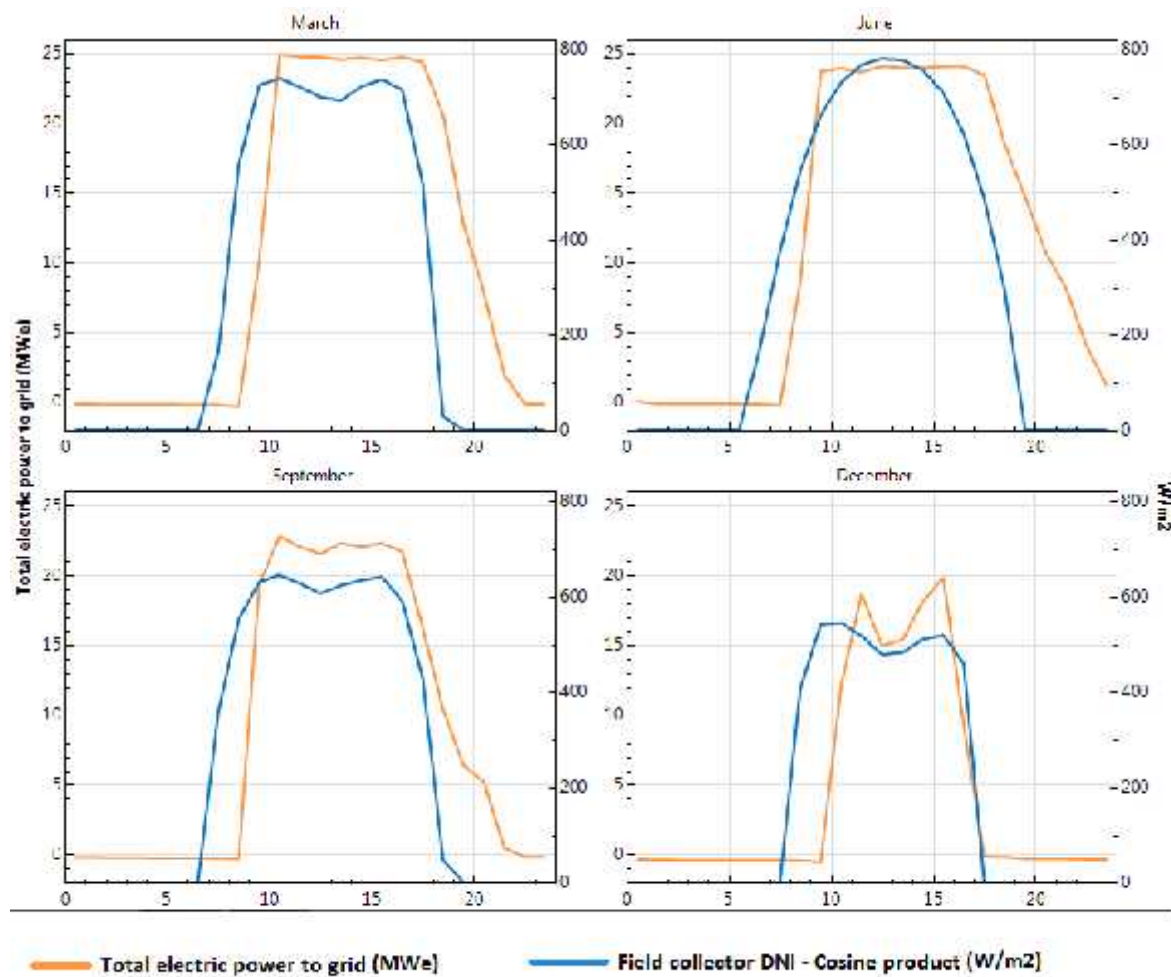


Figure 39 : Diagramme de l'évolution de la production d'électricité par rapport au DNI

11) Conclusion :

La simulation de la partie solaire de la centrale HassiR'mel nous a permis d'établir des diagrammes de plusieurs factures, ainsi mettre en évidence les plus importants, de ce fait, la qualité et la capacité de stockage du fluide caloporteur ainsi que son débit dans la centrale influent sur le rendement, mais ni ou moins, le facteur le plus important est le DNI, avoir des données météorologiques fiable est primordiale pour reproduire le plus fidèlement possible le fonctionnement de la centrale.

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué dans ce présent mémoire classé en deux grandes parties, une partie théorique de deux chapitres (I et II), consiste à relier des généralités sur les énergies et sur les turbomachines, qui nous a permis de prendre connaissance de base des technologies déployées dans le secteur industriel des énergies, ainsi, discerner les différentes machines et équipements utilisés dans les centrales électriques.

Dans la seconde grande partie de deux chapitres (III et IV), partie application, consiste à dimensionner la centrale HassiR'mel et à simuler la partie solaire, ainsi, elles nous ont permis de faire une étude technique, de comprendre le principe de fonctionnement, connaître la capacité de la centrale, les éléments présents ainsi que leurs caractéristiques techniques et la prise en mains des logiciels Meteonorm et System Advisor Model.

L'exploitation des données météorologiques et leurs intégrations dans la simulation nous ont permis de mettre en évidence des facteurs importants influent drastiquement dans la production d'électricité, en conclusion, la présence des ressources naturelles en l'occurrence le DNI est une donnée capitale pour déterminer la réalisabilité et l'emplacement d'un projet de centrale thermique cylindro-parabolique ou bien hybride comme celle de HassiR'mel.

Références bibliographiques

[1] www.reseau-canope.fr/docsience/L-energie-au-fil-des-temps.html

[2] EDF France - Le fonctionnement d'une centrale photovoltaïque.

[3] https://conseils-thermiques.org/contenu/panneau_solaire_thermique.php (consulté 12/03/2021).

[4] Futura, « *Quel est le potentiel énergétique de l'énergie solaire ?* », sur Futura (consulté le 14/04/2021).

[5] Arvizu, D., P. Balaya, L. Cabeza [et al.]. 2011, p333-400, Direct SolarEnergy. Dans IPCC Special Report on RenewableEnergy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, et al.] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1076p. Disponible en ligne sur : <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>

[6] Sylvain Brigand, « installations solaires photovoltaïques », Ed Le moniteur, Paris 2011.

[7] <https://www.3tier.com/en/support/solar-prospecting-tools/what-direct-normal-irradiance-solar-prospecting/> (16/04/2021).

[8] <https://solarpaces.nrel.gov/by-technology/> (consulté 22/04/2021).

[9] Ecosources - Les centrales solaires à miroir de Fresnel - Article publié le 24 avril 2014 - [https://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_miroir_Fresnel_solaire_thermodynamique] Quoilin Sylvain - Les Centrales Solaires à Concentration - Faculté des sciences appliquées- Université de Liège.

[10] <https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/qu-est-ce-qu-une-centrale-solaire-thermique>(consulté 25/04/2021).

[11] YUCEFI A. Cours de turbomachines, université des sciences et de la technologie d'Oran.

[12] BELKHAMSA, S. ABD ESSELAM, S., "Contribution à l'étude et au calcul des cycles thermodynamiques des turbines à gaz", mémoire d'ingénieur, Université Ouargla, 2008.

[13] BENDJEDIDI, S., "Pompe centrifuge", Rapport de stage, Université de Batna, 2012.

[14] BENAMOR, Y. REZIG, T., "Calcul énergétique d'une turbine à gaz à cycle combiné", mémoire d'ingénieur (Université Mohamed Khider – Biskra), 2010.

[15] BERRAH, F., « Centrale électrique hybride de HASSI R'MEL, SPP1 », Rapport de stage, Université de Houari Boumèdiene (U.S.T.H.B), 2012.

[16] BENNARA, I., "Etude et calcul de vérification d'un turbo-alternateur" Mémoire d'ingénieur, Université M'hamed Bouguara Bumerdes, 2009.

[17] GAHMUSSE, A., "étude d'une turbine à gaz pour la production d'électricité", mémoire Département Génie mécanique, Ecole Nationale Polytechnique, 1984).

[18]HERZALLAH, A., "Étude thermodynamique Maintenance et Fiabilité d'une turbine à gaz MS 5002", mémoire d'ingénieur, Université de Boumerdes, 2006.

[19]El GHARBI Najla - La centrale hybride de Hassi R'mel - Division Énergie Solaire Thermique et Géothermie.

[20]Revue des Energies Renouvelables Vol. 21 N°1 (2018) 27 – 36.

[21]Publication et © 2010 - Siemens AG - EnergySector - Freyeslebenstrasse 1 - 91058 Erlangen, Allemagne.

[22]Energy.siemens.com/Steam-Turbines.

[23]<https://datasheets.globalspec.com/ps/5244/SiemensEnergySector/4869D90B-4EC3-451D-9258-4E7B22C2D20D> (Consulté 05/05/2021).

[24]<https://www.thermaxglobal.com/boilers-heaters/heat-recovery-steam-generator-2/#HRSG-industry> (Consulté 06/05/2021).

[25]Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, SATINFO 20.

[26]https://www.researchgate.net/figure/Characteristics-of-SCHOTT-PTR-70-receiver_tbl6_319485163 (Consulté 12/05/2021).

[27]<https://lubrication-management.com/fr/2016/12/22/8-parametres-permettant-dinterpreter-letat-des-fluides-htf-dans-les-centrales-thermo-solaires/> (Consulté 15/05/2021).

[28]K. Ikhlef *et S. Larbi† Revue des Energies Renouvelables Vol. 21 N°1 (2018) 27 – 36 page 32.

[29]<https://www.actu-environnement.com>.

[30]<https://sam.nrel.gov/about-sam.html>(consulté 15/05/2021).

[31]ENR – Énergie et énergies renouvelables - Daniel R. Rousse, ing.,Ph.D.- 24/12/2020

[32]<https://www.hisour.com/fr/solar-irradiance-39492/>



Soutenance de mémoire de fin d'étude de master académique

Spécialité : Maintenance Industrielle



ETUDE TECHNIQUE ET SIMULATION DE LA CENTRALE HASSI R'MEL SOUS SAM

Azouaou SI HADJ MOHAND
Jugurta AMANI

Encadrant : Nouredine YAMANI

PLANT DE TRAVAIL

- **Problématique**

- **Partie théorique :**

 - Chapitre I : Etat des connaissances sur les énergies

 - Chapitre II : Généralité sur les turbomachines et leurs classifications

- **Partie pratique :**

 - Chapitre III : Description et dimensionnement de la central Hassi R'mel

 - Chapitre IV : Simulation de la partie solaire de la centrale

PROBLÉMATIQUE

Définir les facteurs influençant sur la production d'électricité d'une centrale solaire

Solution

Etude technique et dimensionnement de la CSP Hassi R'mel

Simulation de la partie solaire de la centrale l'aide du logiciel SAM

Rendu

Analyse des résultats et Interprétation

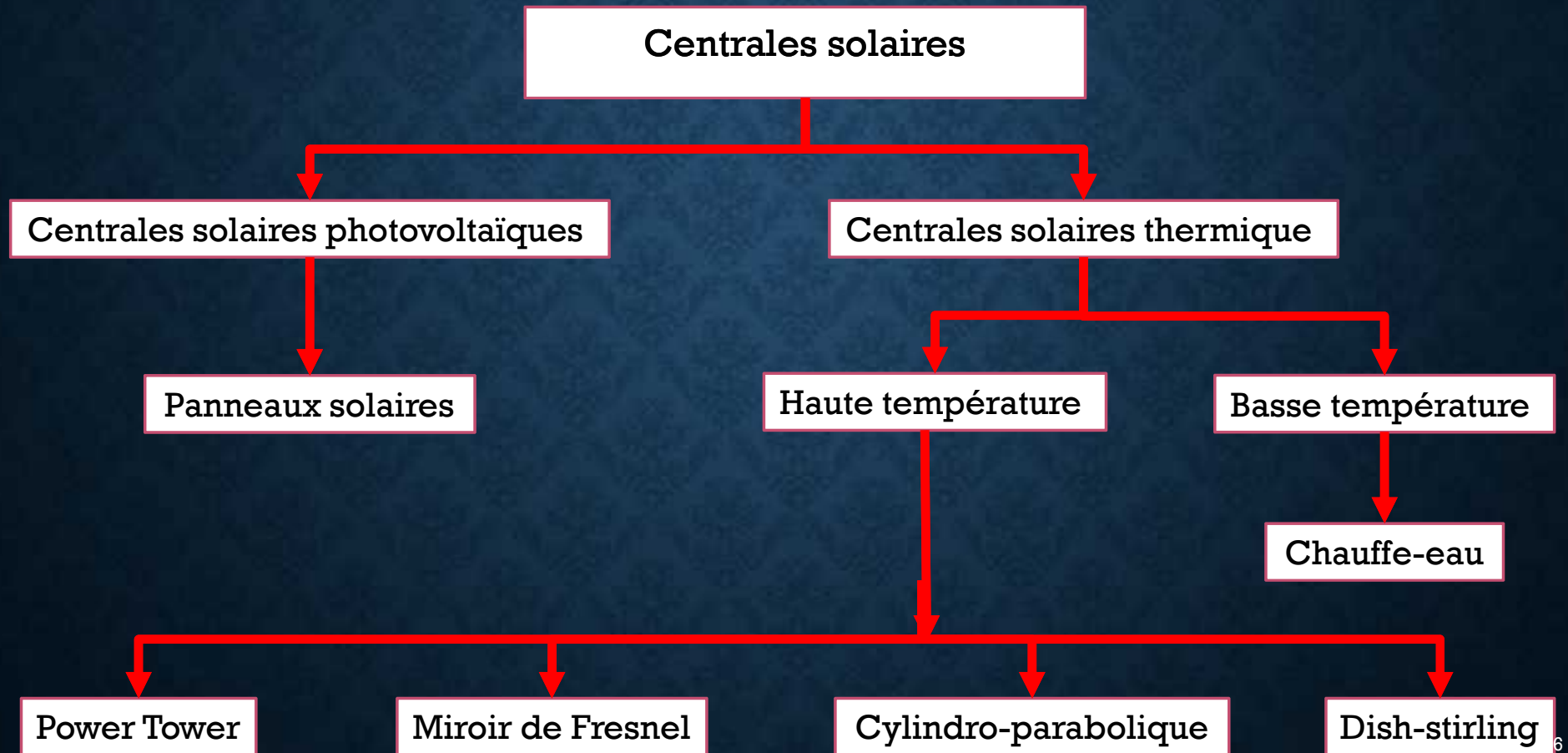
CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

- **Généralités sur les énergies et leurs sources:** En règle générale l'énergie est la capacité d'un système a produire un travail.
- **Les centrales électriques :** Dispositif utilisé pour transformer une énergie mécanique en électricité.
- **Potentielle énergétique du soleil :** Énergie transmise par le soleil par le biais des rayonnements.
- **Types de centrales solaires :** Classification.

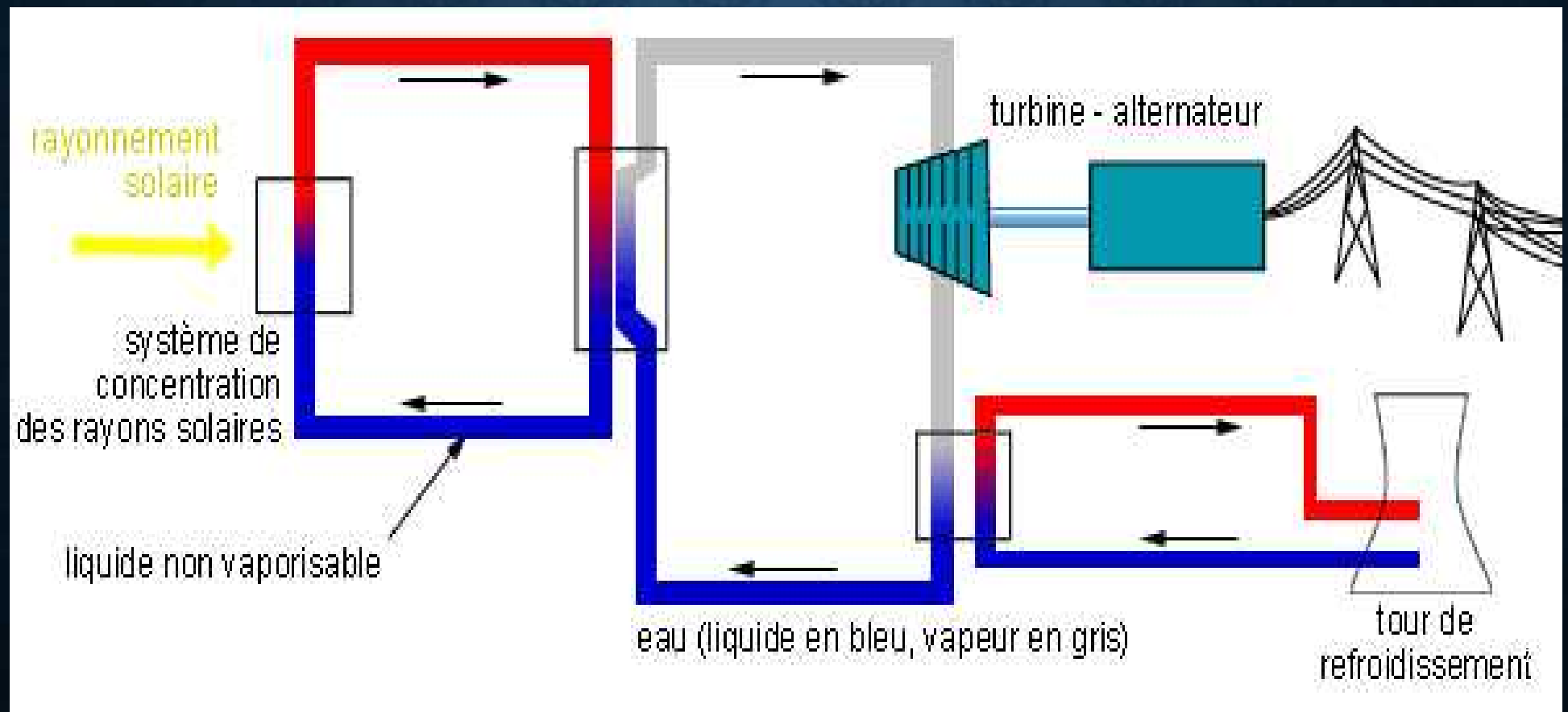
CENTRALE SOLAIRE

- Une centrale solaire est une installation industrielle qui transforme l'énergie solaire en électricité, il existe deux types de centrale :
 - Centrales solaires photovoltaïques
 - centrales solaires thermodynamiques

CLASSIFICATION DES CENTRALES SOLAIRES



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



POTENTIELLE ÉNERGÉTIQUE DU SOLEIL

- **L'irradiation horizontale globale (GHI)** : Quantité des rayonnements solaire totale reçu sur une surface horizontale de la terre
- **L'irradiation horizontale diffuse (DHI)** : Quantité des rayonnements solaire diffuse dans l'atmosphère
- **L'irradiation directe normale (DNI)** : Quantité des rayonnements solaire reçu sur un surface perpendiculairement placé face au soleil

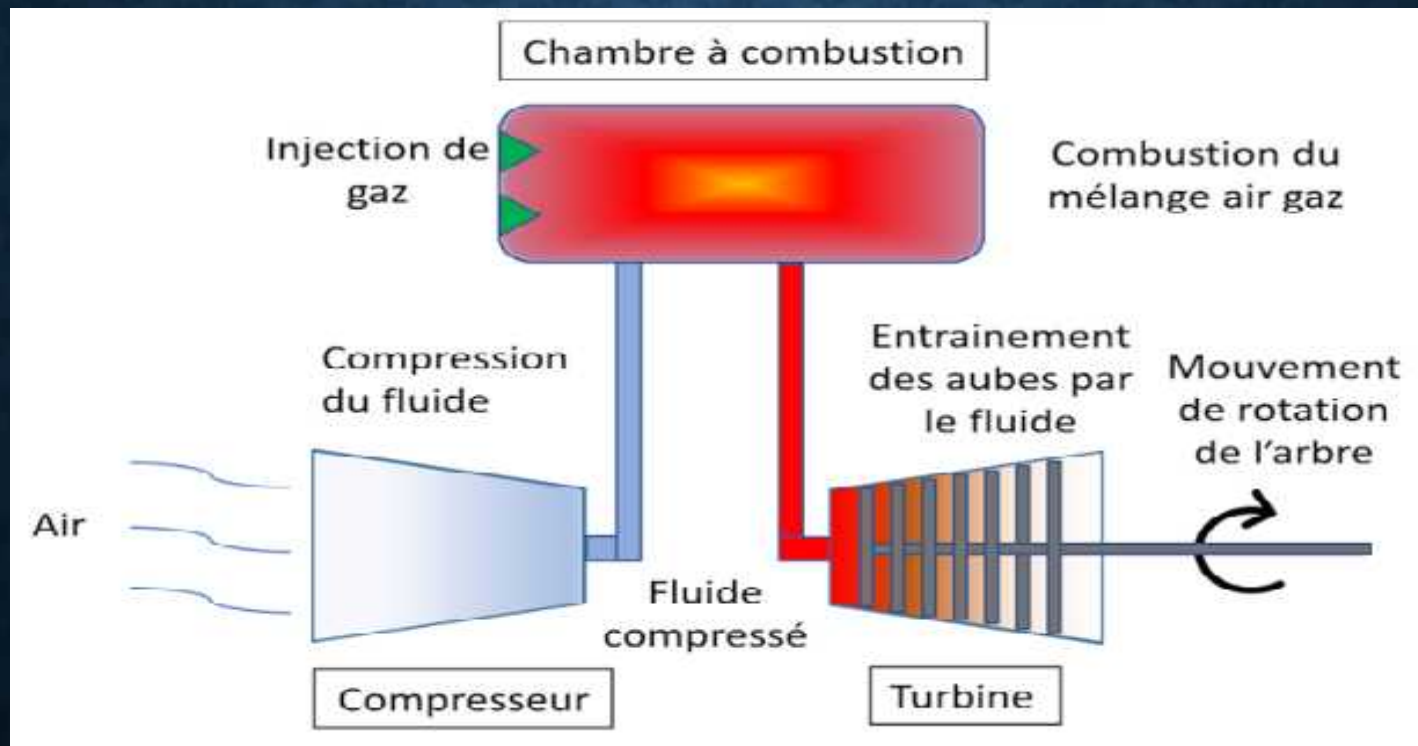
$$\text{Horizontal global (GHI)} = \text{Normale directe (DNI)} \times \cos(\theta) + \text{Horizontale diffuse (DHI)}$$

$\cos(\theta)$: Angle formé par le vecteur normale de la surface exposé au soleil et la direction des rayons du soleil⁸

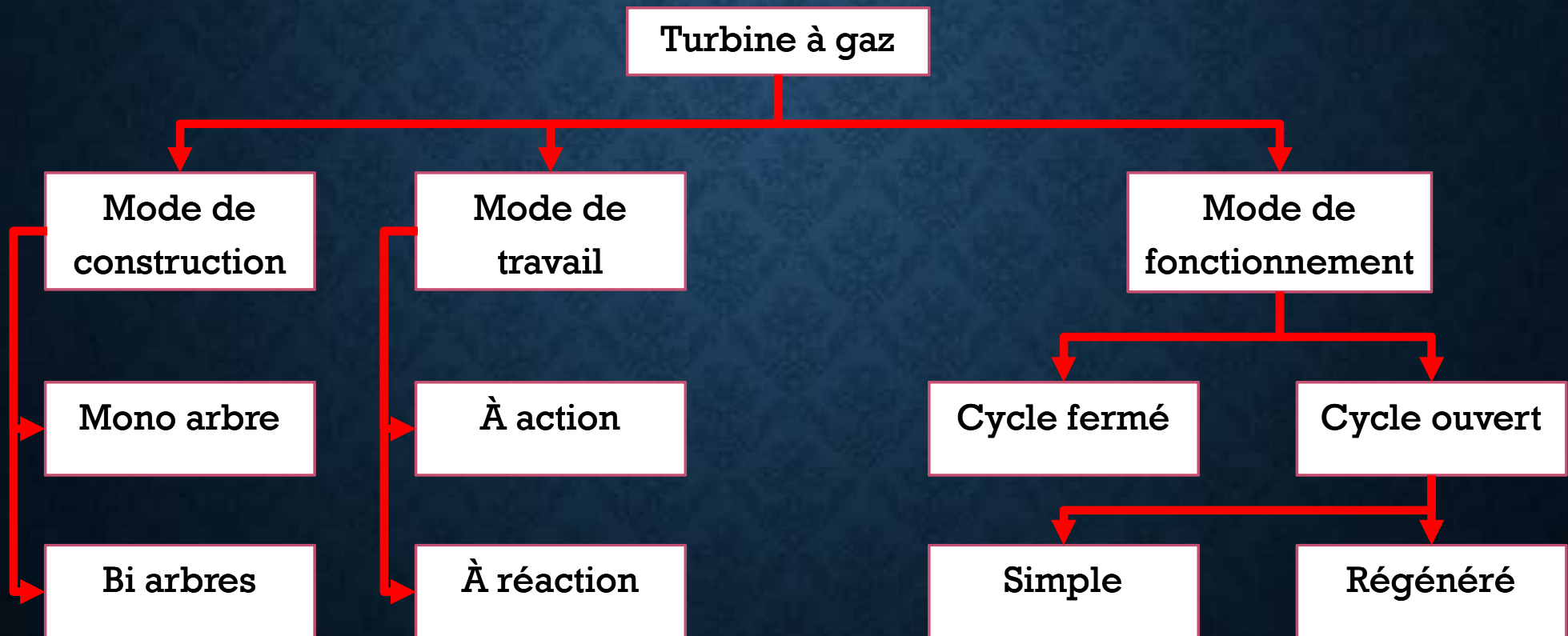
CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LES TURBOMACHINES

- **Turbomachine** : Appareil agissant sur un fluide au moyen d'un système rotatif.
- **Turbine à gaz** : machine à combustion interne qui permet de transformer l'énergie d'un combustible en travail mécanique de rotation
- **Turbine à vapeur** : machine qui extrait l'énergie thermique de la vapeur sous pression pour produire un travail mécanique de rotation
- **Classification**

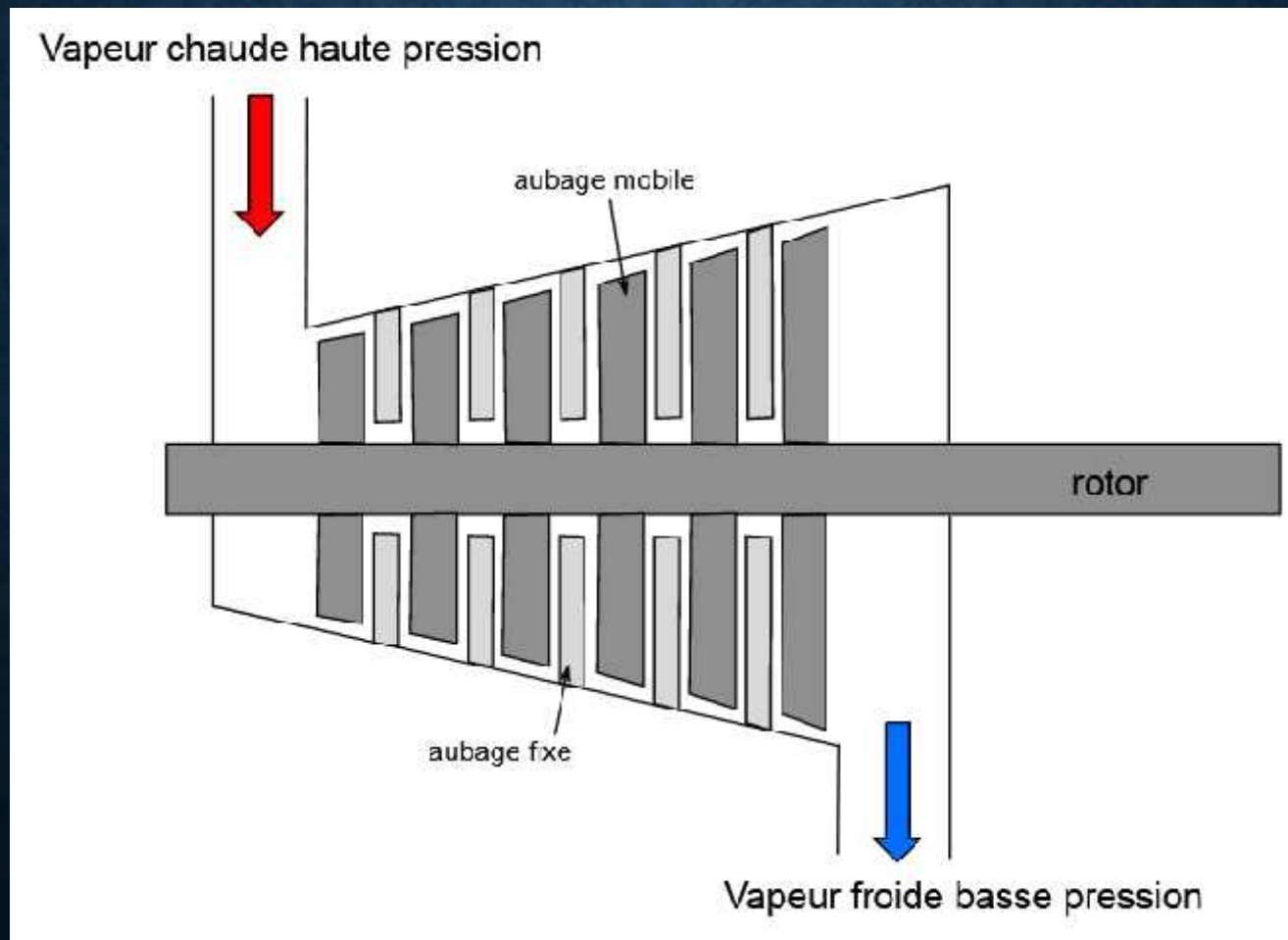
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT TG



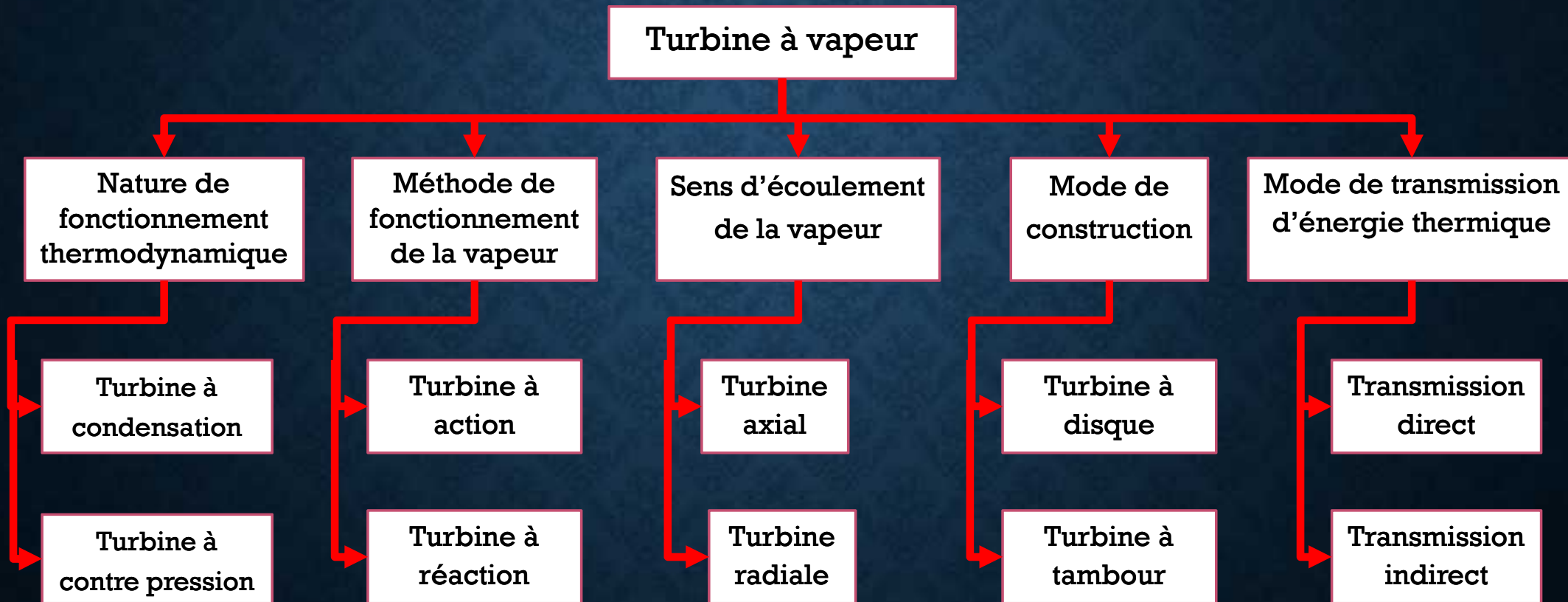
CLASSIFICATION TG



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT TV

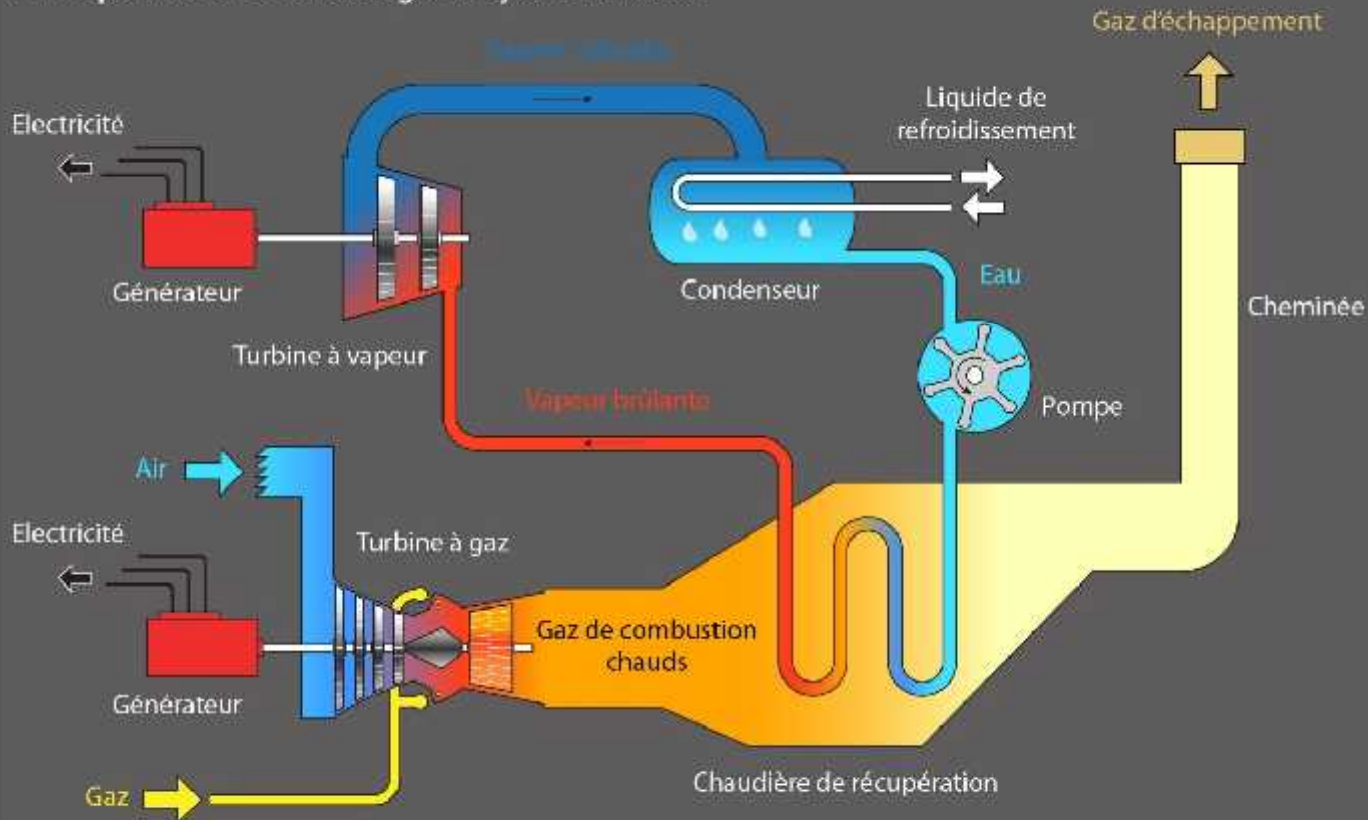


CLASSIFICATION TV



CYCLE COMBINÉ

Principe d'une centrale à gaz à cycle combiné



CHAPITRE III: DIMENSIONNEMENT DE LA CENTRALE HASSI R'MEL

La centrale de Hassi R'mel est une centrale solaire hybride cylindro-parabolique, elle est dotée d'une technologie des centrales à cycles combinés intégrée avec le solaire (ISCCS), elle est la première centrale de ce type qui a été réalisée en Algérie, avec une superficie de 150 hectare. L'augmentation de puissance se fera avec l'augmentation de la consommation de gaz naturel, la partie solaire reste quasiment identique.

La puissance totale maximale nette de la centrale est de 150 MW dont 25 MW est d'origine solaire

Localisation de la centrale

Caractéristiques et composantes de la centrale

Fonctionnement de la centrale

UN RAPIDE APERÇU DE LA LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DE LA CENTRALE



Localisation de la centrale

- La centrale est implantée sur le champ Gazier à HASSI R'MEL dans la zone industrielle (Wilaya de Laghouat) à 470km d'Alger, la latitude $33^{\circ}7'$ et la longitude $3^{\circ}21'$, Le choix final s'est porté sur ce site qui offrait les avantages suivants:
- Disponibilité de gaz
- L'accès au réseau électrique
- Une source d'eau de près de 3000 m³ /j
- Ensoleillement important
- Faible pluviométrie
- Un taux d'irradiation direct normal (DNI) de 7138 W/m²
- Une moyenne de 9.5 h d'insolation par jour et une température de 45.6° C

CARACTÉRISTIQUES ET COMPOSANTS DE LA CENTRALE

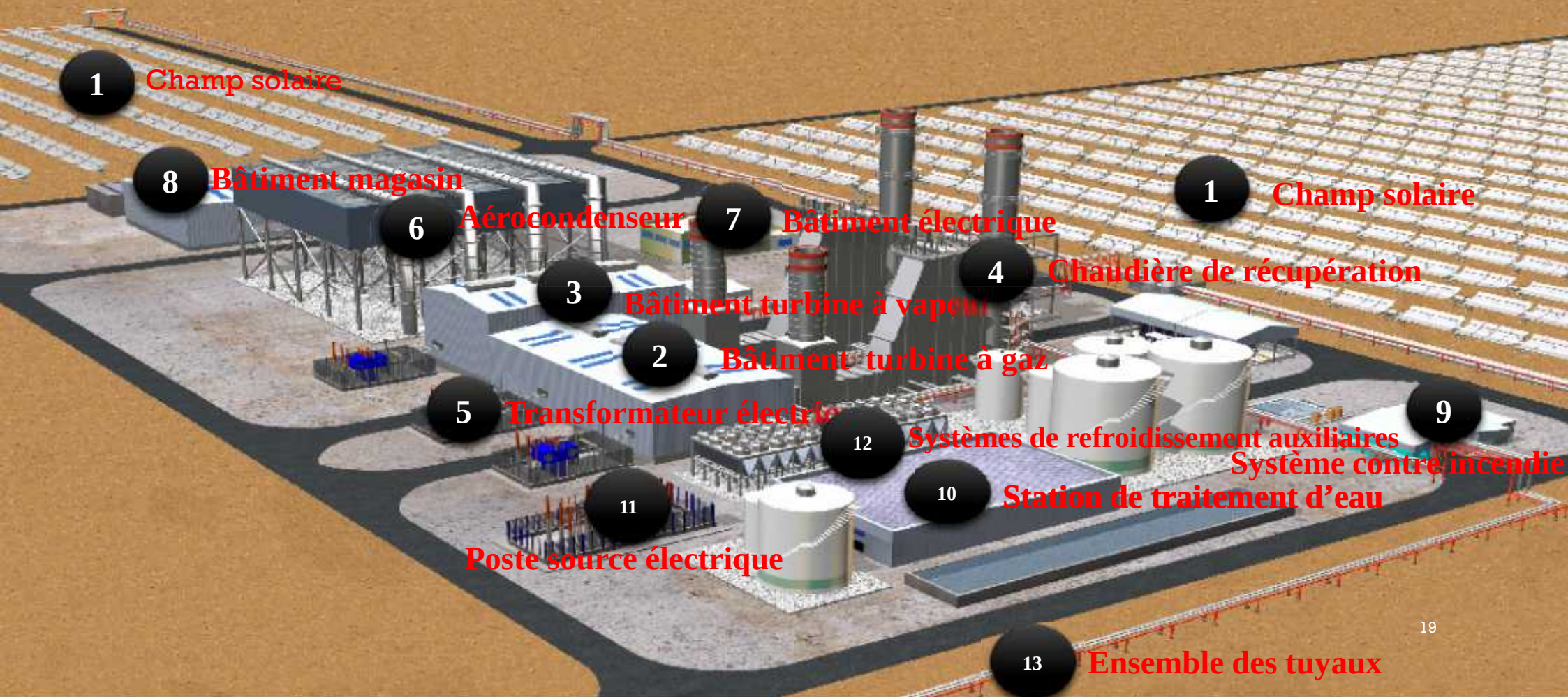
Caractéristiques

- Centrale électrique hybride Solaire-Gaz
- Capacité totale : 150 MW
- 2 turbines à gaz de type : Siemens SGT-800
- Une turbines à vapeur de type : Siemens SST-900
- Capteur : Cylindro-parabolique (Luz-2, Luz3)
- Consommation d'eau : 2500 – 3000 m³/jour.

Composants de la centrale

- Champ solaire
- Turbine à gaz SIEMENS SGT-800.
- Turbine à vapeur SIEMENS SST-900.
- Chaudière de récupération (HRSG)
- Condenseur
- Aérocondenseur
- Absorbeur
- Système HTF
- Système de pressurisation du système HTF
- Système de stockage de la centrale

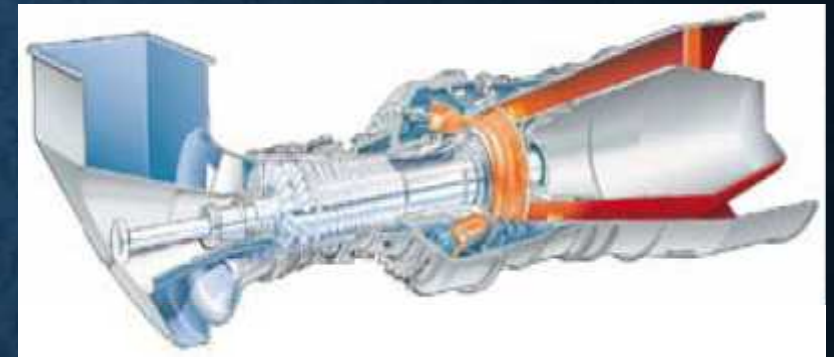
Disposition des différents bâtiments de la centrale



Les composants de la centrale

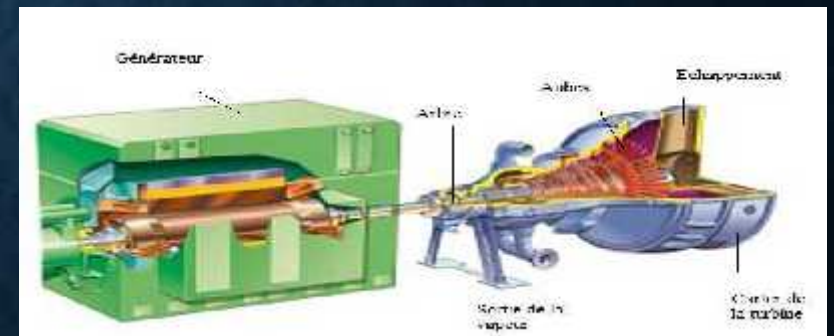
Turbine à gaz

La turbine à gaz utilisé dans cette centrale est la SGT-800 de SIEMENS, c'est une TAG à un seul arbre avec prise de mouvement avant, elle fonctionne principalement au gaz naturel.



Turbine à vapeur

La turbine à vapeur utilisé dans cette centrale est la SST-900 de SIEMENS, elle est composée de deux corps de détente (HP et MP/BP) et d'un module d'entrée et d'échappement normalisé.



Chaudière de récupération

La chaudière de récupération THERMAX (HRSG), est un élément essentiel dans les installations à cycle combiné, elle est le lien entre le cycle à gaz et le cycle eau-vapeur .



Aérocondenseur

Un système de réfrigération atmosphérique du type sec en mode direct avec un condenseurs de prévu dans la centrale.



Champ solaire

Deux champs de capteurs cylindro-paraboliques d'une surface de captage totale de 183120 m², seront placés sur deux îlots solaires, le premier prendra place au Nord du bloc de puissance et le deuxième au Sud.



Dans toute la centrale il y a 56 rangées de concentrateurs :

- 52 rangées de concentrateurs normaux (miroirs model LS-2) ;
- Et 4 rangées de grands concentrateurs (miroirs model LS-3).



CHAMP SOLAIRE

Superficie du champ solaire : 90ha

Type de collecteur (Luz LS-2 et Luz LS-3)

Nombre de rangé de collecteurs:

Luz LS-2 : 52 rangés

Luz LS-3 : 4 rangés

Longueur d'une rangé : 600m

Nombre total des collecteurs : **2688**

Superficie totale des collecteurs : 183120 m²



Récepteur solaire SCHOTT PTR70

C'est un tube de 4 mètres de long placé dans la ligne focale des miroirs. Il est isolé thermiquement par un vide contenu dans une gaine en verre.

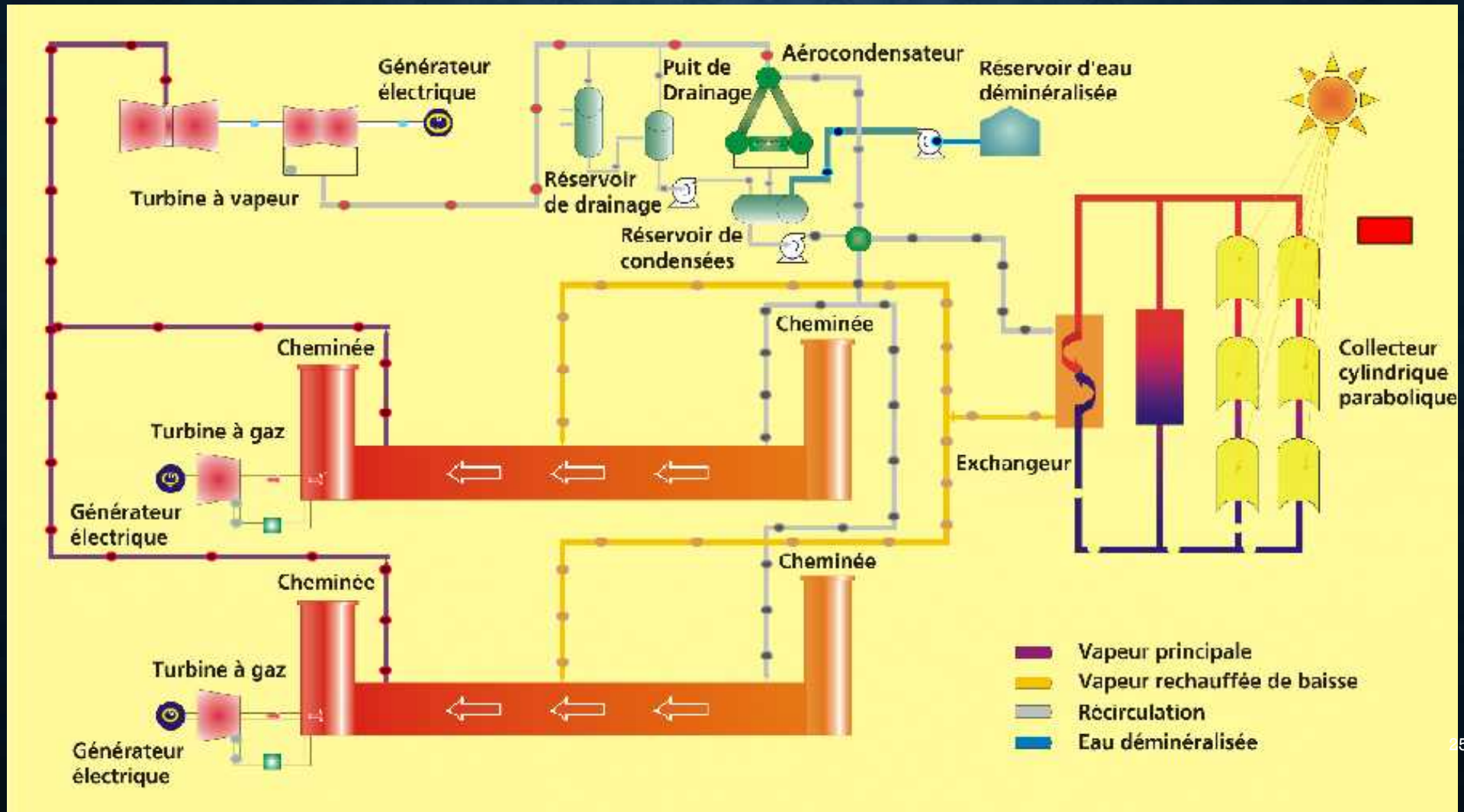


Fluide caloporteur (huile Therminol VP-1)

Le fluide de transfert (HTF) qui sera utilisé dans le circuit solaire est l'huile synthétique THERMINOL VP-1. Cette huile a été retenue pour sa conformité aux conditions requises :

- travailler à des températures proches de 400 °C à la sortie de l'îlot solaire.
- posséder une bonne stabilité thermique.
- Avoir un coût abordable.

FONCTIONNEMENT DE LA CENTRALE



CHAPITRE IV : SIMULATION DE LA CENTRALE SOLAIRE HASSI R'MEL

- Générer les données météorologiques à l'aide du logiciel METEONORM
- Intégration et exploitation des données dans SAM
- Introduction des paramètres et caractéristiques liés à la centrale
- Simulation
- Exploitation des résultats et interprétations

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par ans et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud.

Le solaire thermique constitue, le gisement d'avenir pour l'Algérie. La disponibilité de grands espaces au Sahara et une forte intensité solaire (2200 kW/m²/an) représente des atouts majeurs pour produire une énergie renouvelable, propre et durable en Algérie.

LE SOLAIRE À HASSI R'MEL

- Hassi R'mel est parmi les régions qui disposent d'un gisement solaire très important sur le territoire Algérien. La fraction d'insolation atteint fréquemment des valeurs qui dépassent les 75 %, tandis que l'irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal est de l'ordre de 6000 wh/m^2 en moyenne annuelle.

CHOIX DES JOURS TYPE PAR LE LOGICIEL METEONORME

- Du fait que le logiciel génère des données moyenne qui s'itèrent sur une période de 10 ans résumé sur une année, il est ni au moins nécessaire de prendre des dates témoins, afin de faciliter l'analyse des données.
- Le choix se porte sur les deux journées du solstice et de l'équinoxe.

Solstice : évènement astronomique ou la terre atteint son extrême méridional, en d'autre termes, le jours le plus court/long de l'année

21 Juin

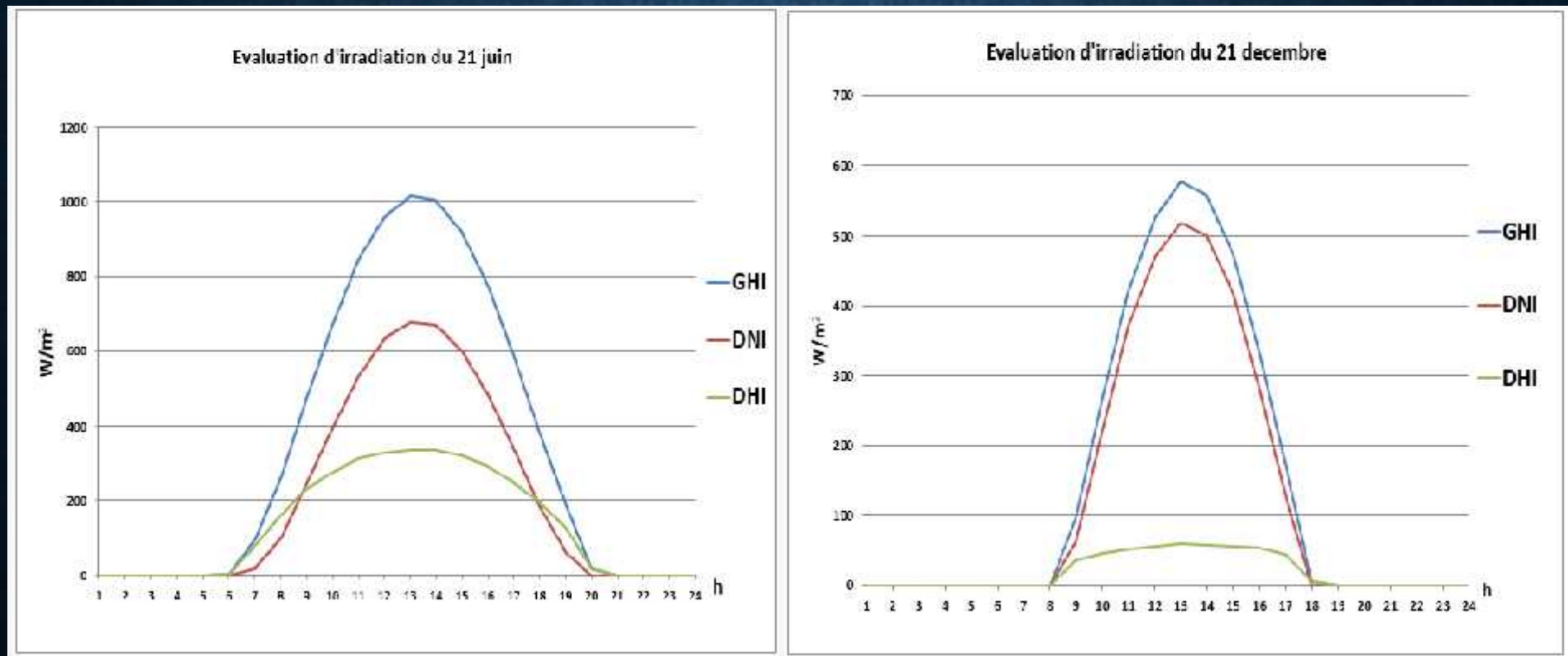
21 Décembre

Equinoxe : Instant de l'année où le Soleil traverse le plan équatorial terrestre, ce qui induit que la durée du jour et de la nuit sont égaux

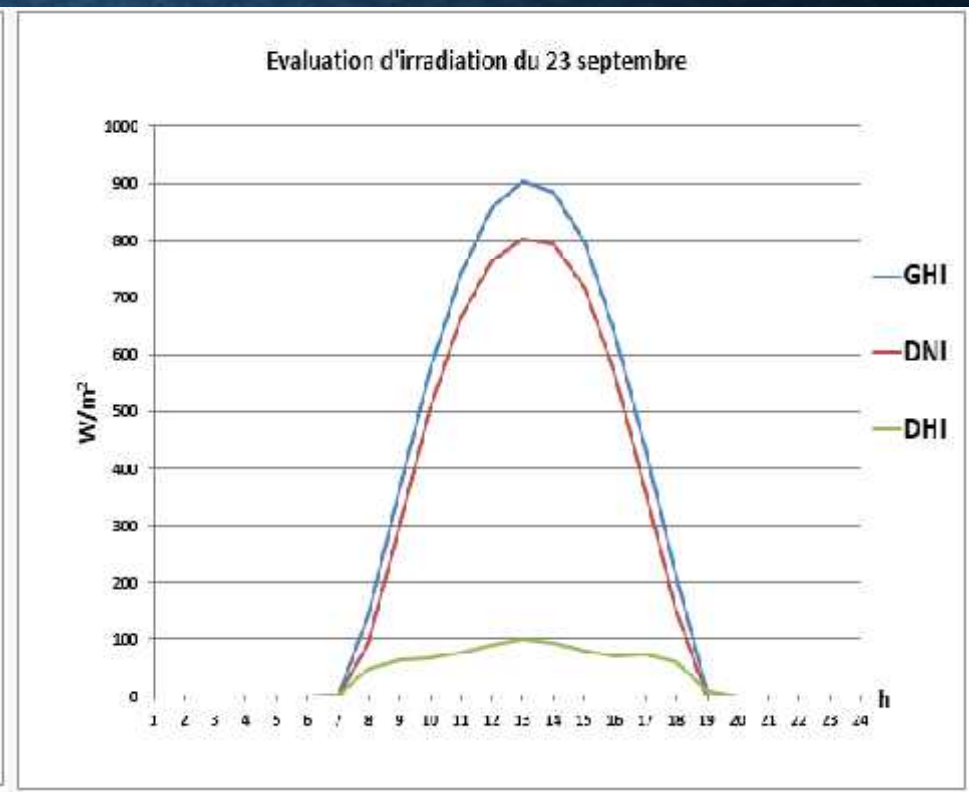
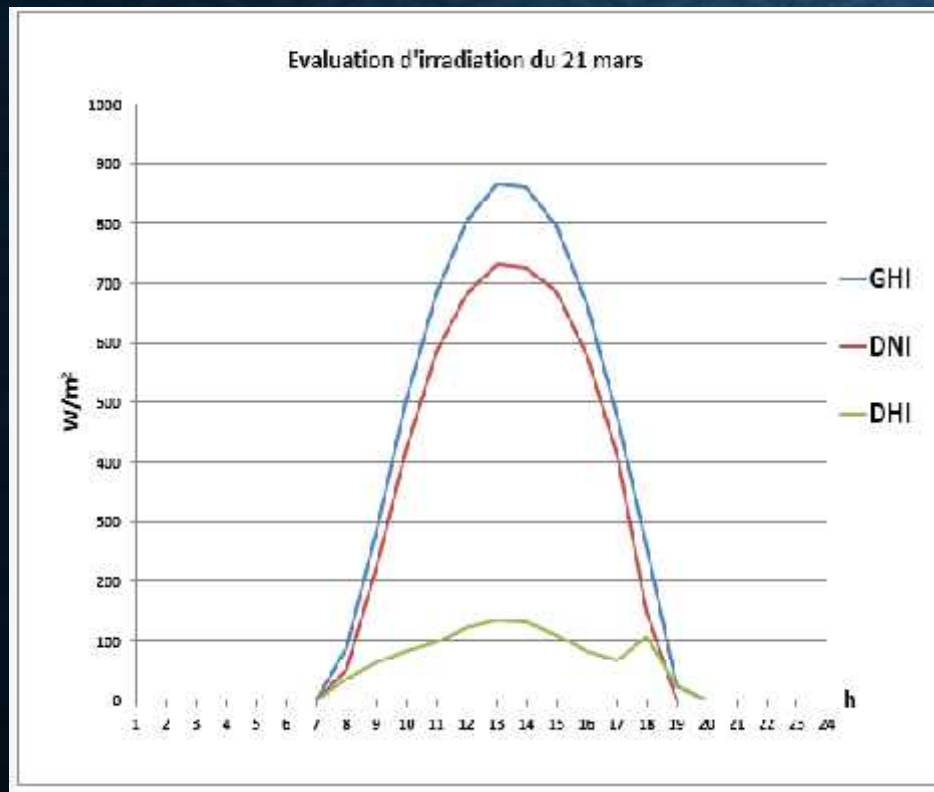
21 Mars

23 Septembre

EVOLUTION DE L'IRRADIATION AUX SOLSTICES

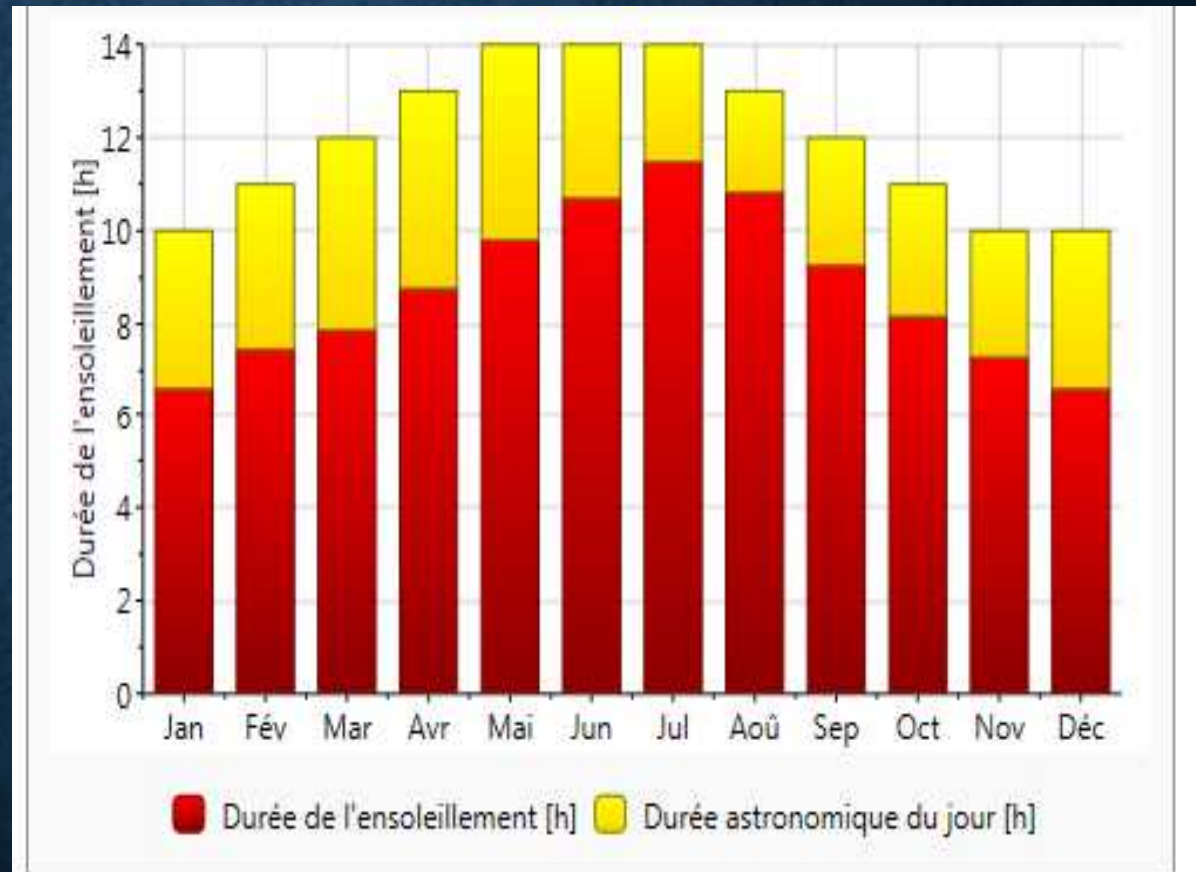


EVOLUTION DE L'IRRADIATION AUX EQUINOXES



DURÉE D'ENSOLEILLEMENT

La durée d'ensoleillement défile d'une période à une autre, les mois de Mai, Juin et Juillet sont nettement plus longs que les autres mois, en règle générale, plus la durée d'ensoleillement est grande, plus on pourrait récupérer plus d'énergie pour alimenter la turbine à vapeur



- Ensoleillement important (3000 h/an)

SIMULATION DE LA CENTRALE HASSI R'MEL PAR SAM

- SAM est un modèle technico-économique qui calcule les performances et les paramètres financiers des projets d'énergies renouvelables
- SAM simule la performance de l'énergie solaire photovoltaïque (PV), centrale solaire thermodynamique, du chauffe-eau solaire, de l'énergie éolienne, de la géothermie et de la biomasse
- SAM ne modélise pas les systèmes d'alimentation hors réseau ou les systèmes d'alimentations hybrides avec plus d'une source de production d'énergie

INTRODUCTION DES PARAMÈTRES DANS SAM

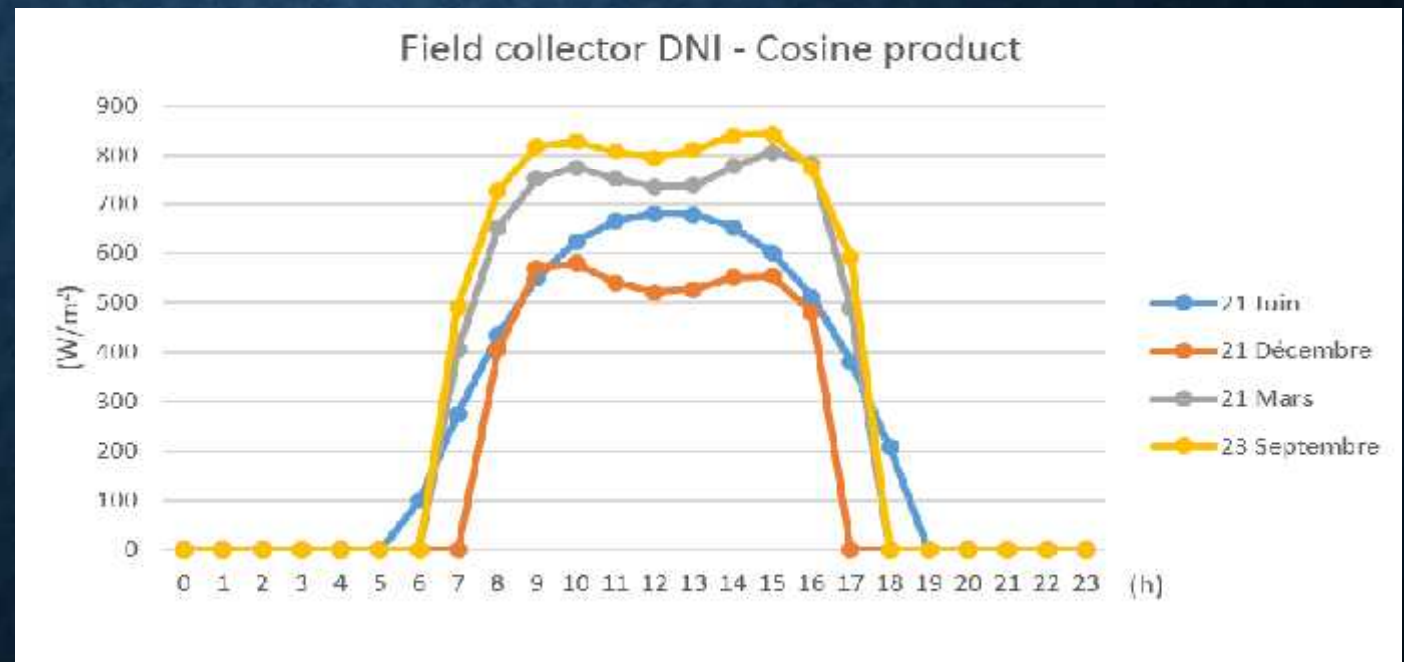
- Fichier .csv météorologique issu de METEONORM compatible avec SAM
- Capacité de production de la turbine à vapeur : 25MW
- Superficie utile du champ solaire : 183120m²
- Type du fluide caloporteur : Therminol VP-1
- Type de collecteurs cylindo-parabolique : Luz LS-2
- Type de receveur : Schott PTR70
- Cycle de la turbine à vapeur : cycle de Rankine
- Taux de dégradation : 4% par ans

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS :

DNI:

L'évolution de la capacité des collecteurs à capter les rayonnements solaire est particulièrement changeante selon les mois de l'année.

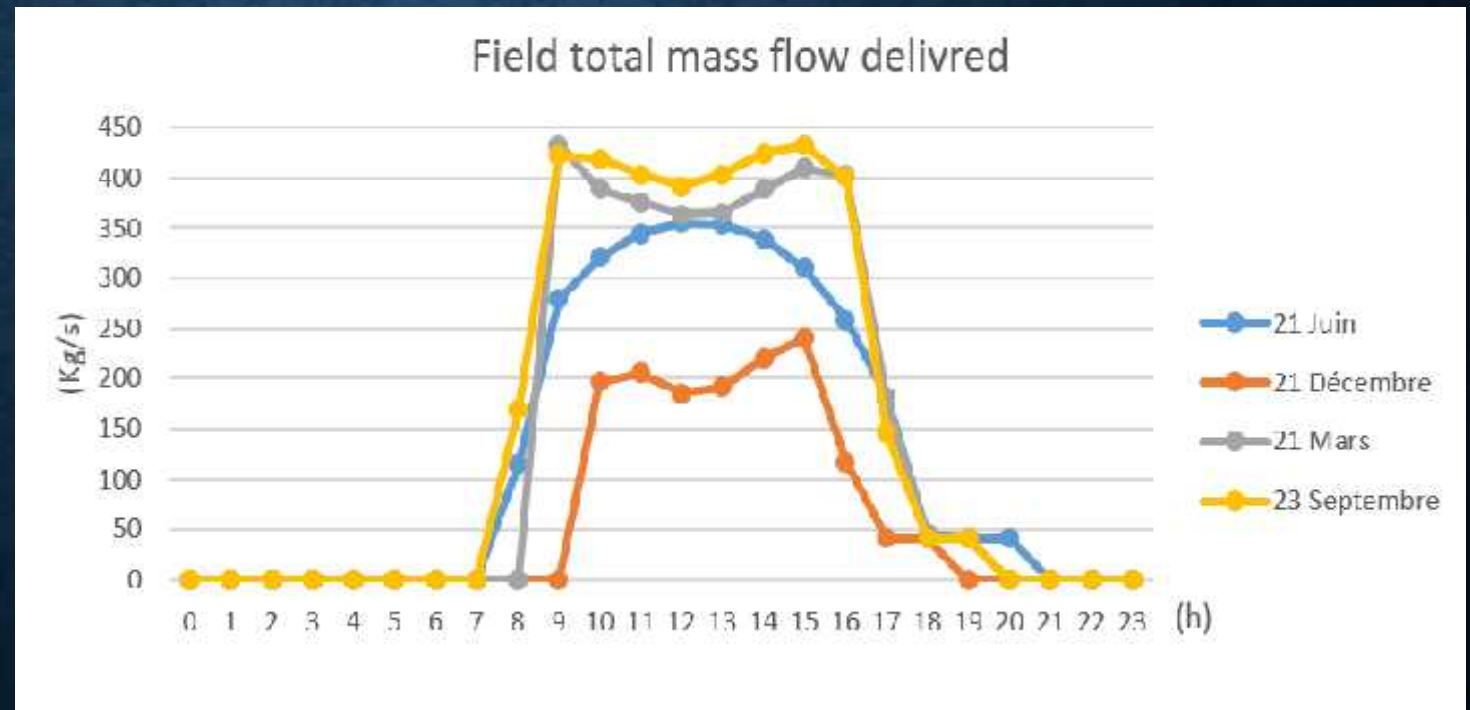
Pour les jours types, le 21 Mars et le 23 Septembre, on a, un captage d'autant plus grand, jusqu'à 840W/m^2 , contrairement au 21 Juin et 21 Décembre, une valeur crête de 680W/m^2



RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS :

- Débit :

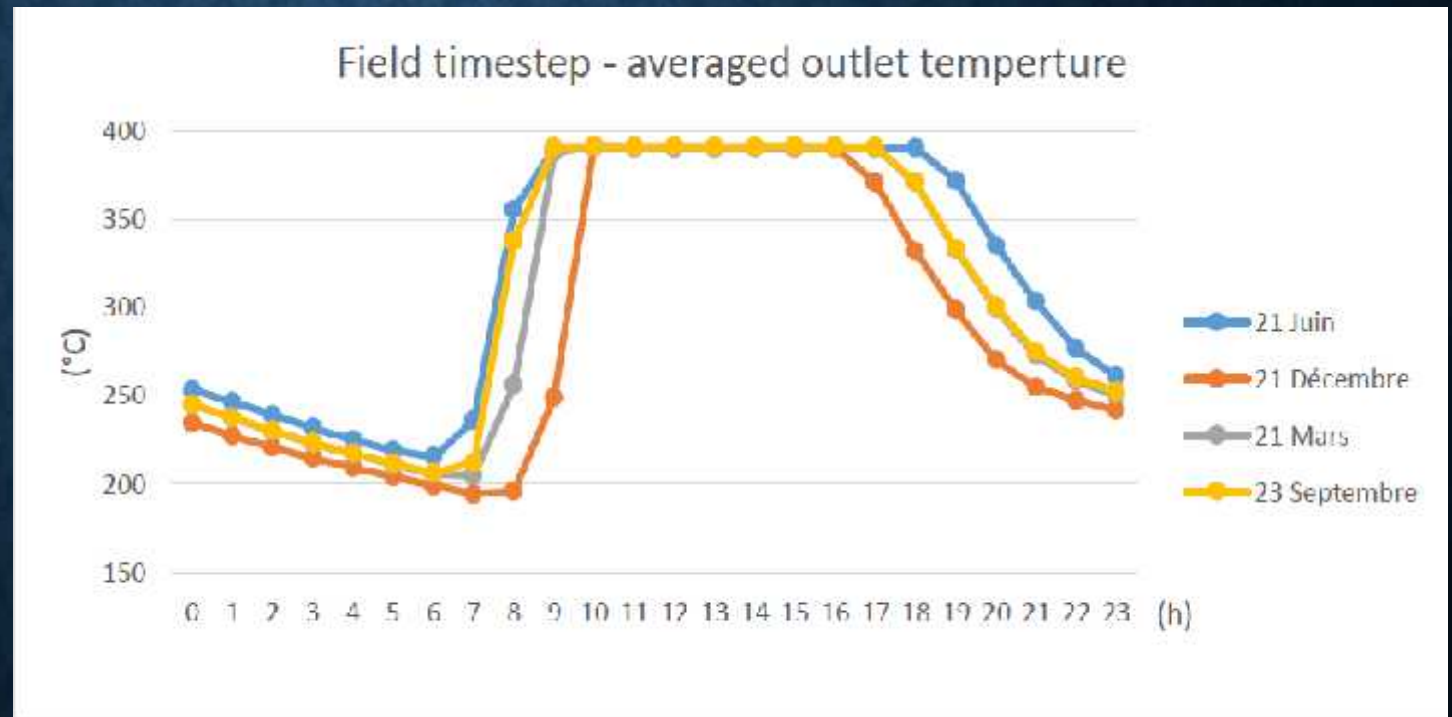
Le débit massique du fluide caloporteur délivré par le champ solaire dépend significativement selon les jours, pour nos journées types, on observe un fort débit le 21 Mars et 23 Septembre, une valeur crête de 430Kg/s est atteinte, un faible débit relative aux autres journées est observé le 21 Décembre avec une valeur maximale de 240Kg/s



RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS :

- **Température :**

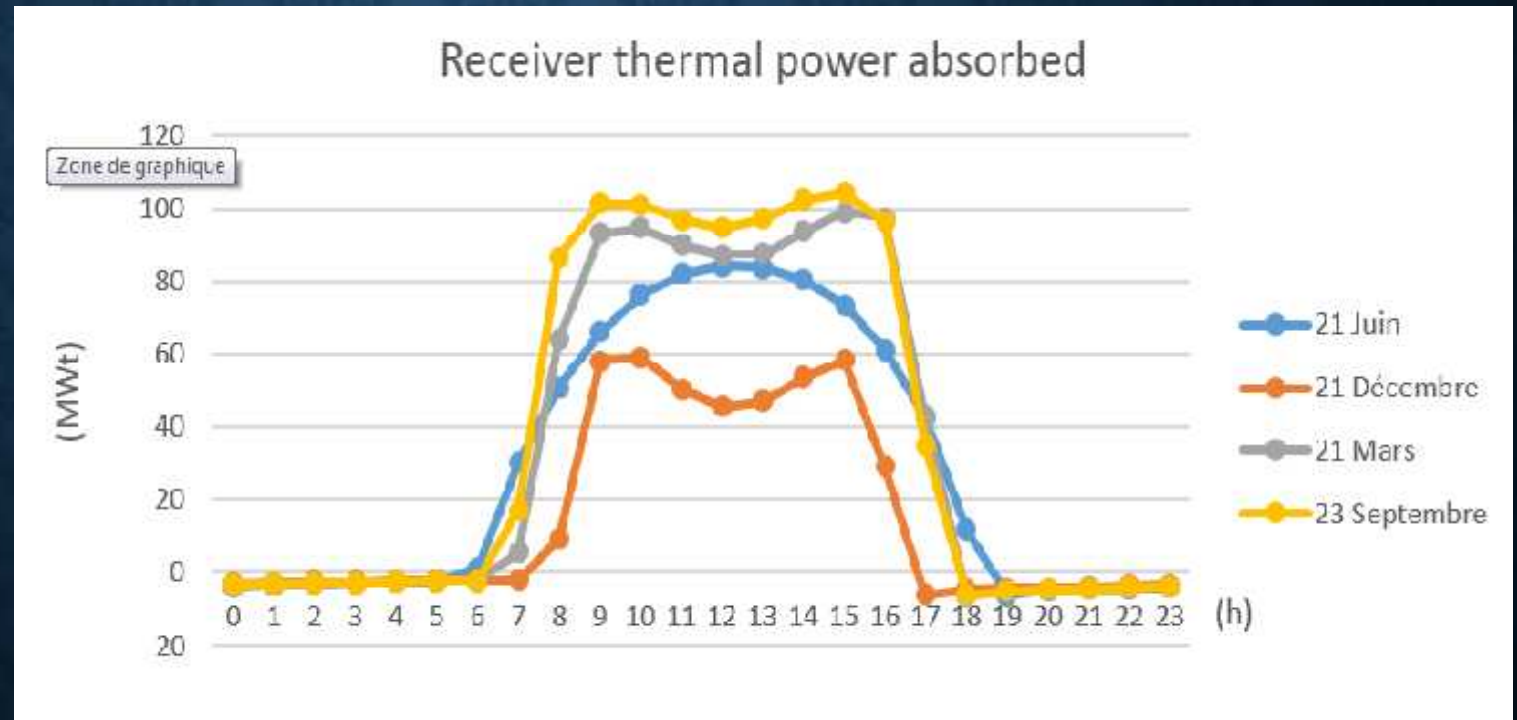
A la sortie de champ solaire une diminution de la température pendant la nuit de 250°C jusqu'à 200°C, en suite, une forte augmentation jusqu'à atteindre et se stabilise à 390°C, résultat de la collecte thermique des collecteurs, et en fin descendre progressivement au cours de la nuit



RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS :

- **Absorbeur :**

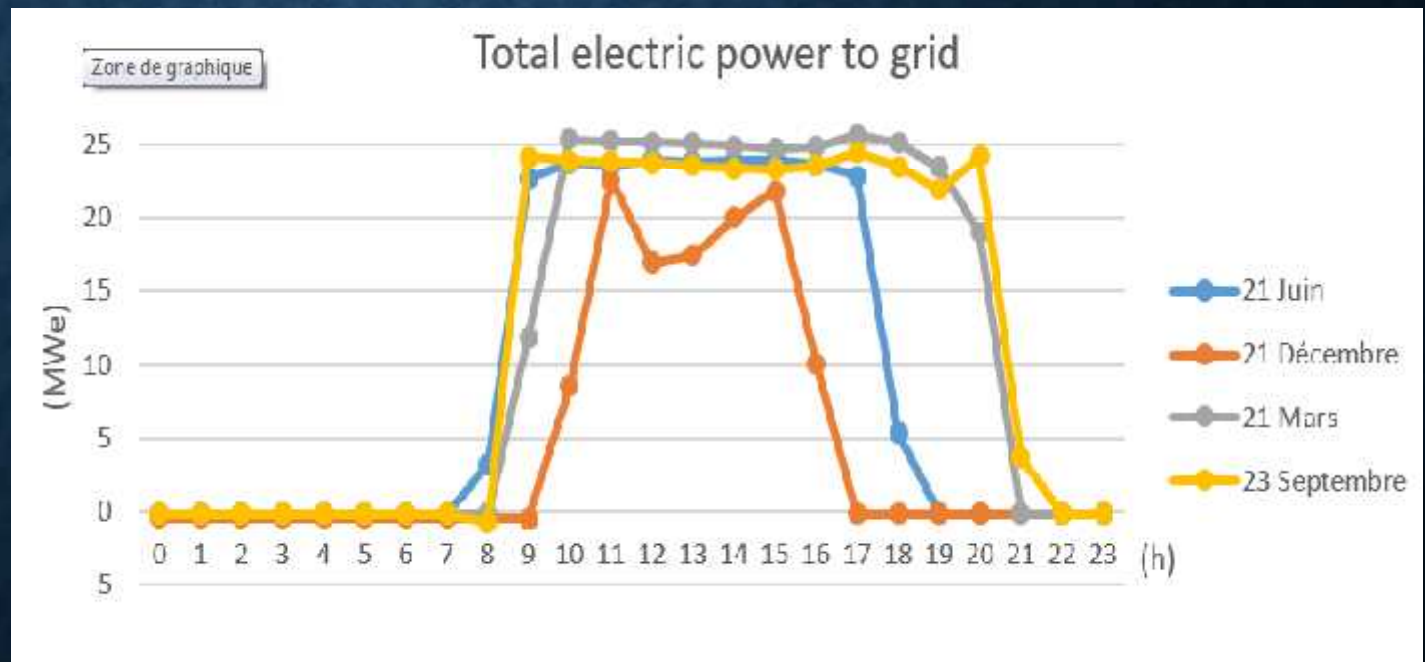
L'évolution de la puissance thermique absorbée dans l'absorbeur est typique, une forte absorption les jours avec un ensoleillement fort jusqu'à 105MWt, et une faible absorption les jours avec un ensoleillement faible



RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS :

- **Total de la puissance électrique fournie au réseau :**

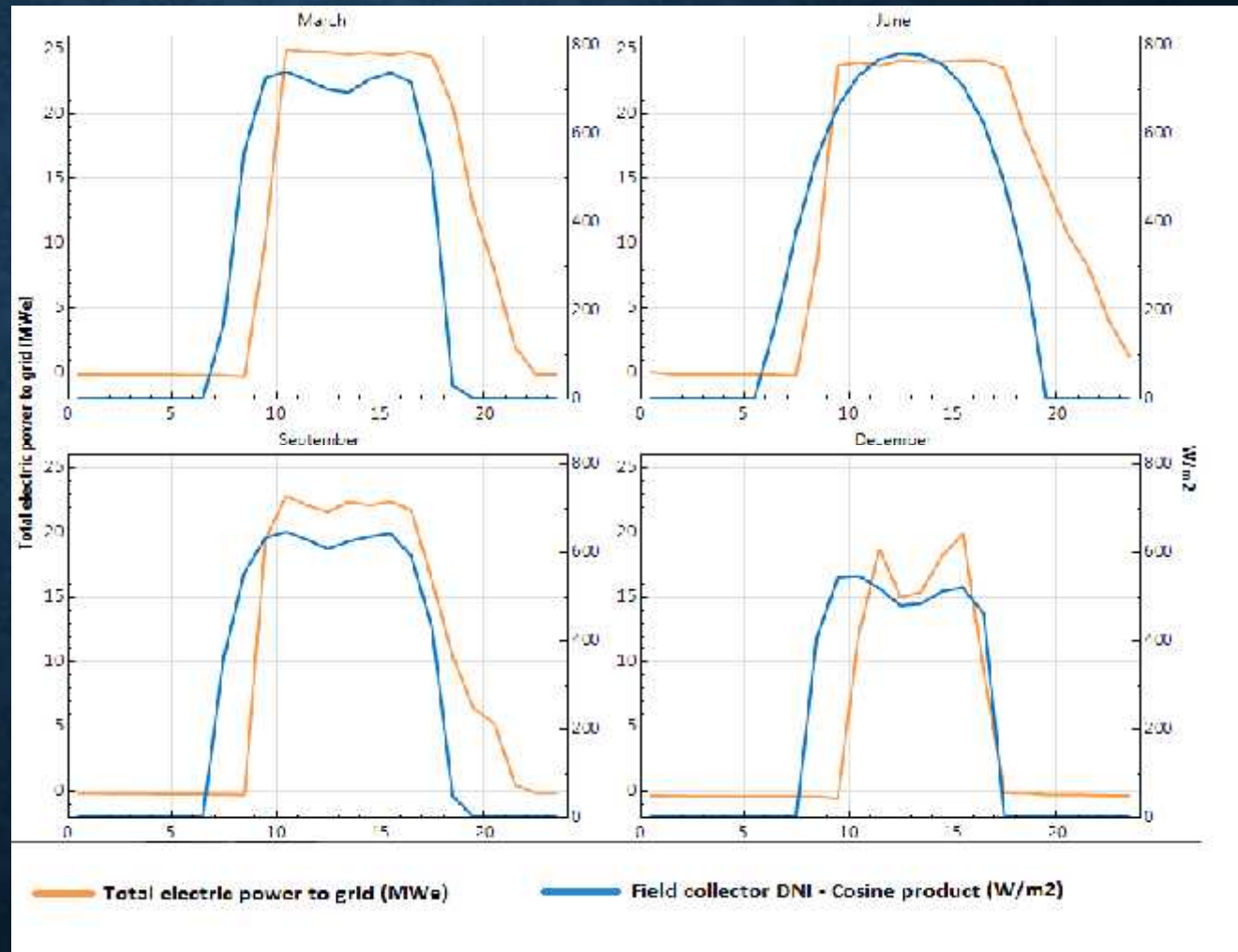
La puissance électrique totale délivrée au réseau et une donnée capitale pour une centrale électrique, cette dernière nous apprend en (MWe) la puissance générée par l'alternateur.



RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS :

- **Comparatif de la puissance électrique et du DNI capté :**

On remarque une corrélation presque parfaite entre la puissance électrique délivrée par l'alternateur avec le DNI collecté par le champ solaire, ce résultat signifie qu'il existe une relation étroite entre les deux



CONCLUSION GÉNÉRALE

- D'après l'étude que nous avons effectuée, nous pouvons retenir la conclusion suivante :
- Pour effectuer une simulation d'une centrale solaire, un dimensionnement est nécessaire et des données météorologiques fiables et précises sont indispensables
- Plusieurs facteurs rentrent en jeu afin d'optimiser le rendement de la centrale, le plus important est un DNI élevé

MERCI DE VOTRE ATTENTION.

