

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

# Projet de Fin d'Études

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

*En Génie Mécanique*

*Option Energétique*

## Thème

**ETUDE DES PERFORMANCES D'UN SYSTEME  
HYBRIDE SOLAIRE-GEOTHERMIQUE POUR LA  
PRODUCTION D'ELECTRICITE (HYSYS)**

**Les membres du jury :**

**Pr. A. LAOUIR**

**Dr. S. DJIMLI**

**Dr. N. ADERGHAL**

*Président*

*Encadrant*

*Examineur*

**Présenté par :**

• **BELGUET Merwan**

• **BENKINIOUAR Youcef**

**Promotion 2020**

# Remerciement

*Nos remerciements vont en premier à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a données pour terminer notre travail.*

*Nous remercions notre encadreur Monsieur DJIMLI SAMIR, pour avoir accepté de diriger ce mémoire et pour sa patience durant la période de l'encadrement.*

*Nous tenons à remercier tous les enseignants, qui sont à l'origine de la réussite de ce travail.*

*Nos sincères remerciements, les plus sincères sont destinés à nos très chères familles.*

# Dédicace

*Je dédie ce mémoire à tous ceux qui me sont chers:*

✓ *À ma très chère mère, qui ne cesse de m'encourager, de me*

*Soutenir pendant toute ma formation.*

✓ *À la mémoire de mon père.*

✓ *À mes sœurs et mon frère.*

✓ *À tout ma famille et proches*

*B.youcef*

# Dédicace

*Je dédie ce travail à mes chers parents qui m'ont  
Encouragé à donner le meilleur de moi-même, et qui  
m'ont fourni les moyens d'être ce que je suis  
aujourd'hui.*

*À toutes ma famille et mes chers amis  
À tout ce qui m'ont aidé de près ou de loin pour la  
réalisation de ce travail.*

*B.merwan*

## Liste des figures

Figure I.1 : Evolution de la production mondiale d'électricité par source 2016-2017 .....	3
Figure I.2 : irradiation solaire en Algérie .....	4
Figure I.3 : fonctionnement chauffe-eau solaire .....	8
Figure I.4: centrale À cycle combiné .....	8
Figure I.5 installation de panneaux photovoltaïques .....	9
Figure I.6: géothermie forage .....	10
Figure I.7: schéma d'une série agricole .....	11
Figure I.8: schéma production d'électricité par une source géothermique .....	11
Figure I.9: Centrale solaire à concentration d'Ivanpah.....	12
Figure I.10: centrale solaire maroc ouarzazate .....	13
Figure I.11: bâtiments éco énergétiques .....	13
Figure I.12: Tour PST10 en Espagne .....	14
Figure I.13 : centrale électrique de Salton Sea à Calipatria.....	14
Figure I.14 : Carte de l'énergie géothermique de l'Islande.....	15
Figure I.15 : Schéma de principe de la centrale géothermique.....	16
Figure I.16 : Schéma de principe de la centrale hybride solaire-géothermique.....	17
Figure II.1 : Schéma de la configuration de la centrale à cycle de Kalina pour l'énergie géothermique.....	21
Figure II.2: Comparaison des diagrammes T-s des cycles de Rankine et Kalina.....	21
Figure II.3: diagramme T-s du cycle Carnot.....	22
Figure II.4 : Les températures moyennes d'ajout et de rejet de chaleur du cycle Kalina et Rankine.....	23
Figure II.5 : diagramme de changement de phase du mélange NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O.....	24
Figure II.6 : Interface HYSYS.....	27
Figure II.7 : Composants du mélange.....	27
Figure II.8 : Model thermodynamique.....	28
Figure II.9 : Interface équipements. ....	28
Figure II.10 : Palette des différents équipements.....	29
Figure II.11 : Fenêtre des paramètres de compresseur.....	29
Figure II.12 : Cycle des différents équipements.....	30
Figure II.13 : Paramètres de la pompe.....	30

Figure II.14 : Paramètres de la turbine.....	31
Figure II.15 : Paramètres du séparateur.....	32
Figure II.16 : Paramètres de l'échangeur de chaleur.....	32
Figure II.17 : Paramètres de mixeur.....	33
Figure III.1 : Schéma du Cycle.....	35
Figure III.2 : Position de la Pression $P_2$ .....	37
Figure III.3 : Effet de la pression à l'entre de l'échangeur sur le rendement.....	37
Figure III.4 : Position de la pression $P_7$ .....	38
Figure III.5: Effet de la pression $P_7$ sur le rendement.....	39
Figure III.6 : Position de modification de la concentration $NH_3$ .....	40
Figure III.7 : Effet de concentration de l' $NH_3$ sur les puissances des turbines .....	41
Figure III.8: Effet de concentration de l' $NH_3$ sur la puissance nette et le rendement .....	42
Figure III.9: Position de modification de l'enseillement .....	44
Figure III.10: Effet l'enseillement sur le rendement thermique pour plusieurs valeurs de $P_2$ .....	45
Figure III.11 : Effet l'enseillement sur le rendement thermique pour plusieurs valeurs de $P_7$ .....	45
Figure III.12: Effet l'enseillement sur le rendement thermique pour plusieurs valeurs de concentrations .....	46

## Liste des Tableaux

Tableau III.1 : Les paramètres fixés .....	36
Tableau III.2 : Résultat de la simulation pour $P_2 = 5$ bar et $P_7 = 100$ bar .....	39
Tableau III.3 : Résultat des paramètres de performance pour $P_2 = 5$ bar et $P_7 = 100$ bar ....	40
Tableau III.4 : Résultat de la simulation pour $x = 17\%$ .....	43
Tableau III.5 : Résultat de calcule des paramètres de performance pour $x = 17\%$ .....	43
Tableau III.6 : Quantité de Chaleur .....	44
Tableau III.7 : Résultat de la simulation pour $DNI = 500$ W/m <sup>2</sup> .....	47
Tableau III.8 : Résultat de calcule des paramètres de performance si $DNI = 500$ W/m <sup>2</sup> .....	47
Tableau III.9 : Résultat de la simulation pour $DNI = 1000$ W/m <sup>2</sup> .....	48
Tableau III.10 : Résultat de calcule des paramètres de performance si $DNI = 1000$ W/m <sup>2</sup> ....	48

## Nomenclature

$\dot{m}$  : Débit massique [kg/s]

$T_i$  : Température dans l'état  $i$  [°K]

$P_i$  : Pression dans l'état  $i$  [Pa]

$h$  : Enthalpie [kJ/kg]

$s$  : Entropie [kJ/kg. K]

$x$  : Concentration de l'ammoniac [%]

$DNI$  : Ensoleillement direct incident [W/m<sup>2</sup>]

$A_{sol}$  : Surface du champ solaire

$\dot{Q}_c$  : Quantité de chaleur reçue [W]

$\dot{Q}_{sol}$  : Quantité de chaleur solaire [W]

$\dot{Q}_{géo}$  : Quantité de chaleur géothermique [W]

$\dot{W}_p$  : Puissance consommé par la pompe [W]

$\dot{W}_t$  : Puissance produit par la turbine [W]

$\dot{W}_{net}$  : Puissance nette [W]

$\eta_{optique}$  : Rendement optique des capteurs solaires

$\eta_{thermique\ sol}$  : Rendement thermique des capteurs solaires

$\eta_{th}$  : Rendement thermique du cycle

## Sommaire

Remerciement.

Dédicaces.

Liste des figures ..... I

Liste des tableaux ..... II

Nomenclature ..... III

Introduction générale ..... 1

### Chapitre I : Revue bibliographique

I.1 Introduction ..... 3

I.2 L'énergie solaire en Algérie ..... 4

I.3 L'énergie géothermique en Algérie ..... 6

I.4 Les différents modes d'utilisation de l'énergie solaire et géothermique ..... 7

    I.4.1 Solaire ..... 7

        I.4.1.a Chauffage et désinfection de l'eau ..... 7

        I.4.1.b Production d'électricité ..... 8

        I.4.1.c Chauffage domestique ..... 9

    I.4.2 Géothermique ..... 10

        I.4.2.a L'usage domestique ..... 10

        I.4.2.b L'usage agricole ..... 10

        I.4.2.c La production d'électricité ..... 11

I.5 Les projets d'énergie renouvelable ..... 12

    I.5.1 Projet Ivanpah ..... 12

    I.5.2 Projet Ouarzazate au Maroc ..... 12

I.5.3	Panneaux photovoltaïques à Berlin .....	13
I.5.4	Tour PST10 en Espagne .....	14
I.5.5	Énergie souterraine .....	14
I.5.6	La chaleur des volcans en Islande .....	15
I.6	Recherche bibliographique .....	16
<b>CHAPITRE II : Modèle mathématique et présentation du HYSYS</b>		
II.1	Introduction .....	20
II.2	Modèle mathématique .....	20
II.2.1	Le cycle de Kalina .....	20
II.2.2	Les hypothèses .....	24
II.2.3	Les équations mathématique .....	24
II.3	Présentation du logiciel HYSYS .....	26
II.4	Modélisation sur HYSYS .....	26
II.4.1	Procédures de simulation par HYSYS .....	27
II.4.2	Les différents composants du cycle .....	30
II.4.2.a	Pompe .....	30
II.4.2.b	Turbine .....	31
II.4.2.c	Séparateur .....	31
II.4.2.d	Échangeur de chaleur .....	32
II.4.2.e	Mixe .....	33
<b>CHAPITRE III : Résultats et discussions</b>		
III.1	Description du processus .....	35
III.2	Etude de l'influence des paramètres .....	36

III.2.1 Effet de la pression à l'entrée de l'échangeur géothermique ( $P_2$ ) .....	37
III.2.2 Effet de la pression à l'entrée du capteur solaire ( $P_7$ ) .....	38
III.2.3 Effet de la concentration de l'ammoniac .....	40
III.2.4 Effet de l'ensoleillement direct incident (DNI) .....	44
Conclusion générale .....	50
Recherche bibliographique.	

## Résumé

L'objectif de notre travail est de simuler d'une centrale hybride solaire géothermique basée sur le cycle Kalina utilise l'eau-ammoniac comme un fluide de travail et d'étudier l'effet de plusieurs paramètres (pression, concentration d'ammoniac et l'ensoleillement direct incident) sur les performances de ce cycle à l'aide de l'outil HYSYS. Les résultats montrent que l'augmentation de la pression avant l'échangeur géothermique, concentration élevée d'ammoniac et de l'ensoleillement direct incident influé positivement sur le rendement thermique de la centrale, par contre l'accroissement de la pression avant le champ solaire peut engendrer une dégradation du rendement thermique.

**Mots clés :** Centrale solaire-géothermique, Cycle Kalina, HYSYS.

## Abstract

The objective of our study is to simulate a solar-geothermal hybrid plant based on the Kalina cycle uses water-ammonia as a working fluid and to study the effect of several parameters (pressure, concentration of ammonia and incident direct sunlight) on the performance of this cycle using the HYSYS tool. The results show that the increase in pressure before the geothermal exchanger, high concentration of ammonia and incident direct sunlight positively influenced the thermal efficiency of the plant, on the other hand the increase in pressure before the solar field. Can lead to a degradation of thermal efficiency.

**Keywords :** Solar-geothermal power station, Kalina Cycle, HYSYS.

## المخلص

الهدف من دراستنا هو محاكاة محطة طاقة هجينة تعمل بالطاقة الشمسية والحرارية الأرضية تعتمد في عملها على دورة Kalina والتي تستعمل خليط الماء و الأمونيا كسائل عمل و دراسة تأثير مختلف العوامل ( الضغط ، تركيز الأمونيا في سائل العمل و الإشعاع الشمسي المباشر) على أداء هذه الدورة باستخدام برنامج HYSYS. بينت النتائج أن زيادة الضغط قبل المبادل الحراري الأرضي ، وارتفاع تركيز الأمونيا ، ووقع أشعة الشمس المباشرة أثرت بشكل إيجابي على الكفاءة الحرارية للمصنع ، ومن ناحية أخرى زيادة الضغط قبل المجال الشمسي. يمكن أن يؤدي إلى تدهور الكفاءة الحرارية.

**الكلمات المفتاحية :** محطة هجينة شمسية- حرارية أرضية، دورة Kalina ، HYSYS .

# **Introduction Générale**

## **Introduction générale**

La grande majorité de l'énergie mondiale provient de ressources non renouvelables qui sont le pétrole, le charbon et le gaz .Il est prévu qu'il y aura une augmentation significative de la demande d'énergie dans les années à venir en raison de la croissance démographique et du développement économique . Par conséquent, la plupart des pays du monde y compris l'Algérie être l'un des plus grands pays au monde en termes de superficie, recourent à se concentrer sur l'utilisation de plus d'énergie avec des ressources renouvelables, parmi les plus importantes de ces énergies, nous mentionnons l'énergie géothermique et l'énergie solaire.

Ces deux derniers sont utilisés dans les cycles de production d'énergie tels que le cycle de Rankine organique et le cycle de Kalina. Dans cette étude, nous concentrerons sur le cycle de Kalina, car des études précédentes ont confirmé qu'il est meilleur que le cycle de Rankine organique, parce que dans le cycle de Kalina l'ajout de chaleur et le rejet de chaleur se produisent à des températures variables même pendant le changement de phase, puisque le fluide est un mélange. Mais à Rankine, l'addition de chaleur et le rejet de chaleur se produisent à température uniforme (isotherme) pendant le changement de phase. C'est la seule chose qui fait toute la différence dans les performances du cycle Kalina.

Nous avons mené cette étude afin de déterminer les performances et le rendement thermique le plus élevé d'une centrale hybride solaire-géothermique pour la production d'électricité, cette centrale utilise le cycle Kalina. Notre travail est divisé en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur l'utilisation mondiale de l'énergie solaire et l'énergie géothermique, ainsi que les plus grands projets exploitant ces ressources au monde et en l'Algérie.

La modélisation mathématique du problème, plus une description du cycle Kalina et une présentation de logiciel HYSYS utilisé sont présentées dans le deuxième chapitre

Le dernier chapitre est réservé à la présentation des résultats obtenus, concernant les effets des différents paramètres (pression, température..) sur le rendement thermique et les performances du cycle. Une conclusion générale et quelques perspectives complètent le travail.

# **CHAPITRE I**

## **Revue Bibliographique**

## I.1 Introduction

La consommation d'énergie sous toutes les formes à travers le monde, notamment les énergies fossiles, a atteint son maximum [1]. Cette augmentation de la consommation de l'énergie est due principalement à la croissance démographique. Selon les experts, les échanges internationaux en énergie fossile occupent la part de lion par rapport à l'ensemble des autres échanges, face à la demande de plus en plus croissante des énergies fossiles. En plus de ce principal caractère non renouvelable de l'énergie fossile, son extraction, transport et utilisation engendrent beaucoup de problèmes principalement sur l'environnement et donc, sur l'écosystème.

Actuellement, le problème inhérent à l'utilisation des énergies non renouvelables, c'est leur disponibilité en quantité limitée et leurs effets nuisibles sur le plan environnemental, ce qui a forcé l'homme à rechercher des nouvelles sources d'énergie.

Ces sources sont inépuisables et elles sont également peu ou pas polluantes, l'énergie solaire, éolienne, géothermique ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie. Elles présentent aujourd'hui 25 % environ de la production mondiale de l'énergie (figure I.1).

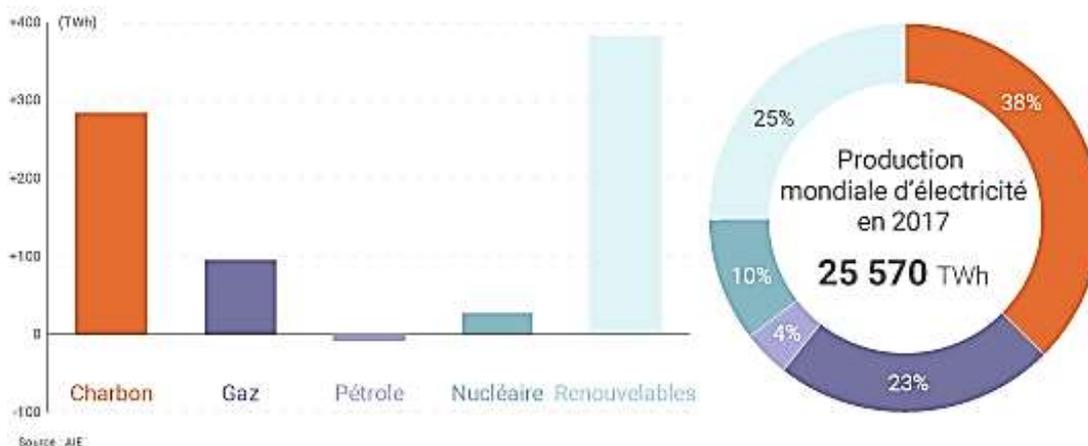


Figure I.1: Evolution de la production mondiale d'électricité par source 2016-2017 [2]

Concernant l'Algérie, Ces dernières années, "l'énergie pénétrante" (pétrole et gaz) à causé de graves dommages à l'environnement [3], en particulier en termes d'émissions de gaz qui ont conduit à la pollution de l'air et de la mer. Il s'agit également d'une énergie non

renouvelable qui prend des milliers d'années à se régénérer et est en passe d'influencer. C'est ce qui a conduit à d'autres méthodes et à d'autres réflexions. Propositions alternatives, dont la plus importante repose sur les énergies renouvelables alternatives, représentées par l'énergie solaire et éolienne.

Dans ce chapitre, nous présentons deux ces sources, à savoir l'énergie solaire et l'énergie géothermique. Nous exposons la méthode d'exploitation de l'énergie solaire et de l'énergie géothermie en Algérie en particulier et dans le monde en général, aussi nous aborderons également les grands projets les plus importants au monde dédiés à l'exploitation des sources d'énergie mentionnées précédemment.

## I.2 L'énergie solaire en Algérie

L'Algérie a une superficie d'environ 2,38 millions de kilomètres carrés, ce qui en fait le plus grand pays africain et le dixième au monde en termes de superficie. Le désert représente environ 80% de la superficie totale. De plus, le pays dispose d'un énorme potentiel dans le domaine de l'énergie solaire, car l'ensoleillement sur les terres algériennes dépasse 2000 heures par an pour atteindre 3000 heures par an, ce qui en fait un énorme réservoir d'énergie solaire (figure I.2), il représente le plus grand champ d'énergie solaire du bassin méditerranéen. Si elle était exploitée, elle lui permettrait de produire plus de 169 400 TWh/heure, soit 5 000 fois la consommation nationale annuelle d'électricité [4].

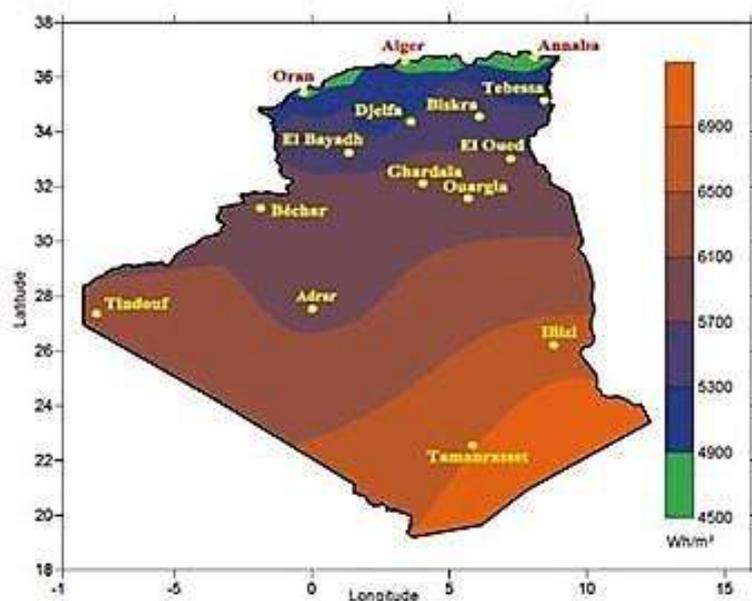


Figure. I.2: Irradiation solaire en Algérie [5]

Parmi les projets vers lesquels l'Algérie s'est tournée dans le domaine des énergies renouvelables, ou plutôt de l'énergie solaire : Desertec ou Desertec est un projet d'énergie solaire en Afrique du Nord proposé par la Desertec Corporation du Club de Rome, où le coût d'investissement dépasse 400 milliards d'euros, et dépend de l'énergie solaire thermique, à condition que l'électricité produite à partir de ce projet soit exportée vers l'Europe car les pays d'Afrique du Nord en bénéficient [6].

En juillet 2013, la société à but non lucratif Desertec Corporation s'est séparée des dix-neuf autres (19) autres partenaires de l'initiative industrielle, affirmant qu'elle n'était "plus à l'aise avec les objectifs commerciaux exprimés par les parties participantes" dans le projet.

Le projet comprend la construction d'un immense réseau de miroirs connectés pour convertir les rayons du soleil en énergie thermique qui chauffe une huile spéciale utilisée dans le fonctionnement des turbines à vapeur pour produire de l'électricité. L'électricité sera ensuite transférée vers l'Europe via la ligne à haute pression qui existe actuellement entre elle et l'Afrique du Nord. Le projet pourrait fournir environ 15% des besoins en électricité du continent.

Mais le projet n'a pas été couronné de succès car le gouvernement précédent le jugeait inutile. En effet, il doit des études importantes dans le cadre de ce projet, comme l'exploitation des eaux souterraines pour refroidir ces stations, le transfert de technologie et le lieu de fabrication des appareils et des systèmes qui participent à l'installation de ces stations en plus de la façon de transférer l'énergie pour cette raison.

Ce projet est l'un des plus grands projets auxquels l'Algérie pourrait revenir à l'avenir, mais il existe actuellement de nombreux petits projets parmi eux :

Quant au Centre de développement des énergies renouvelables, il a annoncé deux projets :

Projet 1: Conception et construction d'un système de refroidissement par air avec un système d'extrudeuse [7]

La production de froid, notamment dans les pays chauds comme l'Algérie, apparaît comme un enjeu énergétique majeur de notre siècle. Au cours de la dernière décennie, la consommation d'énergie, en particulier en été, a augmenté en raison de l'installation accrue d'équipements de réfrigération. Les systèmes de refroidissement reposent actuellement principalement sur des processus de compression de vapeur. Il s'agit de systèmes très

énergivores en raison d'une utilisation intensive et est le principal responsable du pic de consommation d'électricité enregistré en été.

La source d'énergie thermique proviendra du concentrateur solaire. La capacité de refroidissement sera d'environ 1,5 kW.

Projet 2: Etude, conception et construction d'un séchoir solaire continu pour petites exploitations. [8]

La sécurité alimentaire est un pari stratégique majeur pour l'Algérie. Souvent, les systèmes de culture actuels produisent un excédent saisonnier qui entraîne des difficultés de commercialisation des produits entraînant des pertes importantes. L'une des façons de résoudre ce problème est de s'appuyer sur la technologie de séchage. Le séchage des produits agricoles est un processus qui assure la stabilité et la transformation des produits agricoles.

Le projet est la conception et la mise en œuvre d'un séchoir solaire indirect qui fonctionne en continu. Pour compléter le modèle, un capteur d'eau et d'air combiné a été utilisé avec le dispositif de stockage de chaleur. Le système doit permettre la mise en place de conditions idéales pour le stockage d'un produit conservé. Dans ce contexte, il existe une étude préalable sur les produits agricoles séchés liés à leurs caractéristiques et à leur maturité liée au processus de séchage. Le but du projet est de réaliser un séchoir solaire pouvant répondre aux besoins d'une petite ferme et sécher le surplus saisonnier de produits agricoles pour une meilleure évaluation, créer un protocole qui inclut toutes les récoltes et la transformation du produit jusqu'à l'emballage et le séchage afin de fournir une bonne qualité, similaire à son état frais.

### **I.3 L'énergie géothermique en Algérie**

La géothermie ou la chaleur de la terre est un potentiel énergétique non exploité par l'Algérie. La géothermie se présente sous forme de réservoirs de vapeur, d'eaux chaudes ou de roches chaudes, destinée à différents emplois.

Il existe à travers le monde deux types principaux de géothermie:

- La géothermie basse énergie : le réservoir géothermique est à une température modérée (30 °C-150 °C), cette ressource est exploitée pour de la production de chaleur distribuée par un réseau de chaleur. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres.

- la géothermie haute énergie : la température du réservoir géothermique est plus élevée (supérieur à 150 °C), Elle est destinée principalement à la production d'électricité.

En Algérie, les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien, Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées et elles sont réparties à travers tout le territoire Nord algérien, majoritaires au Nord-est. Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66 °C) à Mascara [9].

## **I.4 Les différents modes d'utilisation de l'énergie solaire et géothermique**

### **I.4.1 Solaire**

Il y a trois familles de procédés de transformation de l'énergie solaire se distinguent aujourd'hui:

#### **I.4.1.a Chauffage et désinfection de l'eau [10]**

L' énergie solaire est utilisée pour chauffer l'eau à travers le chauffage solaire, qui est une méthode de fonctionnement plus propre et moins chère que les poêles qui étaient utilisés à cette fin, qui dépendaient de la combustion de bois ou de charbon, malgré le faible coût du pétrole et du gaz naturel au début du XXe siècle, et l'asile de certains pays. Pour remplacer les chauffe-eau solaires par eux, cependant, certains autres pays tels que l'Australie et l'Espagne demandent toujours leur utilisation dans toute nouvelle construction, d'ailleurs, près de 28 pays en développement utilisent l'énergie solaire pour purifier l'eau pour la rendre potable chaque jour, en remplissant l'eau Bouteilles en plastique puis exposées au soleil pendant plusieurs heures (figure I.3).

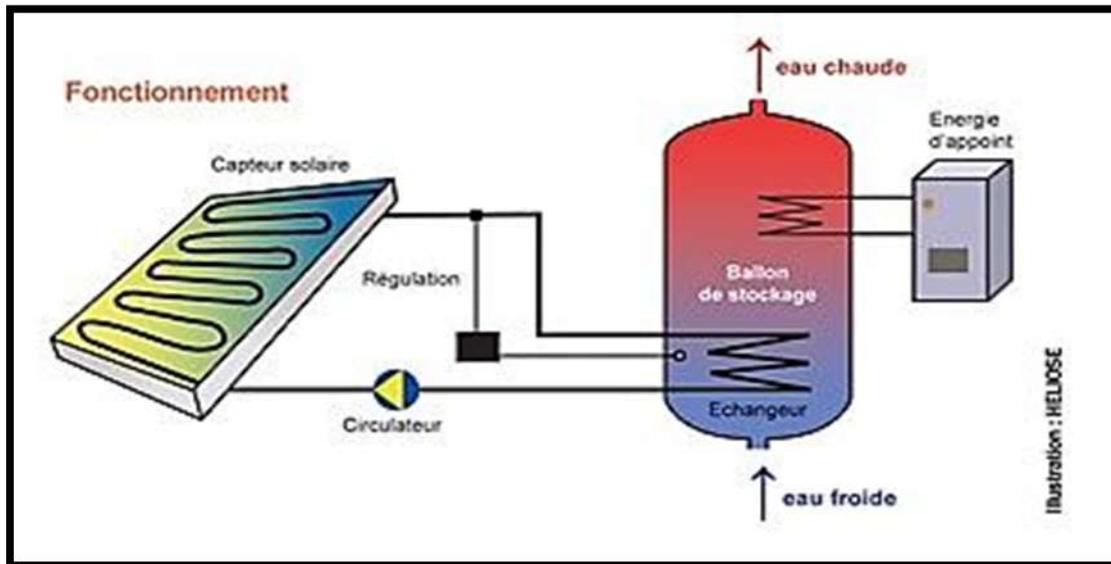


Figure I.3: Fonctionnement chauffe-eau solaire [11]

#### I.4.1.b Production d'électricité [12]

De nombreuses usines utilisent la chaleur du soleil pour générer de l'énergie électrique comme source abondante d'énergie renouvelable. Ce processus est basé sur l'utilisation de miroirs de suivi du soleil qui réfléchissent leurs rayons vers un point central au sommet d'une tour qui contient des tubes contenant un liquide qui absorbe la chaleur. Ce fluide est ensuite pompé lorsqu'il devient chaud dans un générateur qui le convertit en vapeur, et cette vapeur produite entraîne une turbine chargée de produire de l'électricité (Figure I.4).

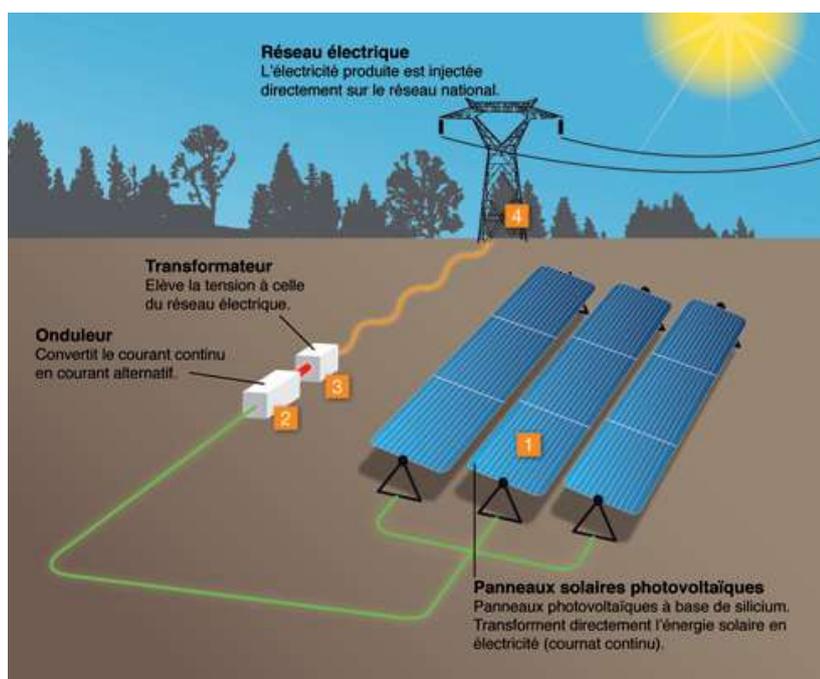


Figure I.4: schéma de centrale solaire [13]

### I.4.1.c Chauffage domestique [14]

L'énergie solaire peut être utilisée pour chauffer les pièces et les maisons, et cela peut être illustré par le modèle (la chambre solaire), dans ce modèle, la salle de verre permet à la lumière du soleil de passer dedans pendant la journée grâce à la fonction de verre transparent collectant ces rayons; Pour obtenir du chauffage pour la pièce et pour continuer à obtenir du chauffage dans la période après le coucher du soleil, il est possible d'ajouter des plantes et des roches dans la pièce comme une sorte de décoration, car ces roches seront utilisées en ce sens qu'elles emmagasineront la chaleur et en profiteront ensuite après le coucher du soleil (figure I. 5).

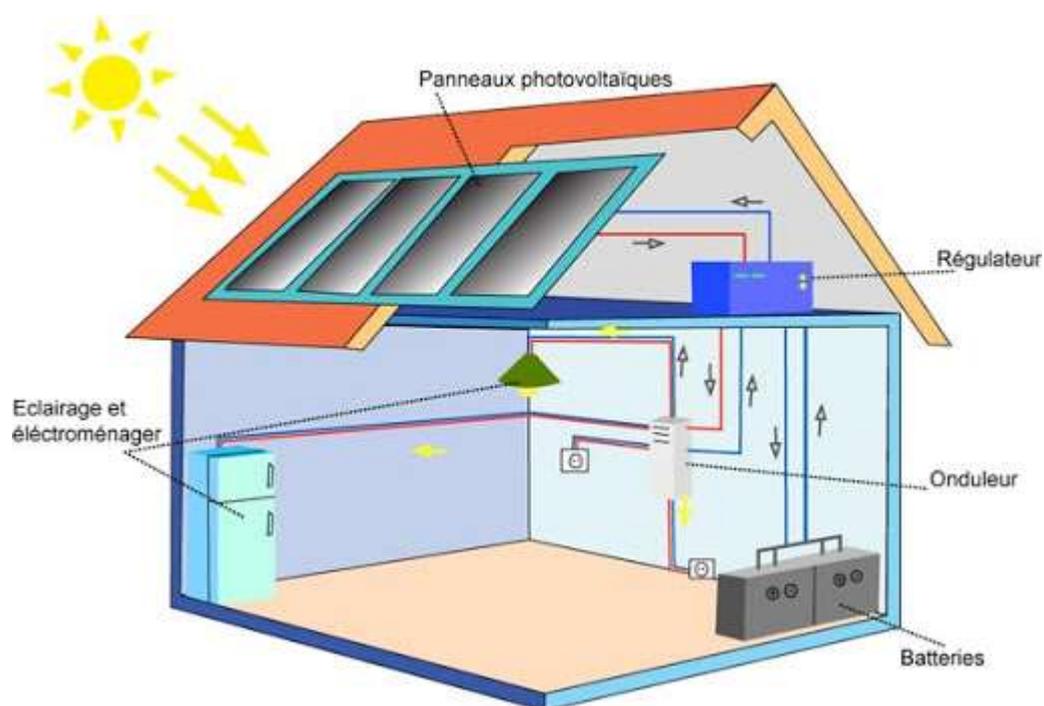


Figure I.5: Installation des panneaux photovoltaïques [15]

## I.4.2 Géothermique

On peut citer les modes d'utilisation de l'énergie géothermique comme suit :

### I.4.2.a L'usage domestique [16]

Elle est utilisable pour le chauffage, le rafraîchissement et l'alimentation en eau chaude sanitaire de maisons individuelles et les locaux collectifs (figure I.6).

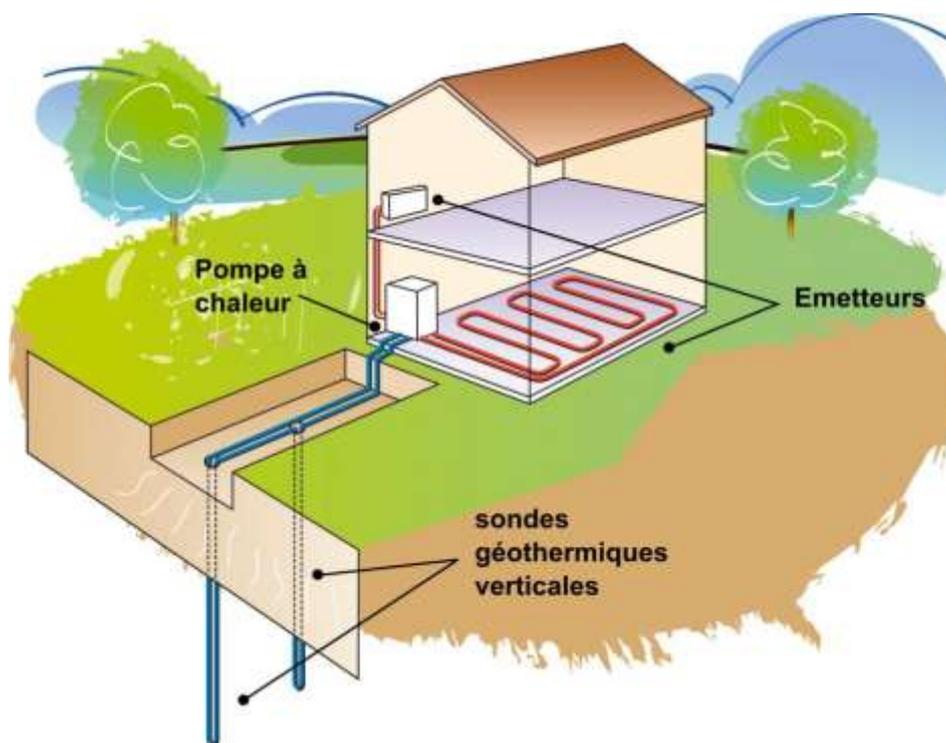


Figure I.6: Géothermie forage [17]

### I.4.2.b L'usage agricole [18]

L'énergie géothermique a été utilisée dans plusieurs pays dans le domaine de l'agriculture pour chauffer les serres agricoles, aussi Les recherches indiquent que l'utilisation de l'énergie géothermique dans les serres réduit la propagation des champignons et réduit les coûts de carburant jusqu'à 80%, réalisant d'énormes économies dans les budgets d'exploitation (figure I.7).

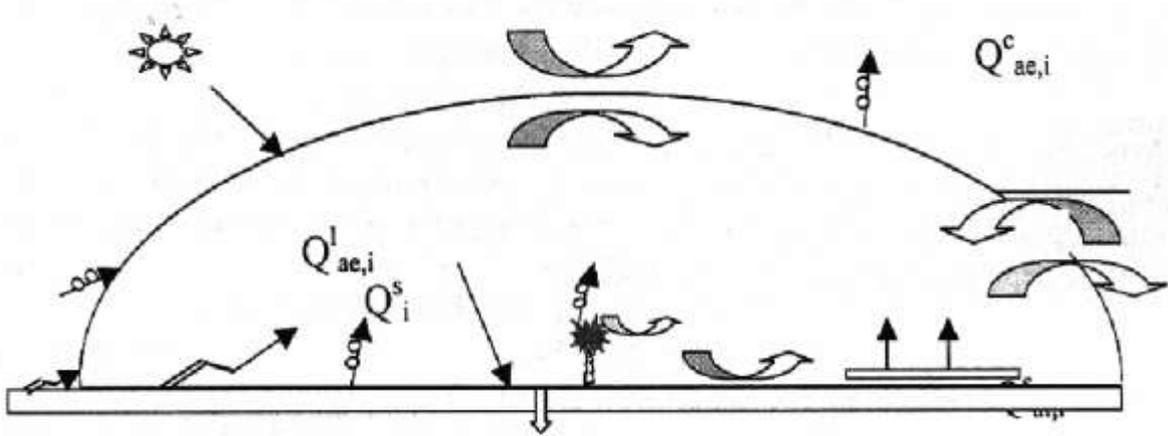


Figure I.7: Schéma d'une série agricole [19]

### I.4.2.c La production d'électricité [20]

La première et la plus importante façon de utilisé de l'énergie géothermique est de la convertir en énergie électrique, et cela se fait dans les centrales électriques utilisant l'énergie géothermique. Il existe trois types de centrales électriques utilisant l'énergie géothermique, à savoir:Centrales à vapeur sèche, Centrales à condensation, Centrales à cycle combiné (figure I. 8).

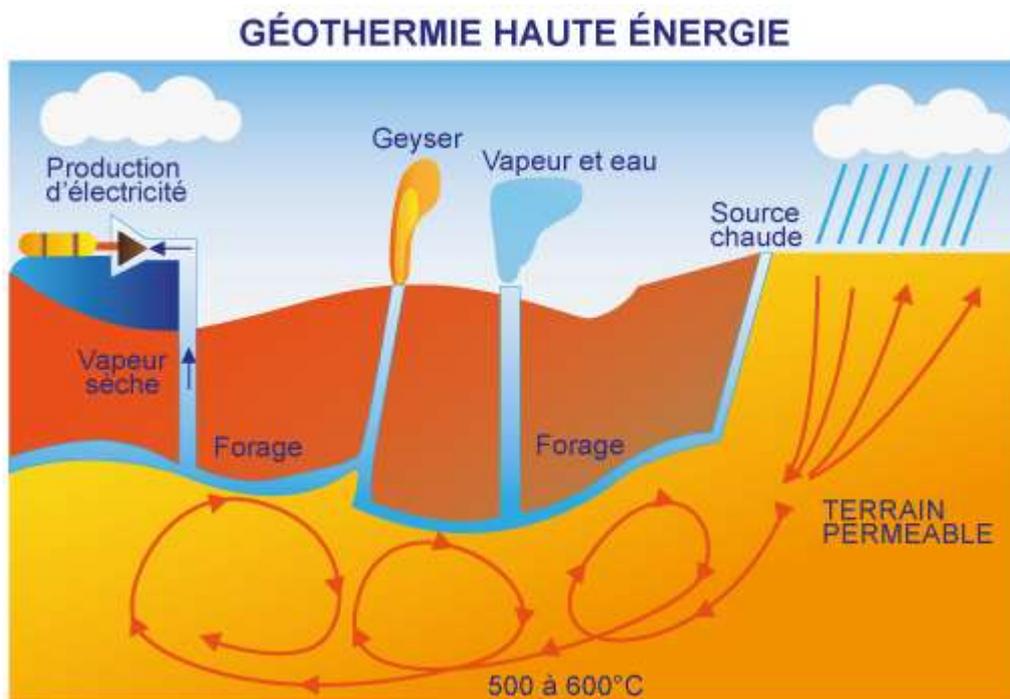


Figure I.8: Schéma production d'électricité par une source géothermique [21]

## I.5 Les projets d'énergie renouvelable

Dans cette présentation, nous vous proposons quelques projets étonnants d'énergie renouvelable et des exemples des dernières décennies :

### I.5.1 Projet Ivanpah [22]

Ce projet est situé dans le désert de Mojave, au sud-ouest de Las Vegas, et le système de production d'énergie électrique d'Ivanpah est un système solaire thermique. (figure I.9).



Figure I.9: Centrale solaire à concentration d'Ivanpah[23]

### I.5.2 Projet Ouarzazate au Maroc

La photo aérienne montre une centrale solaire à Ouarzazate (figure I.10), dans le centre du Maroc, et est considérée comme la plus grande centrale solaire au monde utilisant des cellules photovoltaïques, profitant de la lumière du soleil dans le désert [24].



Figure I.10: Centrale solaire marocou arzazate[25]

### I.5.3 Panneaux photovoltaïques à Berlin

Les panneaux photovoltaïques couvrent une superficie de 426 mètres carrés, la façade sud de l'une des dunes de Berlin en Allemagne [26] (figure I.11).



Figure I.11: Bâtiments éco énergétiques [27]

### I.5.4 Tour PST10 en Espagne

La tour PST10, située près du village de Sanlucar La Mayor à Séville (figure I.12), est la première tour solaire commerciale au monde, construite par la société d'énergie Abengoa, et elle alimente plus de 6000 foyers en électricité [28].



Figure I.12: Tour PST10 en Espagne [29]

### I.5.5 Énergie souterraine

La centrale électrique de SaltonSea à Calipatria, en Californie, pour extraire l'énergie thermique du sous-sol, situé à l'extrémité sud de la faille de San Andreas (figure I.13).



Figure I.13: Centrale électrique de Salton Sea à Calipatria[30]

## I.5.6 La chaleur des volcans en Islande

La centrale géothermique (NGPS) est la deuxième plus grande centrale thermique d'Islande et est située près de Thingvellir et du volcan Hengel. La centrale de Krafla génère 60 mégawatts d'électricité à partir de l'énergie géothermique et est située près du volcan Caravla en Islande et tire sa chaleur de plus de 30 puits [31] (figure I.14).

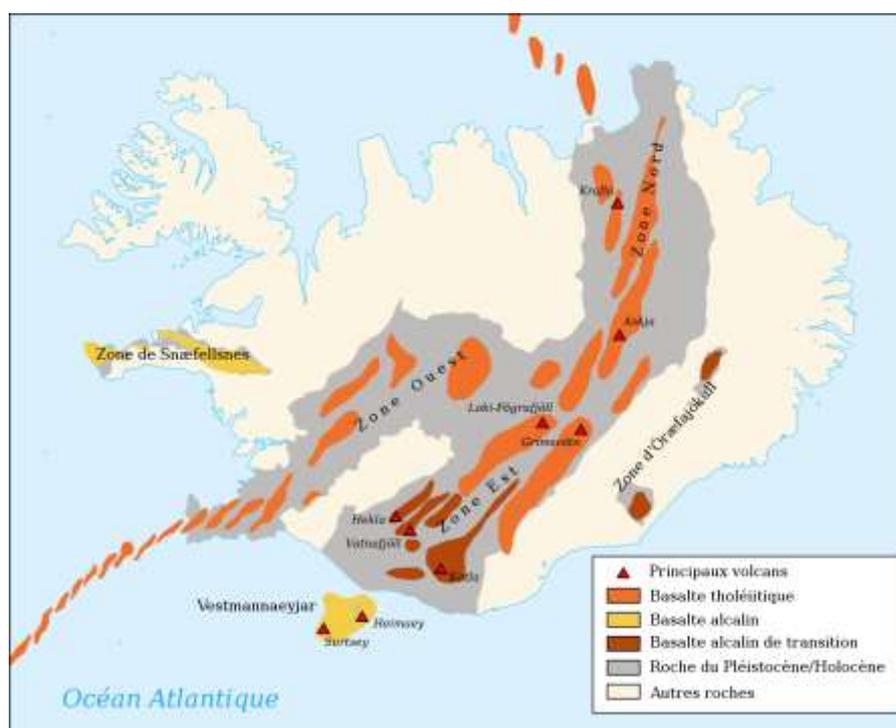


Figure I.14: Carte de l'énergie géothermique de l'Islande [32]

## I.6 Recherche bibliographique

Les auteurs M Giovanni, F Randall, D Ronald, W Jefferson, P Marco et R Nicola [33], ont examiné la possibilité d'augmenter la puissance produite par une centrale électrique géothermique à l'aide de l'énergie solaire thermique. Le cycle de Rankine organique a été étudié par l'utilisation de l'isobutane de qualité industrielle comme fluide de travail (figure I.15). Chacune des unités de cette centrale comprend deux détendeurs, un vaporisateur, un préchauffeur et des condenseurs refroidis par air. Aspen Plus a été exploité comme logiciel pour modéliser l'usine. L'exécution du modèle développé par les auteurs permet de déterminer la meilleure stratégie de distribution du fluide géothermique, afin d'optimiser la centrale selon les conditions de la source géothermique.

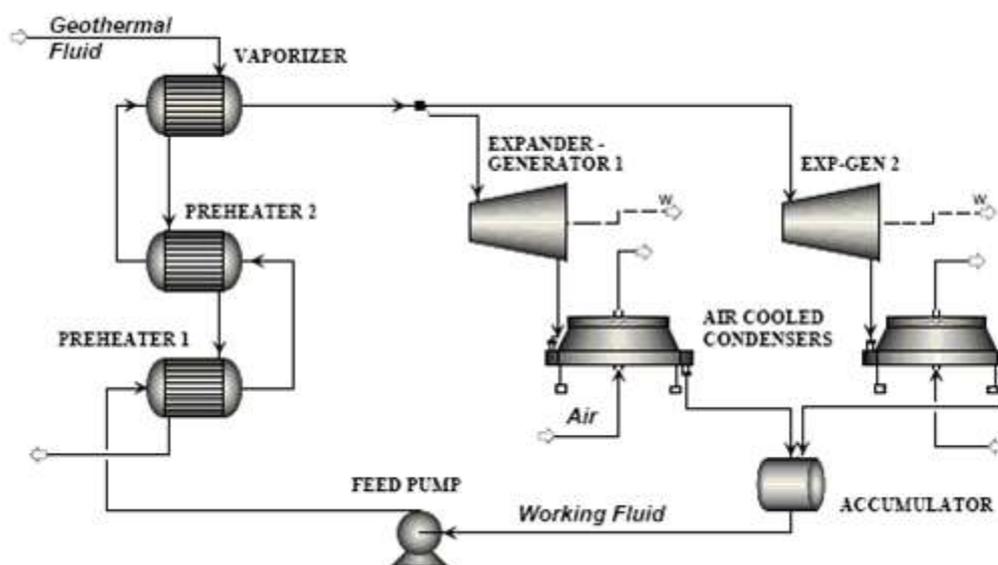


Figure I.15 : Schéma de principe de la centrale géothermique

Un système hybride solaire géothermique qui fonctionne par le cycle organique de Rankine supercritique a été étudié par l'auteur C. Zhou [34]. Les simulations et les modélisations des cycles de puissance ont été réalisées à l'aide du progiciel de processus Aspen HYSYS. Sur la base des analyses techniques, économiques et mérite, l'auteur a évalué les performances de l'usine hybride. Les résultats obtenus ont montré que la centrale hybride produit au maximum 15% (en utilisant un ORC sous-critique) et 19% (en utilisant un ORC supercritique) plus d'électricité annuelle que les centrales autonomes. Par ailleurs, sur le plan économique, la centrale hybride utilisant l'ORC supercritique à un coût solaire-électricité d'environ 1,5 à 3,3% inférieur à celui de l'ORC sous-critique.

Les auteurs A.DJEMAA, A.MERABET et O.KHEMIS [35], ont effectué une étude paramétrique d'une centrale hybride solaire-géothermique avec une source géothermique à basse température. Cette centrale utilise de l'eau-ammoniac comme fluide de travail. Ils ont étudié l'influence de quelques paramètres physiques sur la performance de la centrale notamment l'effet de la pression au niveau du séparateur, et l'effet de la concentration d'ammoniac dans le mélange sur la puissance et le rendement de la centrale. Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la concentration de l' $\text{NH}_3$  dans le mélange, le débit et la température de la source géothermique engendrait l'amélioration du rendement de la centrale. (figure.I.16)

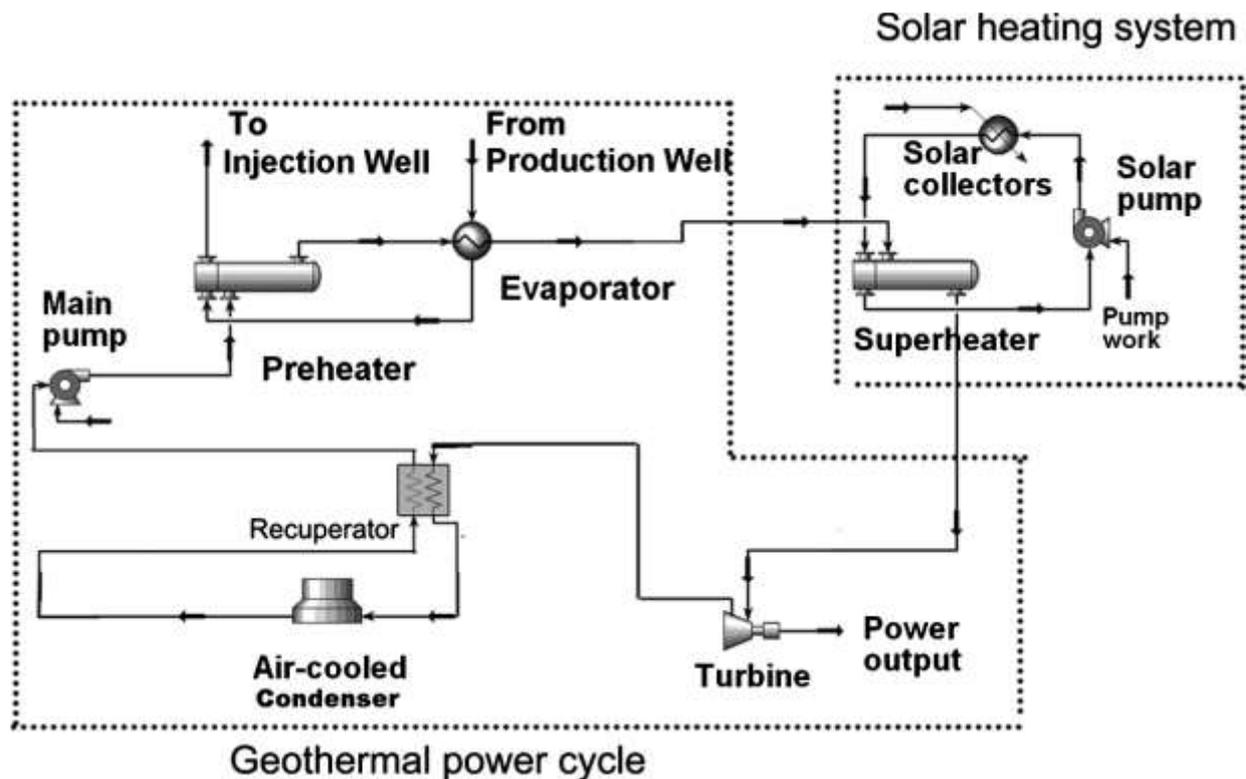


Figure I.16 : Schéma de principe de la centrale hybride solaire-géothermique.

Dans ce travail les auteurs O.Rowshanaie, S.Bin Mustapha, K.Arifin Ahmad et H.Rowshanaie [36] ont utilisé le logiciel Hysys pour développer 3 modèles du cycle organique de Rankine, pour le premier modèle le R245Fa a été employé comme fluide de travail, le NOVEC7000 pour le deuxième et R141b pour le troisième modèle. Les gaz brûlés de combustion sont exploités comme source de chaleur. Les auteurs ont conclu que l'utilisation du R141b comme fluide de travail améliore notamment la production d'électricité, mais le fluide R245fa a un rendement total plus élevé par rapport aux autres. Par contre, en termes de considérations économiques et du coût le fluide NOVEC7000 est le plus

rentable, en raison de l'approche de sa température critique à la température des gaz de brûlés.

L'analyse énergétique du cycle de Kalina a été effectuée par les auteurs M. Ahmad et M. N. Karimi2 [37]. Le rendement du cycle a été analysé en fonction de la température à la sortie du récupérateur de chaleur avec une pression constante. La fraction massique d'ammoniac considérée dans cette étude pour la composition du mélange est 70%. Les résultats ont montré que le rendement du cycle dépend uniquement de la pression de vapeur à la sortie du séparateur, cette pression varie en fonction de la température du récupérateur de chaleur (HRVG).

Les auteurs N.Shankaret T.Srinivas [38] ont étudié le cycle Kalina pour deux conceptions différentes, par l'utilisation d'un mélange binaire comme fluide de travail. Ils ont calculé le rendement du cycle en fonction de la pression à l'entrée de la turbine et de la sortie du séparateur, ainsi que les valeurs des propriétés du cycle à chaque point. Les auteurs ont déterminé les conceptions optimales dans diverses conditions, ce qui a permis de conserver l'énergie.

# **CHAPITRE II**

## **Modèle mathématique et présentation du HYSYS**

## II.1 Introduction

Il y a quelques années, seulement les sources géothermiques à haute température étaient utilisables pour la production d'électricité dans les centrales à vapeur conventionnelles. Aujourd'hui, même les sources à basse et moyenne température (c'est-à-dire les sources géothermiques avec une température de 150 °C ou moins) sont applicables pour produire de l'énergie à l'aide de technologies binaires.

## II.2 Modèle mathématique

Avant d'entamer la présentation des équations, le problème physique doit être expliqué ainsi que les conditions et les paramètres utilisés, dans cette mémoire l'objectif principal est d'étudier l'effet des paramètres (tel que la pression, la température et le rayonnement solaire...) sur les performances d'une installation hybride solaire géothermique pour la production d'électricité. Les sources géothermiques disponibles en Algérie ont des températures basses et moyennes, pour cela on va exploiter un fluide de travail binaire (mélange) avec le cycle de Kalina.

### II.2.1 Le cycle de Kalina

Le cycle a été développé pour la première fois par le Dr. Aleksandr Kalina à la fin des années 1970 et au début des années 1980 [39]. Après le Dr. Kalina, plusieurs des autres cycles de Kalina ont été proposés pour différentes applications. Le diagramme systématique du cycle de Kalina est comme indiqué dans la figure II.1.

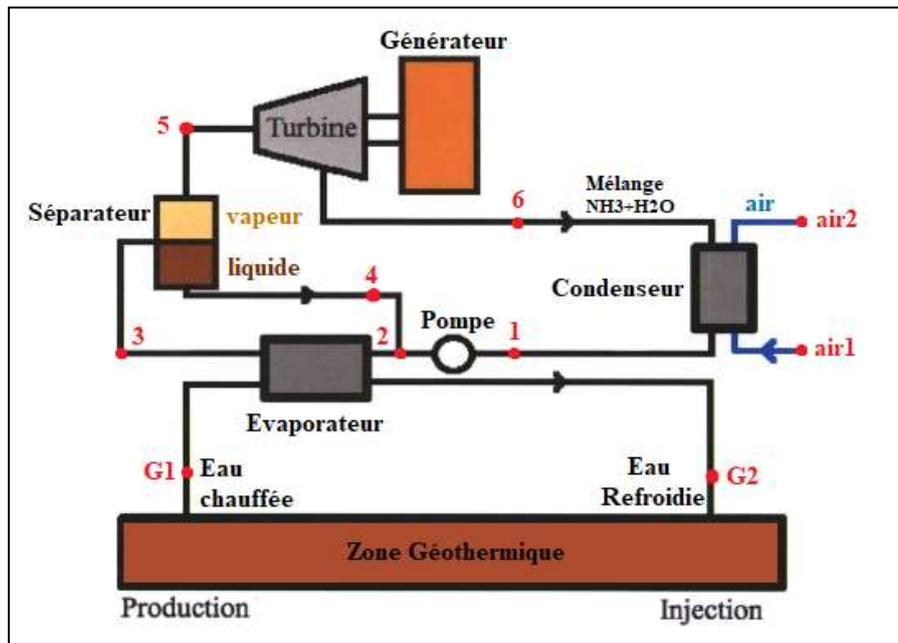


Figure II.1 : Schéma de la configuration de la centrale à cycle de Kalina pour l'énergie géothermique. [40]

Le cycle Kalina est un nouveau concept de récupération de chaleur et de production d'électricité, qui utilise un mélange d'ammoniac-eau comme fluide de travail avec le potentiel de gains d'efficacité significatifs par rapport au cycle Rankine conventionnel. Le cycle Kalina convient aux systèmes de récupération de chaleur à moyenne et basse température du fluide (450 °K à 800 °K). Le rendement thermique du cycle Kalina est de 40% à 60%. La principale raison de l'efficacité thermique relativement élevée du cycle de Kalina est les processus d'évaporation et de condensation non-isothermes qui se produisent parce que le fluide de travail est un mélange zéotrope de deux fluides [41].

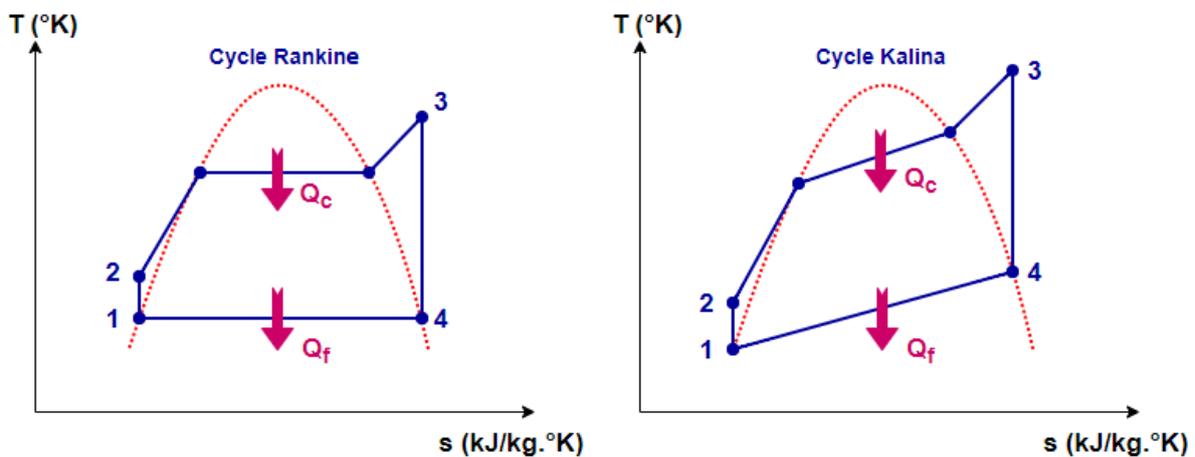


Figure II.2 : Comparaison des diagrammes T-s des cycles de Rankine et Kalina

La différence entre le cycle Kalina et le cycle Rankine ordinaire, c'est son choix du fluide de travail. Le cycle Kalina utilise un mélange de deux fluides comme fluide de travail, le plus couramment utilisé est le mélange d'ammoniaque et d'eau. La différence principale entre le cycle de Kalina et le cycle de Rankine c'est que dans le cycle de Kalina, l'ajout de chaleur et le rejet de chaleur se produisent à des températures variables même pendant le changement de phase, puisque le fluide est un mélange. Mais à Rankine, l'addition de chaleur et le rejet de chaleur se produisent à température uniforme (isotherme) pendant le changement de phase. C'est la seule chose qui fait toute la différence dans les performances du cycle Kalina. (Voir la figure II.2)

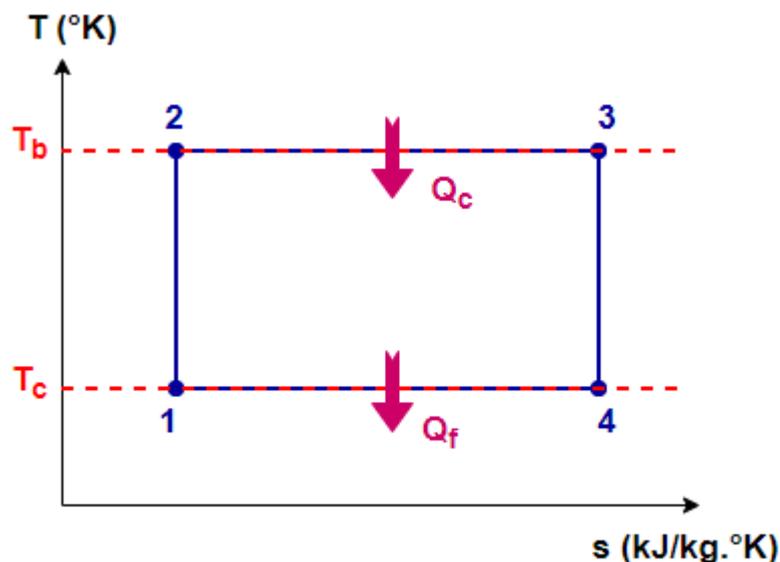


Figure II.3 : diagramme T-s du cycle Carnot

Dans un moteur Carnot (Figure II.3), l'addition et le rejet de chaleur se produisent à température uniforme. Donc on peut écrire la relation de l'efficacité comme suit :

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_c}{T_b}$$

Donc il est clair que si la température de rejet de chaleur ( $T_c$ ) diminue ou si la température d'absorption de chaleur ( $T_b$ ) augmente, l'efficacité thermique du moteur Carnot va augmenter. La même analyse peut être effectuée pour les cycles de Rankine (Figure II.4.a) et Kalina (Figure II.4.b), en utilisant la température moyenne d'addition et de rejet de chaleur comme températures de référence.

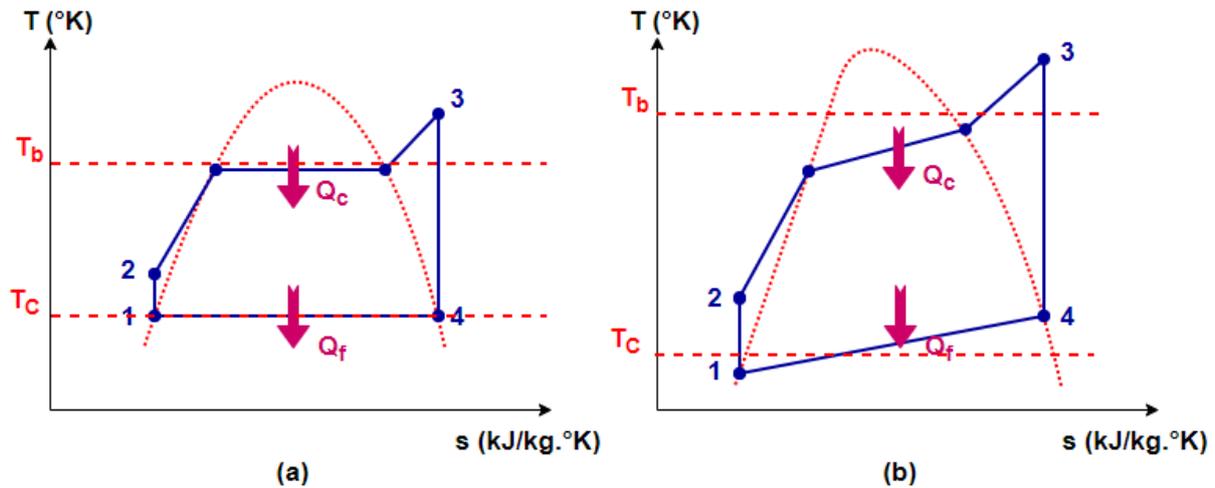


Figure II.4 : Les températures moyennes d'ajout et de rejet de chaleur du cycle Kalina et Rankine

Il ressort donc clairement des diagrammes que le cycle de Kalina a une température moyenne de rejet de chaleur ( $T_c$ ) inférieure et une température moyenne d'addition de chaleur ( $T_b$ ) plus élevée par rapport au cycle de Rankine. Cela conduira évidemment à un rendement thermique élevé.

Cela forme le fond théorique du cycle de Kalina, mais pour le mettre en œuvre, nous devons surmonter certains obstacles pratiques.

Le cycle de Kalina utilise un mélange d'ammoniac à haute concentration (environ 70% d'ammoniac) au niveau de la turbine à vapeur, mais un tel mélange à une température de condensation très basse. Cela signifie que vous devez fournir de fluide de refroidissement à très basse température au condenseur à cet effet. La production d'une telle eau de refroidissement à basse température n'est pas pratique. La figure II.5 montre que si la concentration de l'ammoniac dans le mélange est élevé, la température de condensation de ce mélange est basse. [42]

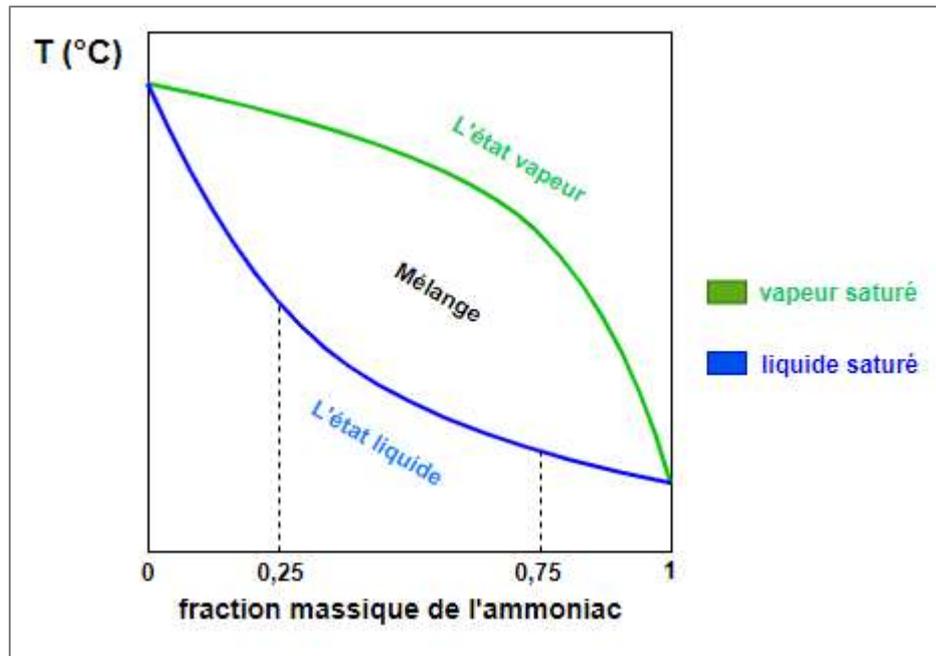


Figure II.5 :diagramme de changement de phase du mélange NH3-H2O

### II.2.2 Les hypothèses

Pour la modélisation les hypothèses considérées sont :

- Le système fonctionne en régime stationnaire.
- Les variations de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle sont négligeables.
- Les pertes de charge et les pertes de chaleurs dans les conduites sont négligeables.

### II.2.3 Les équations mathématique[43]

Pour évaluer les performances thermodynamiques du système de cycle de Kalina, un modèle mathématique a été construit à partir des équations du bilan masse et d'énergie. Le bilan de masse et d'enthalpie est obtenu par l'expression du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert qui s'écrit sous la forme :

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s ; \dots\dots\dots (1)$$

Le bilan de masse pour l'ammoniac :

$$\sum m_{entrée} \cdot x_{entrée} - \sum m_{sortie} \cdot x_{sortie} = 0 ; \dots\dots\dots(2)$$

Avec :  $x$  c'est la concentration massique de l'ammoniac.

$$\sum_j \dot{Q}_j - \dot{W}_j = (\sum_i \dot{m}_i \cdot h_i)_{entrée} - (\sum_i \dot{m}_i \cdot h_i)_{sortie} ; \dots\dots\dots(3)$$

L'application du bilan d'énergie pour chaque composant de la centrale donne :

Pour la pompe :

$$\dot{W}_P = \dot{m}_1 \cdot (h_2 - h_1) = \frac{\dot{m}_1 \cdot (h_{2,is} - h_1)}{\eta_{P,is}} = V \cdot (P_2 - P_1) ; \dots \dots \dots (4)$$

Pour L'évaporateur (échangeur géothermique) :

$$\dot{Q}_{géo} = \dot{m}_{geo} \cdot (h_{G1} - h_{G2}) = \dot{m}_2 \cdot (h_3 - h_2) ; \dots \dots \dots (5)$$

Pour le séparateur les équations de la fraction massique de l'ammoniac sont données par :

$$\dot{m}_3 \cdot x_3 = \dot{m}_4 \cdot x_4 + \dot{m}_5 \cdot x_5 ; \dots \dots \dots (6)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 ; \dots \dots \dots (7)$$

$$\dot{m}_3 \cdot h_3 = \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_5 \cdot h_5 ; \dots \dots \dots (8)$$

Pour la turbine :

$$\dot{W}_T = \dot{m}_5 \cdot (h_5 - h_6) = \dot{m}_5 \cdot (h_5 - h_{6,is}) \cdot \eta_{T,is} ; \dots \dots \dots (9)$$

Pour le condenseur (échangeur de l'air ACC) :

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_1 \cdot (h_6 - h_1) ; \dots \dots \dots (10)$$

La chaleur totale reçue par la centrale solaire-géothermique ( $\dot{Q}_{recue}$ ) est la somme de la quantité de chaleur solaire ( $\dot{Q}_{sol}$ ) et géothermale ( $\dot{Q}_{geo}$ ) introduits dans la centrale :

$$\dot{Q}_{recue} = \dot{Q}_{géo} + \dot{Q}_{sol} = \dot{m}_{geo} \cdot (h_{geo,P} - h_{geo,I}) + A_{sol} \cdot DNI \cdot \eta_{optique} \cdot \eta_{thermiquesol} ; \dots (11)$$

Avec :  $DNI$  est l'ensoleillement direct incident.

La puissance nette produit par la centrale est :

$$\dot{W}_{net} = \sum \dot{W}_{turbine} - \sum \dot{W}_{pompe} ; \dots \dots \dots (12)$$

Le rendement thermique est :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{recue}} ; \dots \dots \dots (13)$$

### II.3 Présentation du logiciel HYSYS[44]

La simulation est un outil utilisé dans différents domaines de l'ingénierie et de la recherche en général, permettant d'analyser le comportement d'un système avant de l'implémenter et d'optimiser son fonctionnement en testant différentes solutions et différentes conditions opératoires.

Elle s'appuie sur l'élaboration d'un modèle du système, et permet de réaliser des scénarios et d'en déduire le comportement du système physique analysé.

Il existe un très grand nombre de logiciels de simulation des procédés chimiques. On présente une liste non-exhaustive des logiciels les plus utilisés au niveau mondial tel que : (Aspen), (Chemcad), (DesignII), (Hysys), (Ideas), (Indiss), (Prosim), (ProII), (Sim42)

Le logiciel dont nous disposons est le logiciel HYSYS de la société Hyprotech qui est une filiale du groupe Aspentech. Il existe deux versions du logiciel : HYSYS.Process (simulation à l'état stationnaire) et HYSYS.Plant (simulation dynamique).

HYSYS est un programme de simulation qui est prouvé industriellement et largement utilisé dans l'industrie du pétrole, gaz et énergie pour la simulation des équipements et des processus et le compresseur l'un d'eux. HYSYS est considéré comme un outil de simulation pour simuler des compresseurs nouveaux et dégradés ainsi que la construction du modèle de compresseur sur site pour l'analyse des données et l'optimisation opérationnelle ainsi qu'il est utilisé pour les travaux en cours de recherche, HYSYS n'est pas le logiciel de simulation le plus flexible, ni le plus utilisé dans l'industrie, mais il a l'avantage d'être convivial et facile à utiliser une fois que les éléments de base sont compris. HYSYS a été développé pour l'industrie du pétrole, bien qu'il soit utilisé pour d'autres types de procédés chimiques. Les simulations sont accomplies en utilisant les outils des menus. En plus, il dispose d'une interface graphique pour la construction des diagrammes du procédé (PDF – Process Flow Diagrams).

### II.4 Modélisation sur HYSYS

Pour réaliser une simulation en HYSYS, les pas suivants sont nécessaires :

1. Choix des composés du fluide ;
2. Sélection d'un modèle thermodynamique ;

3. Construction du PFD ;
4. Spécification des courants et des unités ;
5. Exécution du programme de simulation ;
6. Interprétation des résultats

### II.4.1 Procédures de simulation par HYSYS

- En premier lieu le choix des composants du mélange pour le fluide de travail (Figure II.6 et Figure II.7)

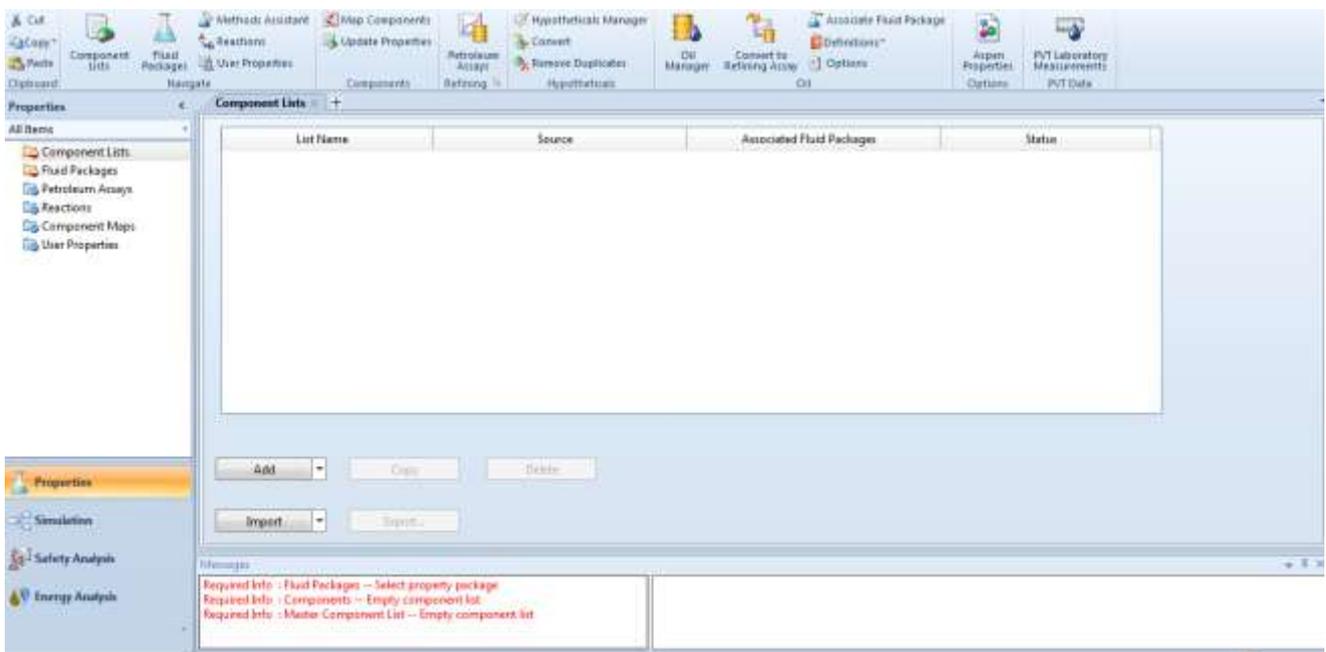


Figure II.6 :Interface HYSYS

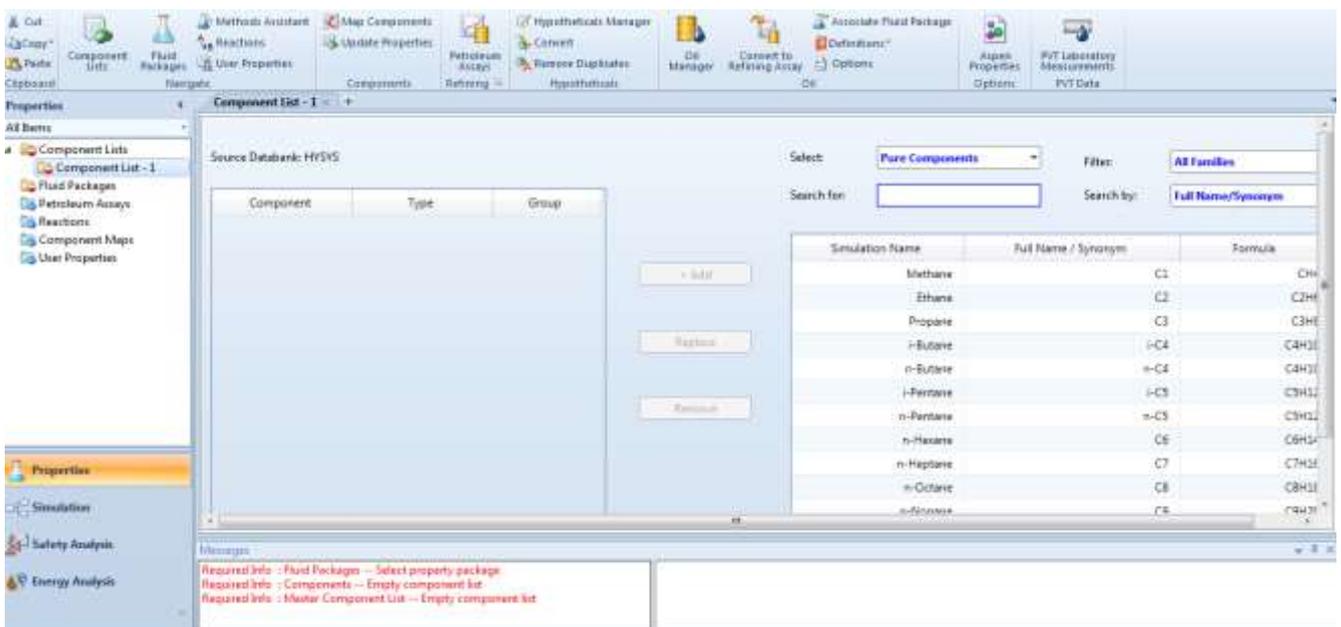


Figure II.7 :Composants du mélange

- La deuxième étape est la désignation du modèle thermodynamique « Peng-Robinson» (Figure II.8).

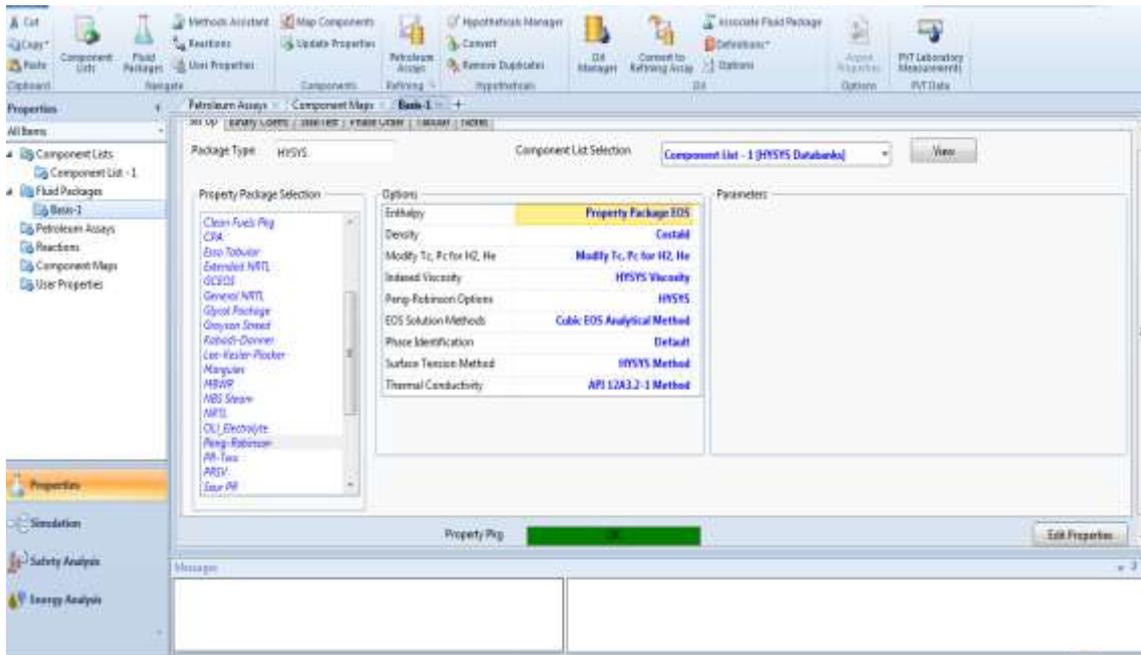


Figure II.8 : Model thermodynamique

- L'accès à l'interface différente équipements est la troisième étape (Figure II.9 Et Figure II.10) :

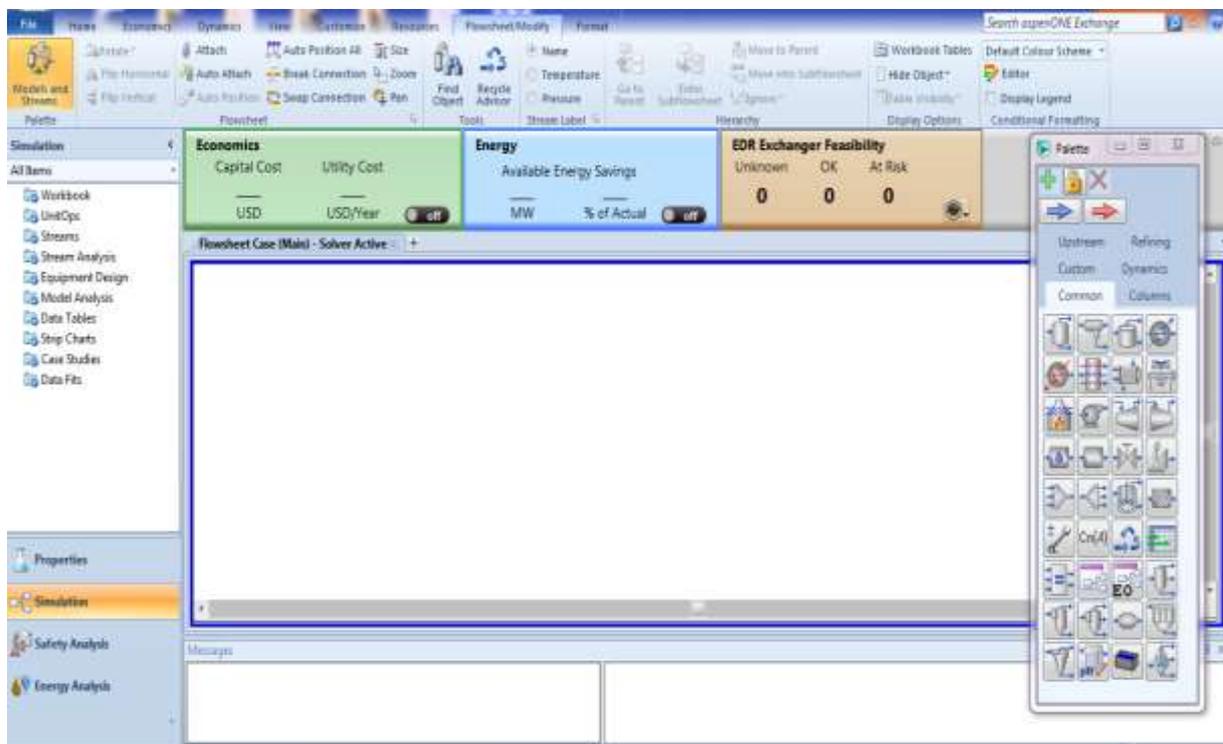


Figure II.9 : Interface équipements.

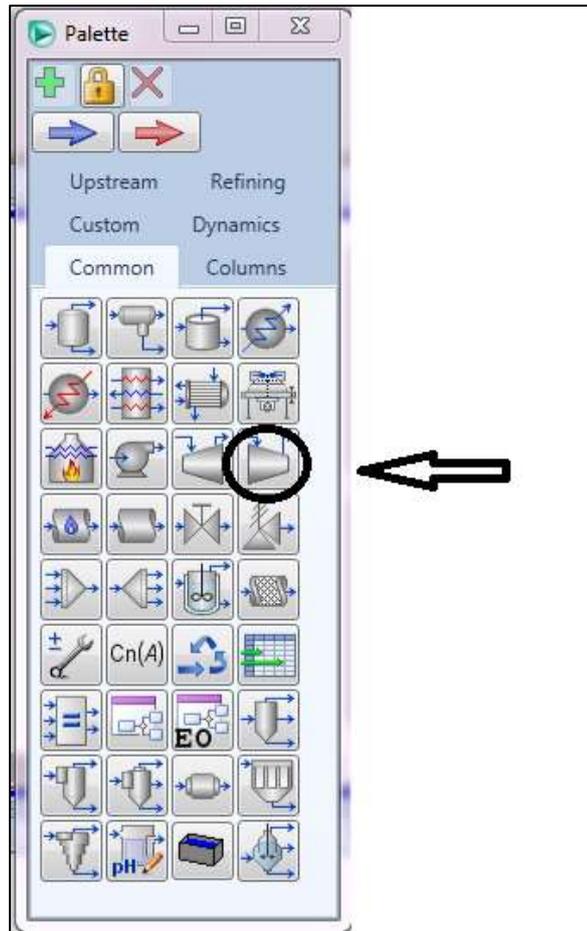


Figure II.10 : Palette des différents équipements

- La quatrième étape est la création de l'équipement (Figure II.11) et l'intégration des données

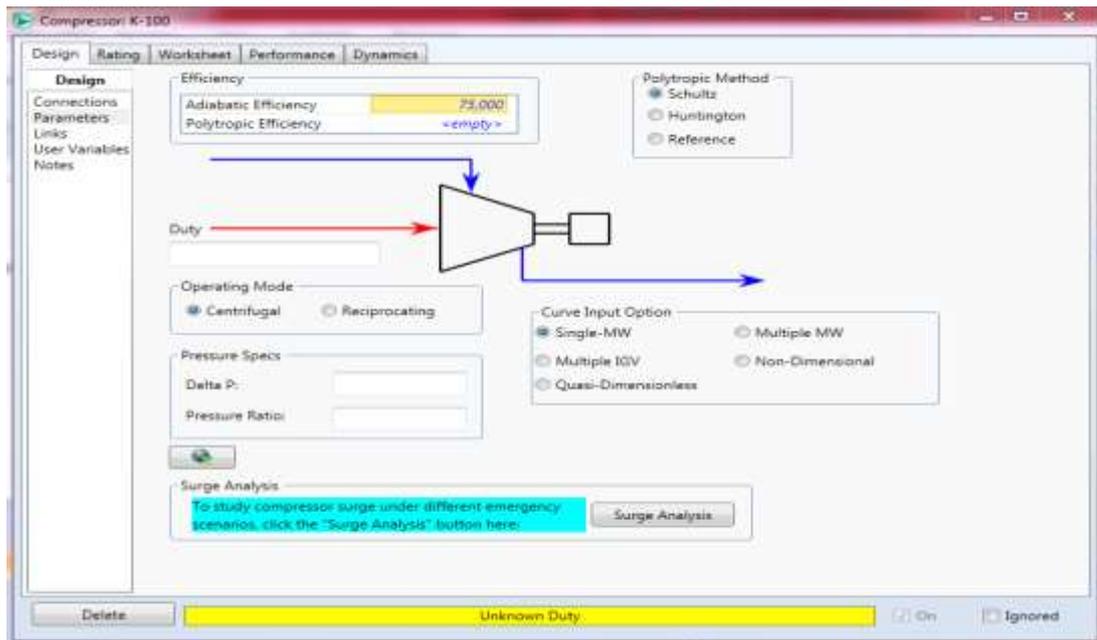


Figure II.11 : Fenêtre des paramètres de compresseur

### II.4.2 Les différents composants du cycle

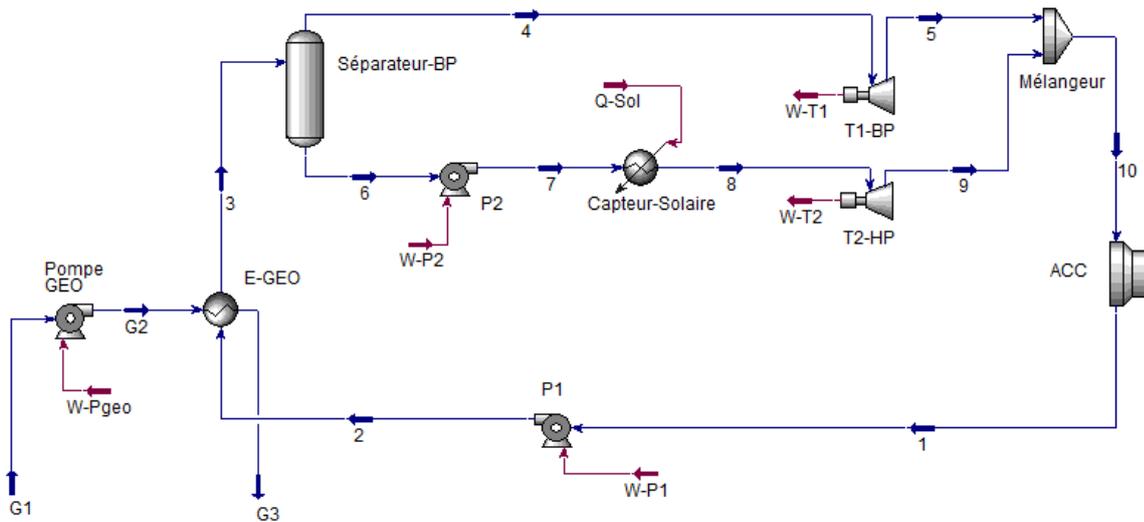


Figure II.12: Cycle des différents équipements

#### II.4.2.a Pompe

La pompe est utilisée pour augmenter la pression d'un flux de processus liquide. Dans l'environnement de simulation, un flux bien défini est pris comme l'alimentation d'entrée de la pompe, le flux de sortie et le nom de l'énergie sont déclarés sur l'onglet de connexion. Et dans l'onglet des paramètres, le Delta P calculé est déclaré. En fonction des informations spécifiées, la pompe calcule une température, une pression ou une efficacité de pompe inconnue. Il calcule également le service de la pompe.

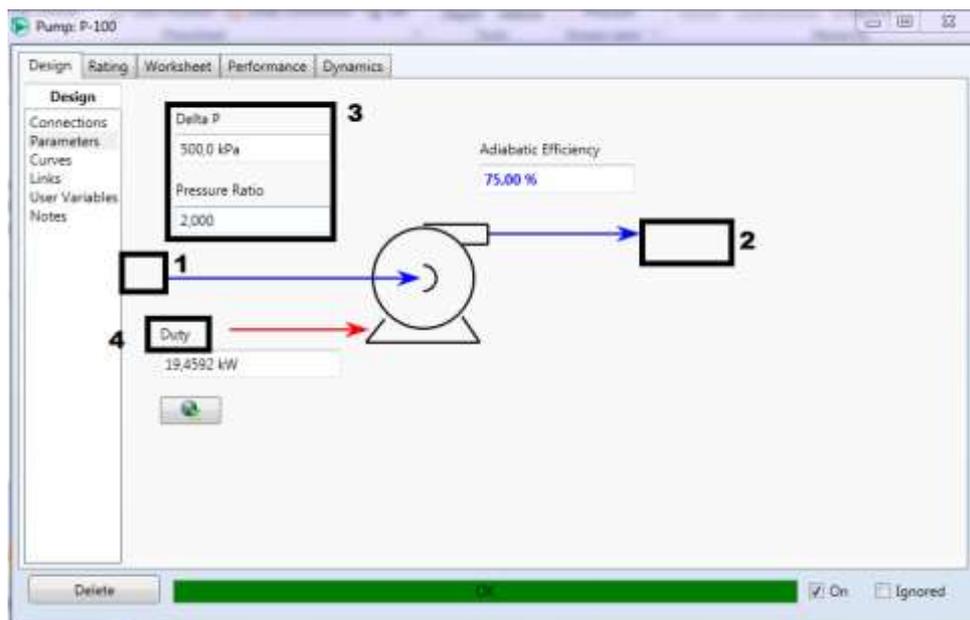


Figure II.13 : Paramètres de la pompe

- 1- l'entrée de fluide
- 2- la sortie de fluide
- 3- Delta p : c'est la différence entre la pression d'entrée et la pression de sortie
- 4- la puissance absorbée par la pompe

### II.4.2.b Turbine

Générateur de puissance (le fluide doit être gazeux, phase vapeur à l'entrée).

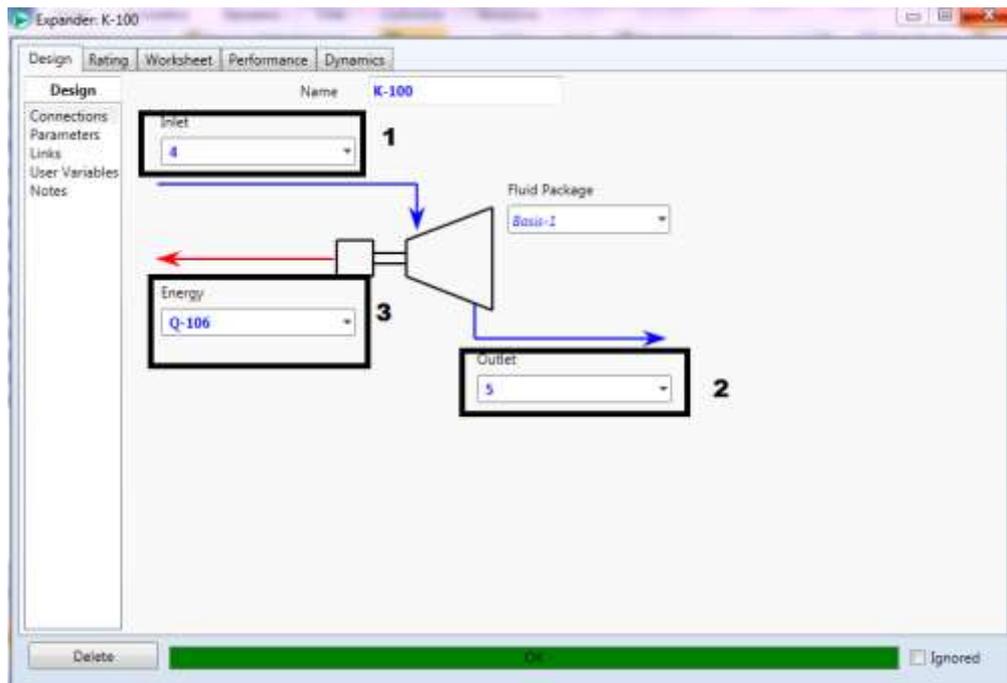


Figure II.14 : Paramètres de la turbine

- 1- l'entrée
- 2- la sortie
- 3- l'énergie produite

### II.4.2.c Séparateur

Le rôle de cet équipement est la séparation des phases liquides et vapeurs.

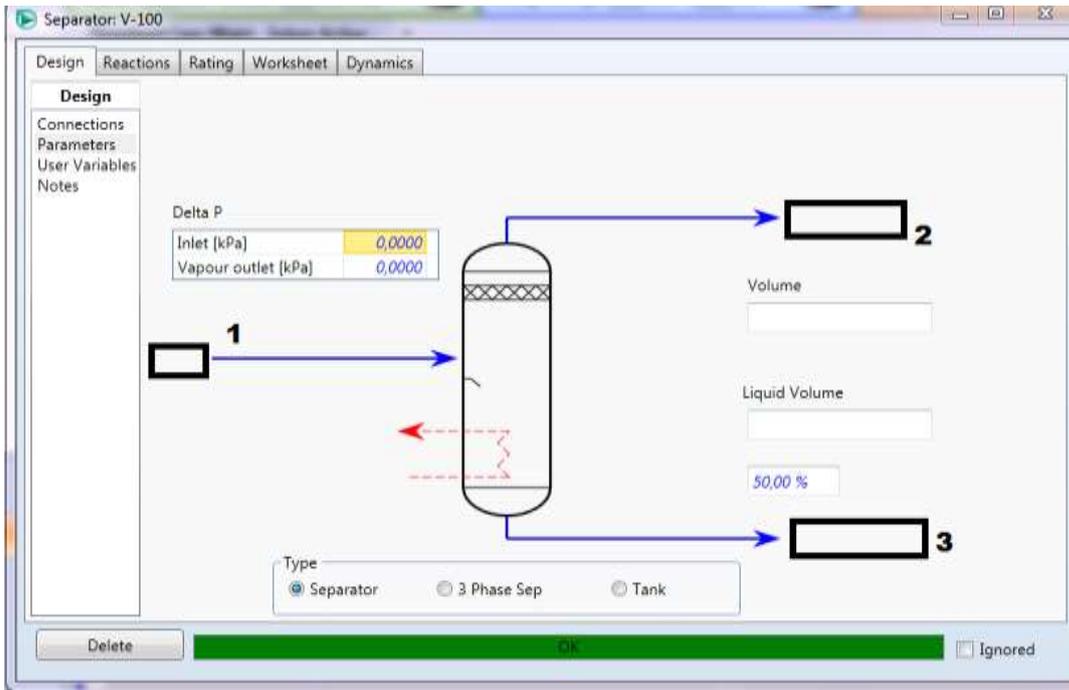


Figure II.15 : Paramètres du séparateur

- 1- l'entrée de fluide (mélange)
- 2- vapeur sortie
- 3- liquide sortie

#### II.4.2.d Échangeur de chaleur

Transférer de la chaleur d'un fluide chaud vers un fluide froid.

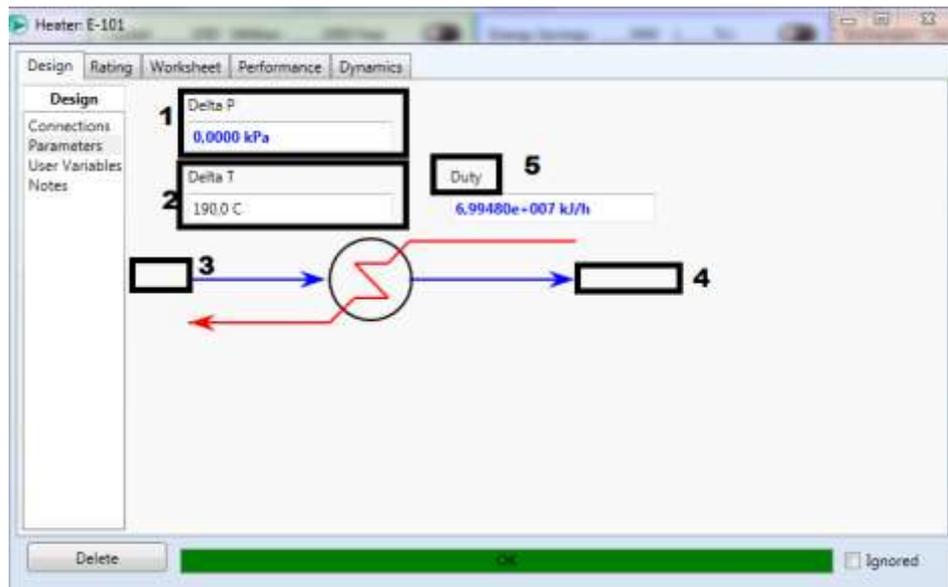


Figure II.16 : Paramètres de l'échangeur de chaleur

- 1- Delta P c'est la différence entre la pression d'entrée et la pression de sortie  
(généralement = 0)
- 2- Delta T c'est la différence entre la température d'entrée et la température de sortie
- 3- l'entrée de fluide
- 4- la sortie de fluide
- 5- la puissance échangée

## II.4.2.eMixer

Les mélangeurs jouent un rôle important dans de nombreux processus de production. Les matériaux dans tous les états physiques peuvent être mélangés ensemble, que ce soit gaz, liquide, mélange gaz-liquide ou mélange solide-liquide

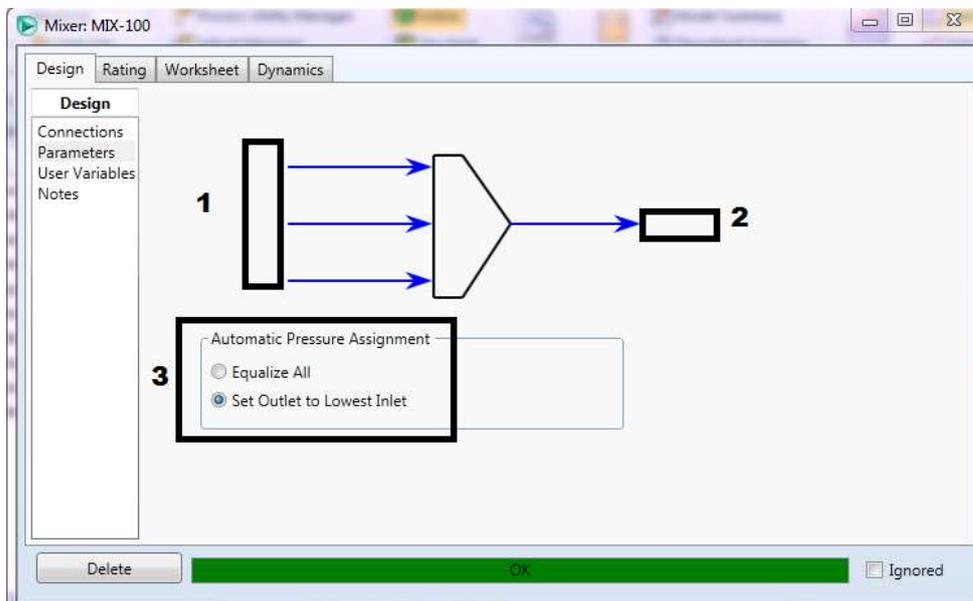


Figure II.17 : Paramètres de mixeur

- 1- différents fluides d'alimentation
- 2- sortie unique
- 3- ajustement de la pression

# **CHAPITRE III**

## **Résultats et discussion**

### III.1 Description du processus

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus à l'aide de logiciel HYSYS. L'analyse numérique est basée sur le cycle géothermique Kalina qui contient un champ solaire.

La centrale est composée d'un échangeur géothermique, deux séparateurs et deux turbines à basse et haute pression, deux pompes dans le cycle (avec un fluide de travail eau-ammoniac) et une autre pompe géothermique, un capteur solaire, un mélangeur et un condenseur à air. Le schéma du procédé est présenté sur la figure III.1.

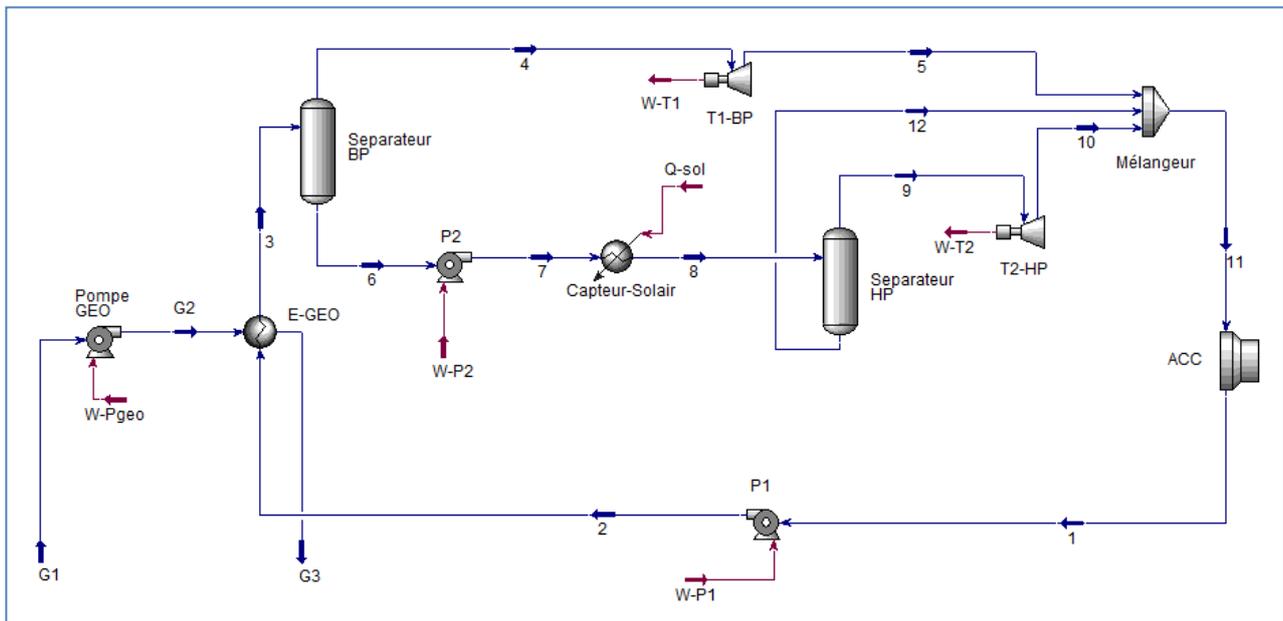


Figure III.1 : Schéma du Cycle

Le mélange ( $H_2O-NH_3$ ) est chauffé dans l'échangeur géothermique et évaporé partiellement. Ensuite, la vapeur riche en ammoniac est passée à travers la turbine basse pression (T1-BP), tandis que le liquide riche en eau est chauffé par la source de chaleur solaire avant d'être injecté dans la turbine haute pression (T2-HP) pour générer de travail. Finalement, pour rendre le fluide de travail à l'état initial, il doit être condensé dans les aéros.

Dans cette étude plusieurs paramètres peuvent être influencés les performances de l'installation (la pression, l'ensoleillement direct incident, la concentration de l'ammoniac ...). A cet effet des paramètres ont été fixés (voir le tableau III.1) :

Paramètre	Valeur
La température de la source géothermique	98 [°C]
Le débit de la source géothermique	60 [kg/s]
Température de réinjection	75 [°C]
Température ambiante (air)	20 [°C]
Pression ambiante	1.013 [bar]
Le nombre de fans dans le condenseur à air	10
Fluide caloporteur (de travail)	H2O-NH3
La fraction massique de l'ammoniac	25%
Débit massique du fluide Mélange NH3-H2O	12 [kg/s]
Rendement isentropique des turbines	85%
Rendement isentropique des pompes	80%
Surface du champ solaire	70000 [m <sup>2</sup> ]
l'ensoleillement direct incident (DNI)	500 [W/m <sup>2</sup> ]
Le rendement optique des captures solaires	75%
Le rendement thermique des captures solaires	75%
Pas des chut de pression dans les échangeurs et les séparateurs	-
L'état de fluide de travail après le condenseur ACC	Liquide
La pression après les turbines BP et HP	0,9 [bar]

Tableau III.1 : Les paramètres fixés

## III.2 Etude de l'influence des paramètres

Trois paramètres ont été sélectionnés, pour évaluer leurs effets sur les performances de la centrale solaire géothermique, ces paramètres sont :

- La pression à l'entrée de l'échangeur géothermique
- La pression à l'entrée de capteur solaire
- La concentration de l'ammoniac (point de départ)
- Et enfin, l'ensoleillement direct incident (DNI).

### III.2.1 Effet de la pression à l'entrée de l'échangeur géothermique ( $P_2$ )

La valeur initiale de la pression à l'entrée de l'échangeur géothermique (au point 2) est de 2 bar. Afin d'étude l'effet de ce paramètre, cette valeur sera augmentée avec un pas de 0.5 bar et ceci pour trois cas de pression  $P_7$  (50, 100, 150) bar (figure III.2).

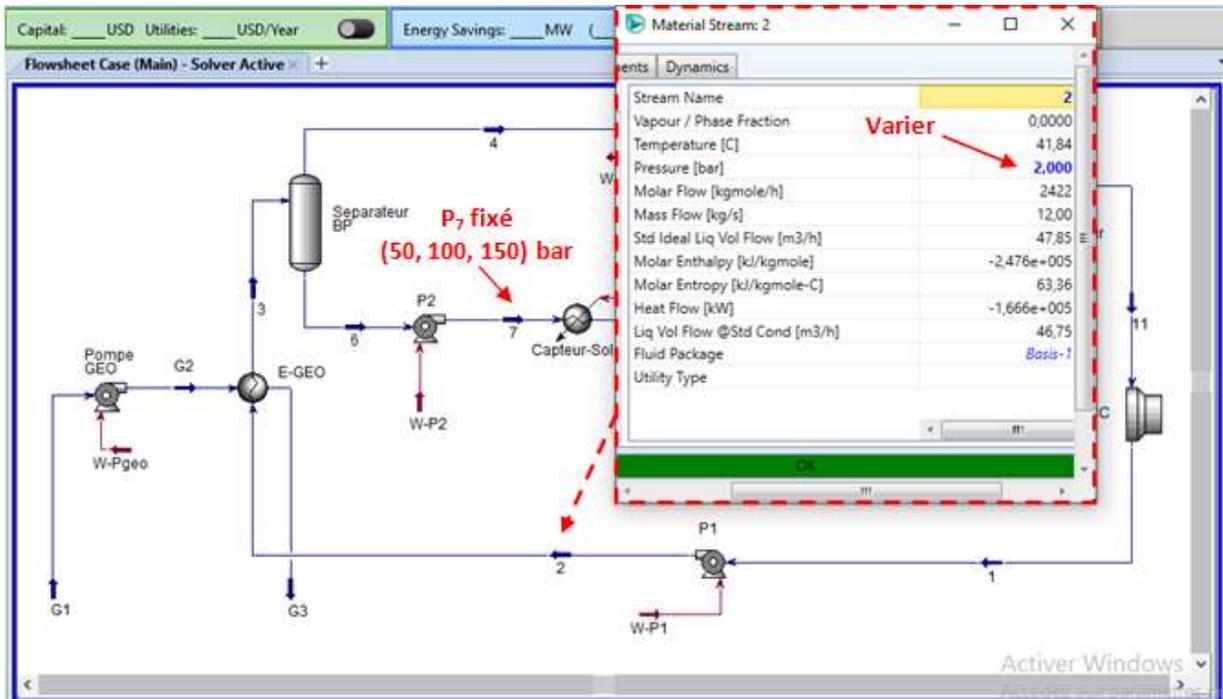


Figure III.2 : Position de la Pression  $P_2$

Sur la figure III.3 nous traçons l'effet de pression  $P_2$  sur le rendement thermique du cycle

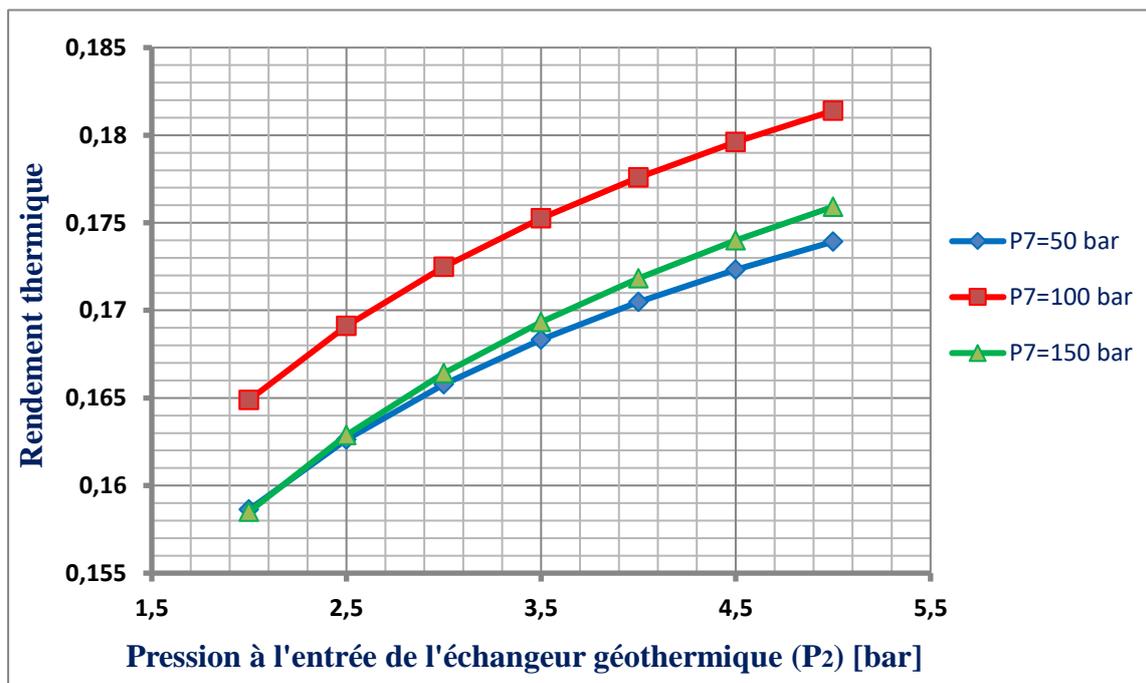


Figure III.3 : Effet de la pression à l'entre de l'échangeur sur le rendement

On remarque sur la figure III.3 que le rendement thermique est proportionnel à la pression au point 2 ( $P_2$ ). Ceci peut être expliqué par le fait que la fraction vapeur du mélange (H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>) dans le point 3 (avant le séparateur BP) est diminuée, donc le débit qui va traverser la turbine HP est plus élevé. Cela signifie que la puissance produite par la turbine HP est améliorée. Au même temps, la puissance produite par la turbine BP est augmentée aussi car la pression à l'entrée est plus importante ( $P_2 = P_4$ , pas du chut de pression dans l'échangeur géothermique et le séparateur BP).

D'autre part l'impact de l'augmentation de la pression au point 7 sur le rendement thermique est positif au départ. Mais après une valeur fixée nous constatons une diminution du rendement. Pour cela nous étudions dans la partie suivante l'effet de cette pression ( $P_7$ ).

### III.2.2 Effet de la pression à l'entrée du capteur solaire ( $P_7$ )

La valeur initiale de la pression à l'entrée de capteur solaire (au point 7) est 50 bar. Pour déterminer l'effet de ce point on a augmenté cette valeur avec un pas de 25 bar, pour trois cas de la pression  $P_2$  (2.5, 3.5, 4.5) bar (figure III.4).

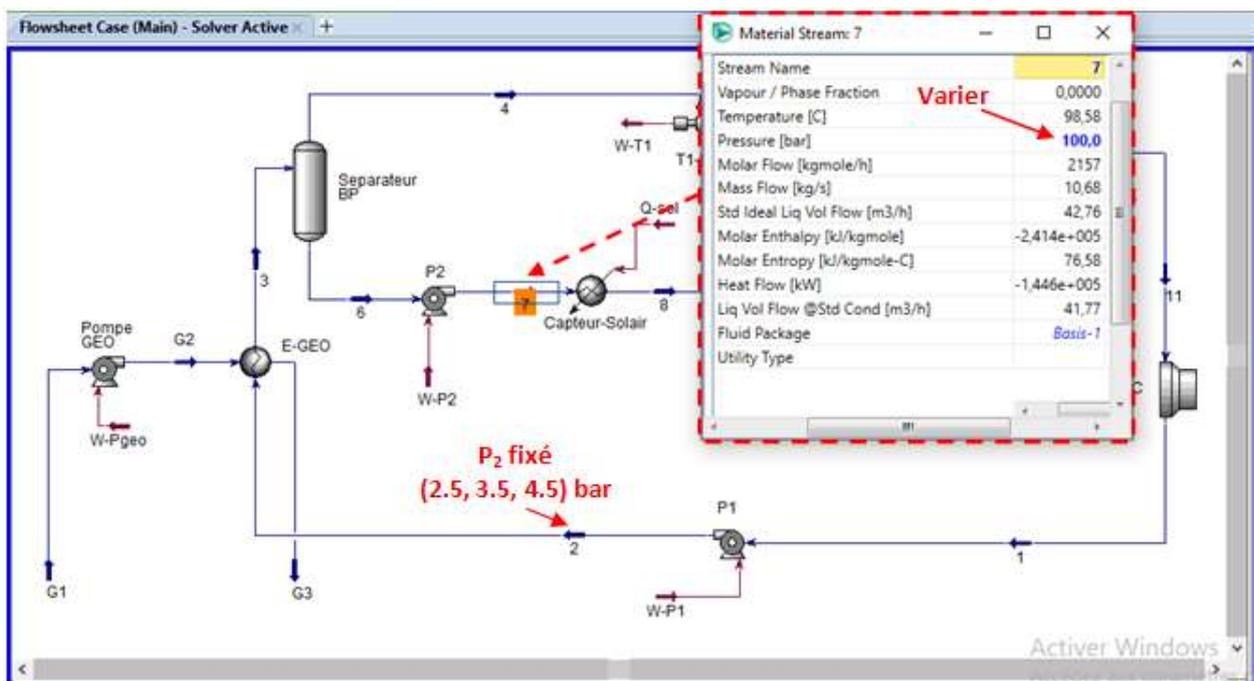


Figure III.4 : Position de la pression  $P_7$

Les résultats de l'effet de la pression au point 7 sur le rendement thermique du cycle sont présentés sur la figure III.5.

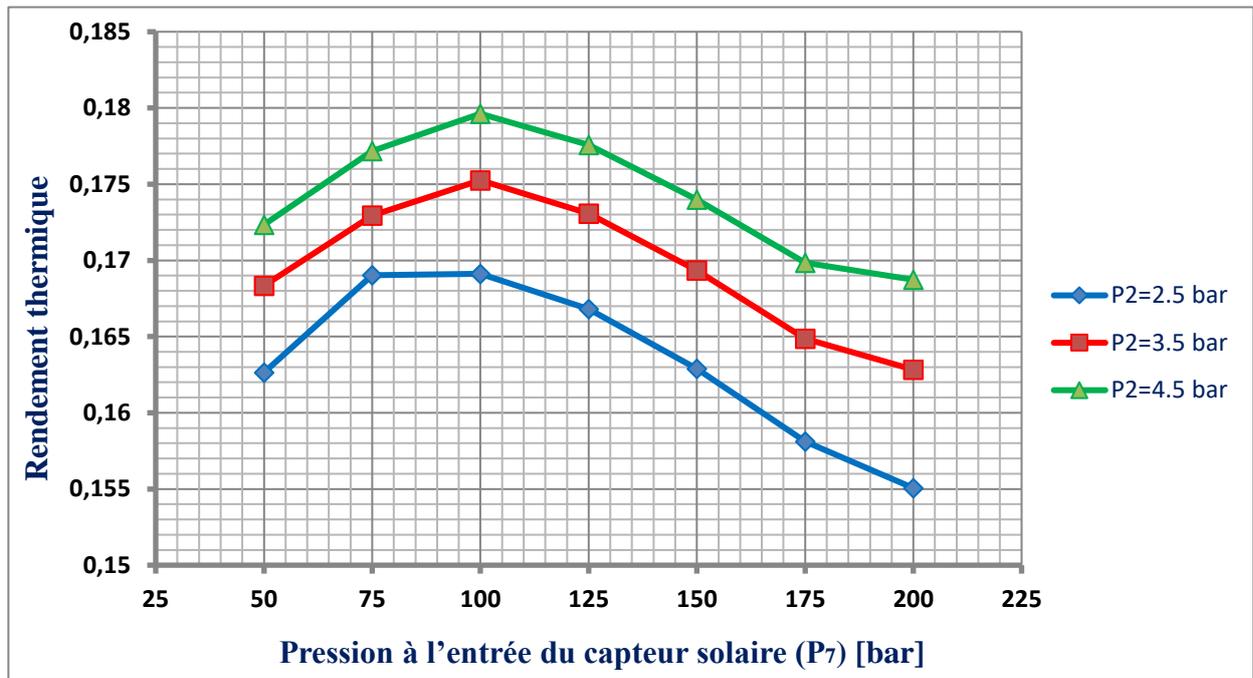


Figure III.5: Effet de la pression  $P_7$  sur le rendement

D'après la figure III.5 on conclut que la valeur de  $P_7$  qui nous donne le meilleur rendement thermique c'est 100 bar quelle que soit la valeur de  $P_2$ .

Pour cette étape, les paramètres qui nous donnent le meilleur rendement thermique sont illustrés dans le tableau III.2, et les paramètres de performance dans le tableau III.3 :

Etat	Fluide	$\dot{m}$ [kg/s]	T [°C]	P [bar]	x	Qualité	h [kJ/kg]	s [kJ/kg °C]
G1	H2O	60	98	5	-	0	15570,78	3,93
G2	H2O	60	98,07	10	-	0	15570,07	3,93
G3	H2O	60	75	10	-	0	15670,81	3,65
1	H2O-NH3	12	24,18	0,9	0,25	0	13032,78	3,424
2	H2O-NH3	12	24,21	5	0,25	0	13032,19	3,424
3	H2O-NH3	12	97,23	5	0,25	0,11349	12528,5	4,898
4	H2O-NH3	1,3172	97,23	5	0,85	1	4219,537	9,82
5	H2O-NH3	1,318	48,965	0,9	0,85	0,942	4449,59	9,947
6	H2O-NH3	10,682	97,23	5	0,185	0	13553,029	4,294
7	H2O-NH3	10,682	98,58	100	0,185	0	13539,036	4,294
8	H2O-NH3	10,682	292,11	100	0,185	0,676	11696,115	7,943
9	H2O-NH3	7,2035	292,11	100	0,2287	1	10799,043	8,764
10	H2O-NH3	7,2035	88,42	0,9	0,2287	0,793	11432,52	9,0735
11	H2O-NH3	12	85,985	0,9	0,25	0,717	11280,94	8,592
12	H2O-NH3	3,479	292,11	100	0,0941	0	13553,436	6,243

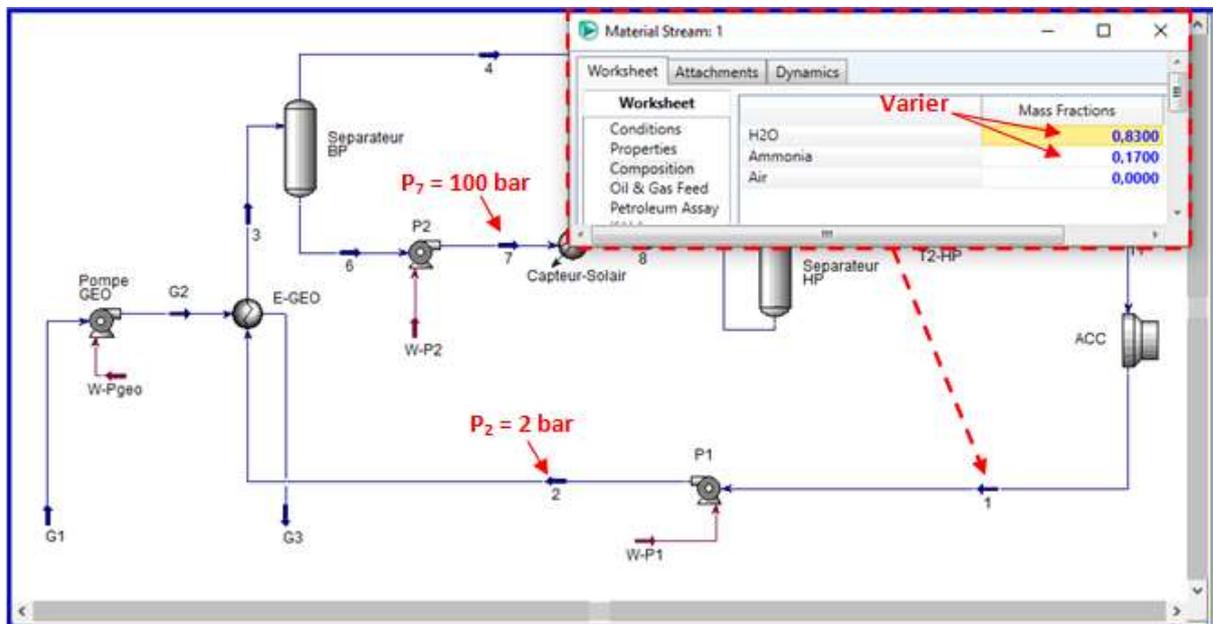
Tableau III.2 : Résultat de la simulation pour  $P_2 = 5$  bar et  $P_7 = 100$  bar

Paramètre	Valeur
La puissance de la turbine BP	303,025 [kW]
La puissance de la turbine HP	4563,27 [kW]
La puissance de la pompe BP	7,004 [kW]
La puissance de la pompe HP	149,485 [kW]
La puissance de la pompe géothermique	42,12 [kW]
La puissance nette de cycle	4667,7 [kW]
Quantité de chaleur géothermale	6044,304 [kW]
Quantité de chaleur solaire	19687,5 [kW]
Le rendement thermique	18,14 [%]

Tableau III.3 : Résultat des paramètres de performance pour  $P_2 = 5$  bar et  $P_7 = 100$  bar

### III.2.3 Effet de la concentration de l'ammoniac

La concentration de l'ammoniac dans les deux cas présents est 17 % (point 1), pour avoir l'effet de ce paramètre, nous augmentons cette valeur avec un pas de (1 %), jusqu'à on atteint à la valeur maximale (27 %). Cette valeur max est conditionnée par la température  $T_1 = 20$  °C (température de l'air à l'entrée de condenseur ACC). Les pressions  $P_2$  et  $P_7$  sont Constantes à 2 bar et 100 bar respectivement. (Voir la figure III.6).

Figure III.6 : Position de modification de la concentration  $\text{NH}_3$ 

La figure III.7 montre l'effet de la concentration de l'ammoniac sur les puissances produites par les turbines BP et HP, et le rendement thermique.

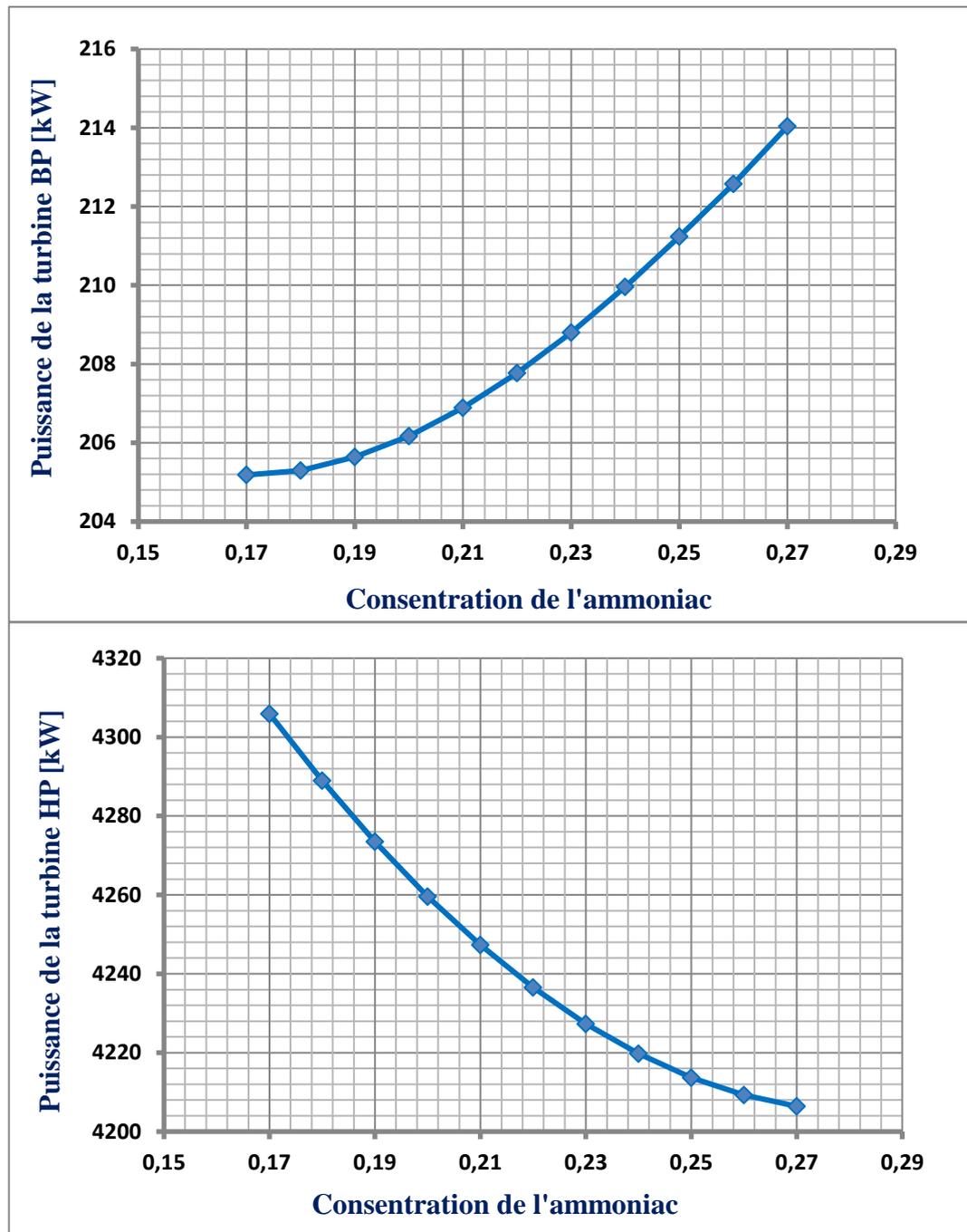


Figure III.7 : Effet de concentration de l'NH<sub>3</sub> sur les puissances des turbines

D'après la figure III.7, On constate que l'augmentation de la concentration de l'NH<sub>3</sub> va engendrer une amélioration de la puissance produite par la turbine BP, par contre une dégradation pour la turbine HP. Ceci est dû à l'augmentation de titre de vapeur du mélange après l'échangeur géothermique, donc une surélévation de débit qui traverse la turbine BP, avec une augmentation de la puissance. Par contre pour la turbine HP une diminution de débit et par conséquent la puissance.

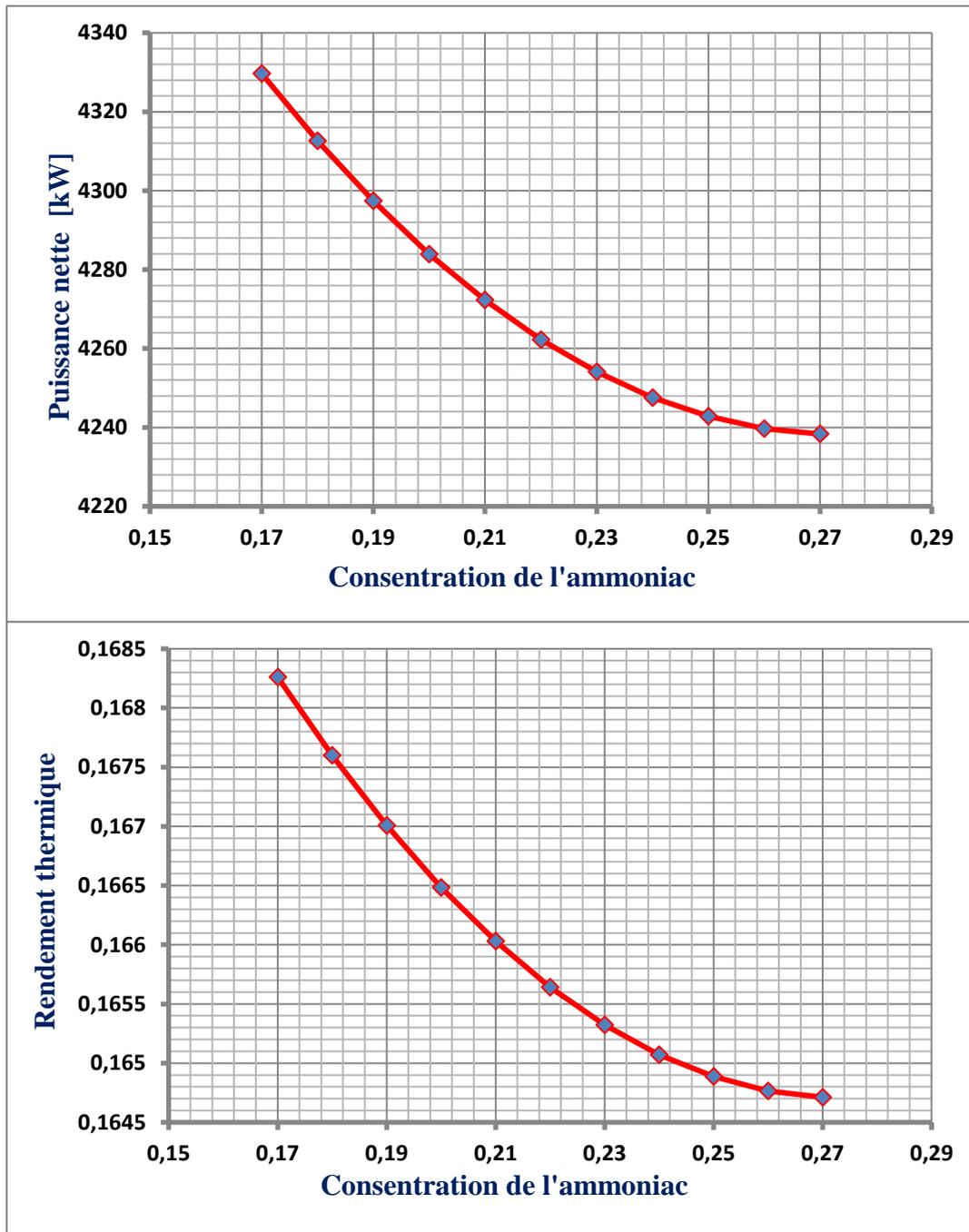


Figure III.8: Effet de concentration de l'NH<sub>3</sub> sur la puissance nette et le rendement

La Figure III.8 montre une diminution de la puissance nette avec l'augmentation de la concentration de l'NH<sub>3</sub>. C'est dû à la dégradation de la puissance produite par la turbine HP, qui constitue la majorité de la puissance nette, même si la puissance de la turbine BP est augmentée. Le rendement thermique a diminué un peu de même façon de la puissance nette, mais pas vraiment sensible.

Les paramètres donnant le meilleur rendement thermique dans ce cas, sont illustrés dans le tableau III.4, ainsi que les paramètres de performance (tableau III.5).

Etat	Fluide	$\dot{m}$ [kg/s]	T [°C]	P [bar]	x	Qualité	h [kJ/kg]	s [kJ/kg °C]
G1	H2O	60	98	5	-	0	15570,78	3,93
G2	H2O	60	98,07	10	-	0	15570,07	3,93
G3	H2O	60	75	10	-	0	15670,81	3,65
1	H2O-NH3	12	41,83	0,9	0,17	0	13880,26	3,551
2	H2O-NH3	12	41,84	2	0,17	0	13880,11	3,551
3	H2O-NH3	12	97,56	2	0,17	0,156	13686,45	5,03
4	H2O-NH3	1,838	97,56	2	0,6596	1	6345,97	10,267
5	H2O-NH3	1,838	70,35	0,9	0,6596	0,970	6457,59	10,32
6	H2O-NH3	10,16	97,56	2	0,0881	0	14648,24	4,05
7	H2O-NH3	10,16	98,58	100	0,0881	0	14634,70	4,05
8	H2O-NH3	10,16	301,91	100	0,0881	0,666	12697,29	7,842
9	H2O-NH3	6,7599	301,91	100	0,110	1	12017,178	8,659
10	H2O-NH3	6,7599	92,96	0,9	0,110	0,790	12654,15	8,966
11	H2O-NH3	12	89,91	0,9	0,17	0,730	12100,26	8,63
12	H2O-NH3	3,401	301,91	100	0,0443	0	14048,81	6,217

Tableau III.4 : Résultat de la simulation pour x = 17%

Paramètre	Valeur
La puissance de la turbine BP	205,182 [kW]
La puissance de la turbine HP	4305,917[kW]
La puissance de la pompe BP	1,829 [kW]
La puissance de la pompe HP	137,505 [kW]
La puissance de la pompe géothermique	42,12 [kW]
La puissance nette de cycle	4329,65 [kW]
Quantité de chaleur géothermale	6044,304 [kW]
Quantité de chaleur solaire	19687,5 [kW]
Le rendement thermique	16,82 [%]

Tableau III.5 : résultat de calcul des paramètres de performance pour x = 17%.

### III.2.4 Effet de l'enseillement direct incident (DNI)

L'effet de l'enseillement sur le rendement thermique de la centrale sera étudié dans cette partie. La pression d'entrée de l'échangeur géothermique, la pression d'entrée de capteur solaire et la concentration de l'NH3 sont fixes. Les valeurs considérées de l'enseillement sont de 100 à 1000 W/m<sup>2</sup> (Figure III.9).

Le calcul de la quantité de chaleur solaire en fonction des valeurs de l'DNI est présenté dans le tableau III.6.

l'enseillement direct incident [W/m <sup>2</sup> ]	La quantité de chaleur solaire [kW]
100	3937,5
200	7875
300	11812,5
400	15750
500	19687,5
600	23625
700	27562,5
800	31500
900	35437,5
1000	39375

Tableau III.6 : Quantité de Chaleur

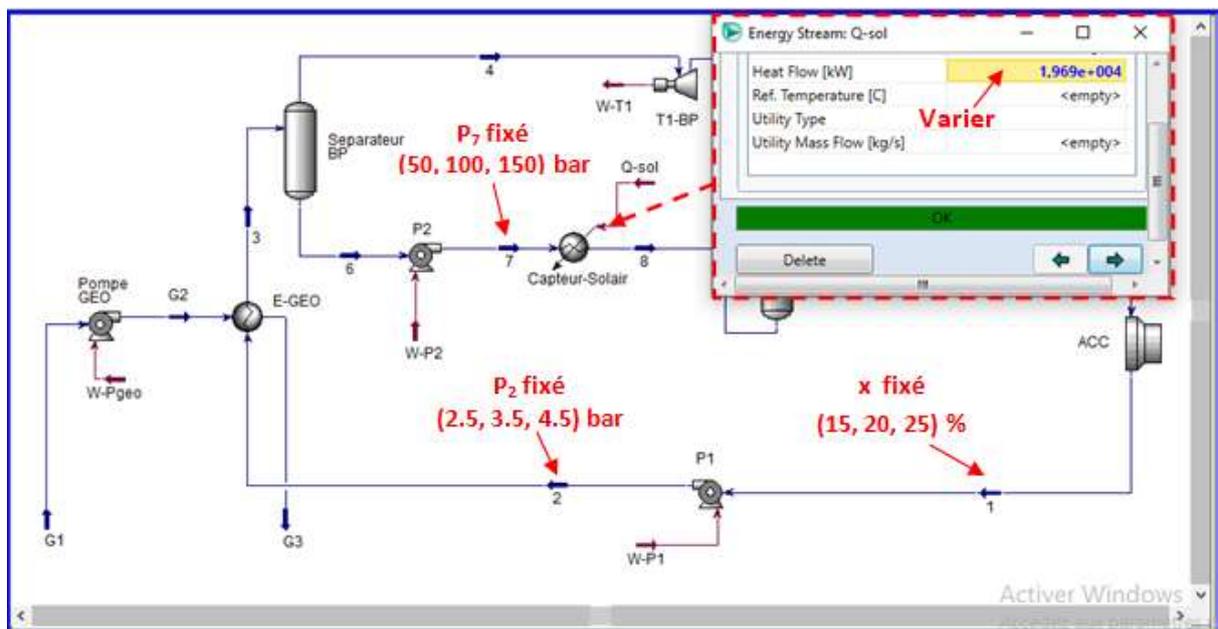


Figure III.9 : Position de modification de l'enseillement

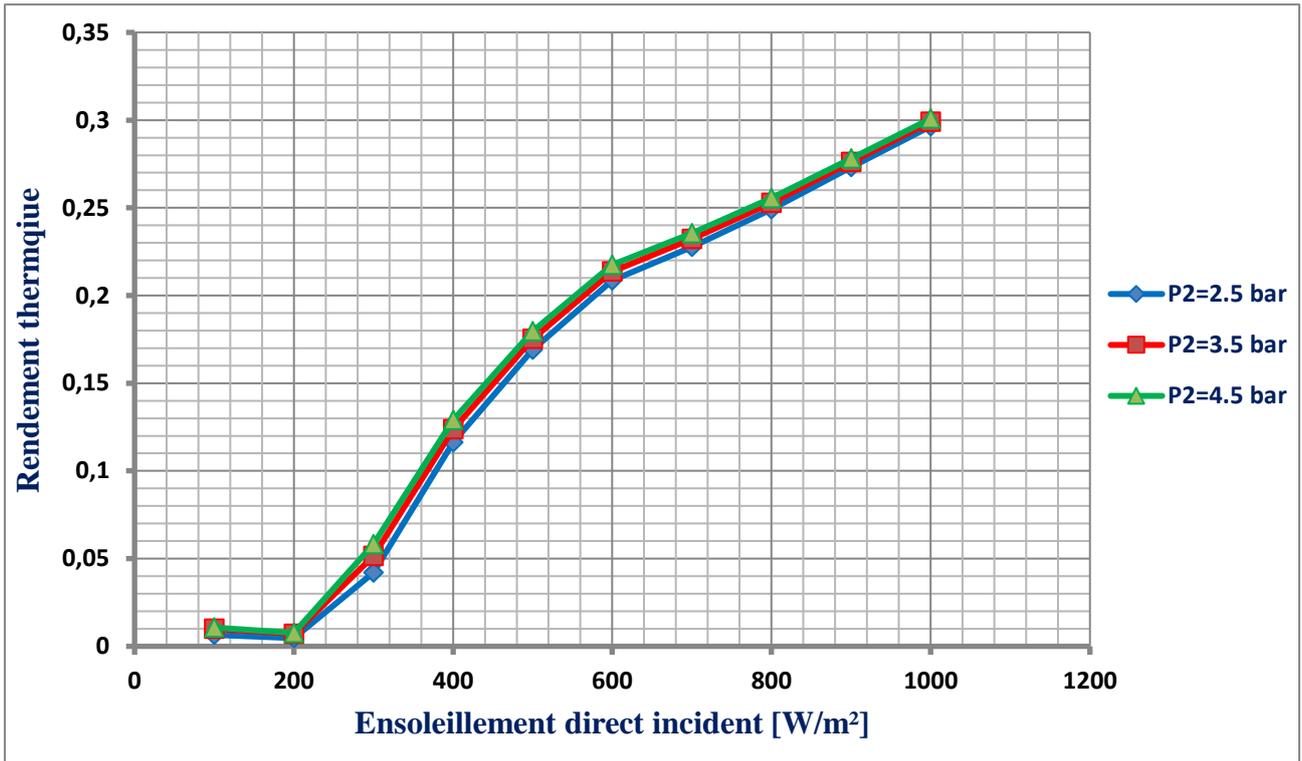


Figure III.10 : Effet l'ensoleillement sur le rendement thermique pour plusieurs valeurs de P2

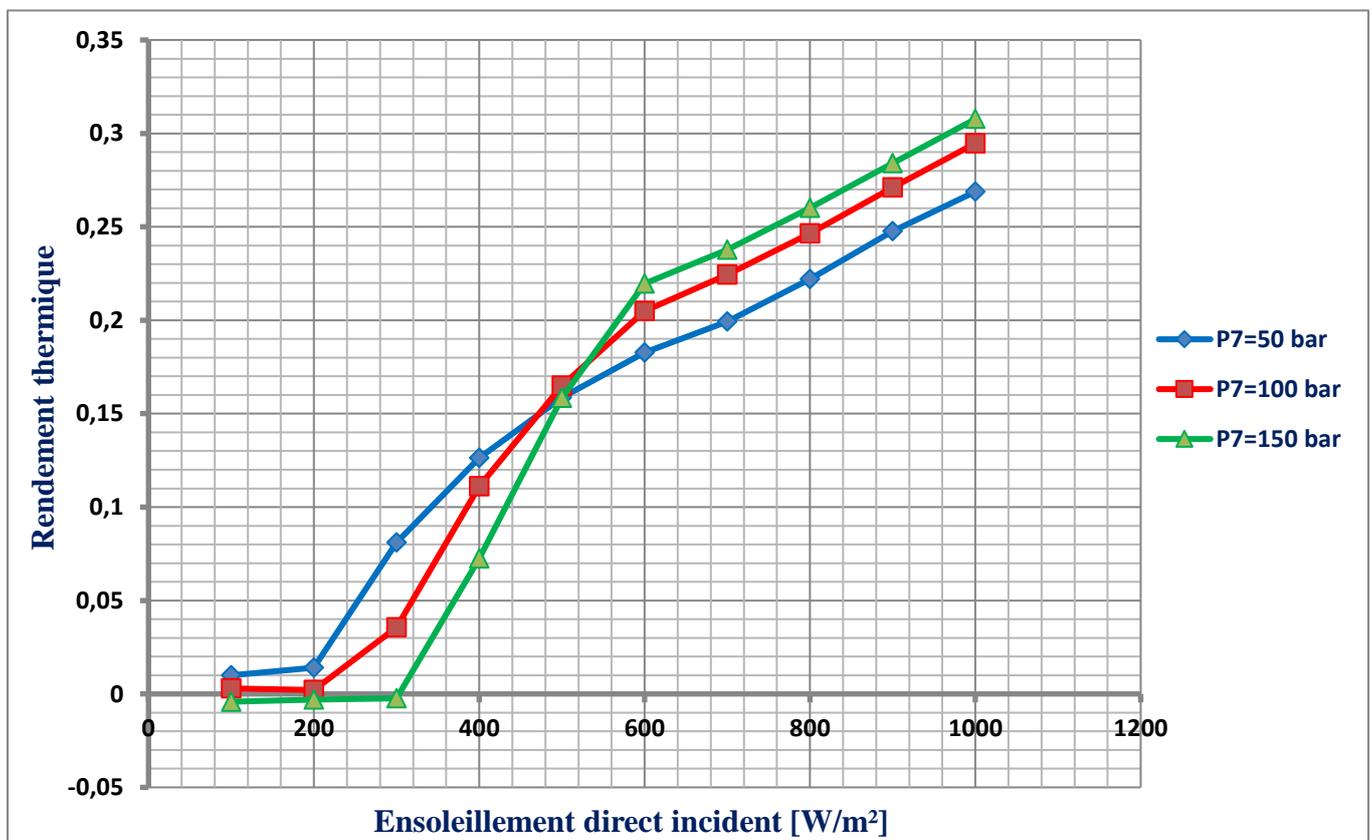


Figure III.11 : Effet l'ensoleillement sur le rendement thermique pour plusieurs valeurs de P7

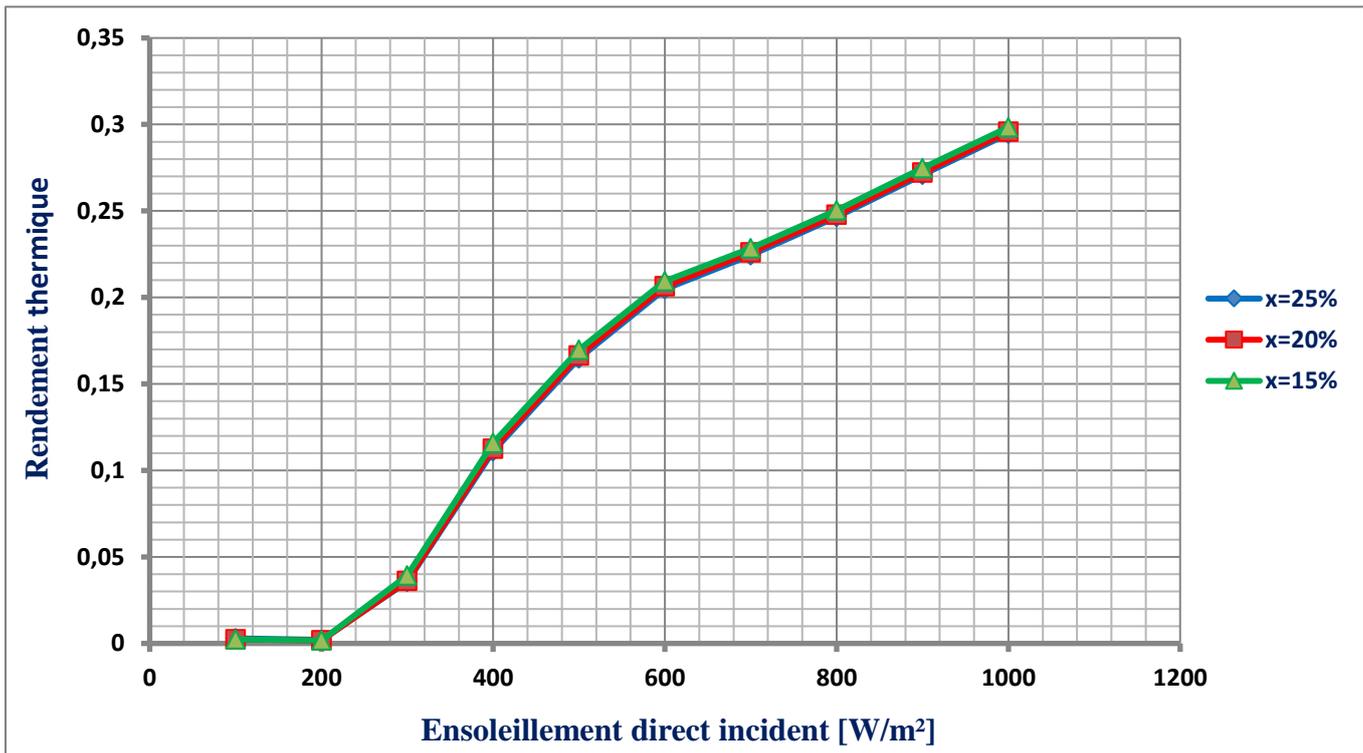


Figure III.12 : Effet l'ensoleillement sur le rendement thermique pour plusieurs valeurs de concentrations

A partir des figures III.10, III.11 et III.12 on remarque que le rendement thermique est proportionnel à l'ensoleillement direct incident (DNI) mais :

- Les effets de la pression  $P_2$  et la concentration sont presque négligeables par rapport à l'effet de l'DNI.
- Pour  $DNI = [100 ; 500]$ , le rendement thermique est inversement proportionnel à la pression  $P_7$  ( $\eta_{th}(P_7 = 50 \text{ bar}) > \eta_{th}(P_7 = 100 \text{ bar}) > \eta_{th}(P_7 = 150 \text{ bar})$ ). Par contre pour l'DNI =  $[500 ; 1000]$  le rendement thermique est proportionnel à la pression  $P_7$  ( $\eta_{th}(P_7 = 50 \text{ bar}) < \eta_{th}(P_7 = 100 \text{ bar}) < \eta_{th}(P_7 = 150 \text{ bar})$ ).
- 

Les paramètres donnant le meilleur rendement thermique dans ce cas, sont illustrés dans les tableaux III.7 et III.9, ainsi que les paramètres de performance dans les tableaux III.8 et III.10.

Etat	Fluide	$\dot{m}$ [kg/s]	T [°C]	P [bar]	x	Qualité	h [kJ/kg]	s [kJ/kg °C]
G1	H2O	60	98	5	-	0	15570,78	3,93
G2	H2O	60	98,07	10	-	0	15570,07	3,93
G3	H2O	60	75	10	-	0	15670,81	3,65
1	H2O-NH3	12	24,18	0.9	0,25	0	13032,78	3,424
2	H2O-NH3	12	24,21	2	0,25	0	13032,61	3,424
3	H2O-NH3	12	75,16	2	0,25	0,1688	12528,92	4,957
4	H2O-NH3	1,9612	75,16	2	0,837	1	4419,192	10,152
5	H2O-NH3	1,9612	54,336	0.9	0,837	0,972	4526,9	10,21
6	H2O-NH3	10,038	75,16	2	0,1436	0	14113,27	3,9426
7	H2O-NH3	10,038	75,71	50	0,1436	0	14106,52	3,9442
8	H2O-NH3	10,038	253,46	50	0,1436	0,6963	12145,38	8,0471
9	H2O-NH3	6,97459	253,46	50	0,1837	1	11219,02	9,059
10	H2O-NH3	6,97459	90,58	0.9	0,1837	0,8386	11789,97	9,336
11	H2O-NH3	12	86,30	0.9	0,25	0,7378	11232,11	8,727
12	H2O-NH3	3,064	253,46	50	0,0518	0	14253,924	5,743

Tableau III.7 : résultat de la simulation pour  $DNI = 500 \text{ W/m}^2$ 

Paramètre	Valeur
La puissance de la turbine BP	211,235 [kW]
La puissance de la turbine HP	3982,18 [kW]
La puissance de la pompe BP	1,879 [kW]
La puissance de la pompe HP	67,65 [kW]
La puissance de la pompe géothermique	42,12 [kW]
La puissance nette de cycle	4081,76737 [kW]
Quantité de chaleur géothermale	6044,304 [kW]
Quantité de chaleur solaire	19687,5 [kW]
Le rendement thermique	15,86 [%]

Tableau III.8 : résultat de calcul des paramètres de performance si  $DNI = 500 \text{ W/m}^2$ .

Etat	Fluide	$\dot{m}$ [kg/s]	T [°C]	P [bar]	x	Qualité	h [kJ/kg]	s [kJ/kg °C]
G1	H2O	60	98	5	-	0	15570,78	3,93
G2	H2O	60	98,07	10	-	0	15570,07	3,93
G3	H2O	60	75	10	-	0	15670,81	3,65
1	H2O-NH3	12	24,18	0.9	0,25	0	13032,78	3,424
2	H2O-NH3	12	24,21	2	0,25	0	13032,19	3,424
3	H2O-NH3	12	75,16	2	0,25	0,1688	12528,92	4,957
4	H2O-NH3	1,9612	75,16	2	0,837	1	4419,192	10,152
5	H2O-NH3	1,9612	54,336	0.9	0,837	0,972	4526,9	10,21
6	H2O-NH3	10,038	75,16	2	0,1436	0	14113,27	3,9426
7	H2O-NH3	10,038	76,87	150	0,1436	0	14092,48	3,947
8	H2O-NH3	10,038	867,08	150	0,1436	1	10170,20	10,3636
9	H2O-NH3	10,038	867,08	150	0,1436	1	10170,20	10,3636
10	H2O-NH3	10,038	224,16	0.9	0,1436	1	11566,50	10,933
11	H2O-NH3	12	85,985	0.9	0,25	1	10415,995	10,921
12	H2O-NH3	-	-	-	-	-	-	-

Tableau III.9 : Résultat de la simulation pour  $DNI = 1000 \text{ W/m}^2$ 

Paramètre	Valeur
La puissance de la turbine BP	211,235 [kW]
La puissance de la turbine HP	14017,21 [kW]
La puissance de la pompe BP	1,879 [kW]
La puissance de la pompe HP	208,60 [kW]
La puissance de la pompe géothermique	42,12 [kW]
La puissance nette de cycle	13975,8519 [kW]
Quantité de chaleur géothermale	6044,304 [kW]
Quantité de chaleur solaire	39375 [kW]
Le rendement thermique	30,77 [%]

Tableau III.10 : Résultat de calcul des paramètres de performance pour  $DNI = 1000 \text{ W/m}^2$ .

# **Conclusion Générale**

## **Conclusion générale**

Dans ce travail, on a étudié l'effet de quelques paramètres (Pression, concentration de l'ammoniac, l'ensoleillement direct incident) sur les performances d'une centrale hybride solaire-géothermique qui fonctionnée selon le cycle Kalina, le fluide de travail contient deux éléments (eau-ammoniac) et une source géothermique à une température de 98 °C (Hammam Meskoutine, Guelma). Le logiciel HYSYS a été utilisé pour la modélisation du problème.

D'après les simulations effectuées sur notre installation, on peut tirer quelques conclusions intéressantes à savoir :

- A un ensoleillement direct incident constat ( $500 \text{ W/m}^2$ ), l'augmentation de la pression avant l'échangeur géothermique influé positivement sur le rendement thermique du cycle. Par contre l'accroissement de la pression avant le champ solaire peut engendrer une dégradation du rendement thermique.
- Prendre une concentration élevée d'ammoniaque (plus de 27%) est nécessaire à une température de condensation faible (moins de 20 °C). Pour notre installation la valeur le plus faible de la concentration d' $\text{NH}_3$  est de (17 %), mais donner relativement de bonnes rendements thermiques.
- L'augmentation de l'ensoleillement direct incident pendant la journée (de 100 à 1000  $\text{W/m}^2$ ) augmente la valeur du rendement thermique (de 0 à 30,77 %). Pour générer d'électricité à partir d'un DNI faible (100,200 et 300  $\text{W/m}^2$ ), la pression avant le champ solaire doit être diminuée (moins de 50 bar).

# **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

- [1] MISSEMER, Antoine, et al. Les Économistes et la fin des énergies fossiles (1865-1931). 2017.
- [2] <https://www.connaissancedesenergies.org/> date 12/08/2020
- [3] CHERIGUI, Abdel-Nasser. Les Energies du futur en Algérie: sécurité, enjeux et perspectives. 2009.
- [4] M'RAOUI, A., et al. Etude statistique du rayonnement solaire à Alger. Revue des Energies Renouvelables, 2011, 14.4: 637-648
- [5] Sellami, R., et al. "Market potential and development prospects of the solar water heater field in Algeria." Renewable and Sustainable Energy Reviews 65 (2016): 617-625.
- [6] BELGACEM, Tahchi. Desertec et/ou Medgrid, telle est la question. Outre-Terre, 2012, 3: 401-412.
- [7][8] SAID, D. I. A. F. Bilan. 2018.
- [9] OUALI, S.; KHELLAF, A.; BADDARI, K. Etude des ressources géothermiques du sud algérien. Revue des énergies renouvelables, 2007, 10.3: 407-414.
- [10] BOUNDS, Martin. SODIS-Désinfection de l'eau par le Solaire. 2012.
- [11] <https://solutions-alternatives.org/> 05/08/2020
- [12] BENALOUACHE, Nadia. L'énergie solaire pour la production d'électricité au Maghreb: transition énergétique et jeux d'échelles. 2017. PhD Thesis. Aix-Marseille.
- [13] <https://www.varmatin.com/> 25/08/2020
- [14] KHEDARI, J., et al. D-abaque: une méthode simple de dimensionnement d'un système de chauffage domestique, partiellement solaire, utilisant un mur capteur-accumulateur. Revue générale de thermique, 1993, 32: 253-253.
- [15] <http://eliogen.com/> 01/09/2020
- [16] BOUZIDI, Khedidja. Recherche et Développement Géothermie, Énergie d'Avenir et ses Perspectives au Sud de l'Algérie. Energies Renouvelables, 2006, 18.
- [17] <https://www.qualit-enr.org/> 01/09/2020
- [18] PELLECUER, Bernard. Energies renouvelables et agriculture: perspectives et solutions pratiques. France Agricole Editions, 2007.
- [19] <https://www.semanticscholar.org/>01/09/2020

- [20] CHABOT BERGERON, Anne, et al. Évaluation du potentiel de génération d'électricité géothermique en Gaspésie: régions de la vallée de la Matapédia et de Gaspé: Rapport final. 2016.
- [21] <https://www.maxicours.com/> 03/09/2020
- [22] AUROUSSEAU, Antoine. Modélisation dynamique et régulation des centrales solaires thermodynamiques linéaires à génération directe de vapeur. 2016. PhDThesis.
- [23] <https://www.evwind.es/> 03/09/2020
- [24] TEMPLALI, Yacine. Maroc–La centrale solaire de Ouarzazate: le triomphe du capitalisme “vert” et la privatisation de la nature (contribution). mars, 2016, 12: 22.
- [25] <https://www.wbez.org/> 04/09/2020
- [26] SALLES, Anne. La transition énergétique allemande: entre avancées et obstacles. Allemagne d'aujourd'hui, 2019, 1: 7-21.
- [27] <http://www.ecotippingpoints.com/> 05/09/2020
- [28] FARGES, Olivier. Conception optimale de centrales solaires à concentration: application aux centrales à tour et aux installations " beam down ". 2014. PhDThesis. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux.
- [29] <https://www.e-education.psu.edu/> 05/09/2020
- [30] <https://www.alamy.com/> 06/09/2020
- [31] HADDADI, Baptiste. Ascension et dégazage des magmas basaltiques: application aux volcans d'Islande et de la Chaîne des Puys (France). 2016. PhD Thesis.
- [32] <https://www.northbound.is/> 06/09/2020
- [33] MANENTE, Giovanni, et al. Hybrid solar-geothermal power generation to increase the energy production from a binary geothermal plant. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2011. p. 109-119.
- [34] LEMORT, M. Vincent, et al. Étude de la faisabilité des cycles sous-critiques et supercritiques de Rankine pour la valorisation de rejets thermiques.
- [35] DJEMAA, A.; MERABET, A.; KHEMIS, O. Utilisation De L'énergie Géothermale-Solaire Pour La Production D'électricité En Algérie.
- [36] ROWSHANAIE, Omid, et al. Producing Large-Scale Electricity by Using a ORC (Organic Rankine Cycle) Which Driven by R245fa, NOVEC7000, And R141b as Working Fluids through a Fluegas of Boilers.
- [37] HMAD, Moghees; KARIMI, M. N. Thermodynamic Analysis of Kalina Cycle. Int. J. Sci. Res, 2016, 5: 2244-2249.

- [38] GANESH, N. Shankar; T. SRINIVAS, Optimized Kalina cycle. In: *Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering-2010*. IEEE, 2010.p. 252-256.
- [39] KALINA, Alexander I. Combined cycle and waste heat recovery power systems based on a novel thermodynamic energy cycle utilizing low-temperature heat for power generation. In : *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. American Society of Mechanical Engineers, 1983. p. V001T02A003.
- [40] [www.semanticscholar.org/paper/Dual-Temperature-Kalina-Cycle-for-Geothermal-Solar-G](http://www.semanticscholar.org/paper/Dual-Temperature-Kalina-Cycle-for-Geothermal-Solar-G) (12/08/2020)
- [41] MADHAWA HETTIARACHCHI, H. D., GOLUBOVIC, Mihajlo, WOREK, William M., et al. The performance of the Kalina cycle system 11 (KCS-11) with low-temperature heat sources. 2007.
- [42] [www.visualengineerinfo.com/2020/03/kalina-cycle-power-plant-how-does-it.html](http://www.visualengineerinfo.com/2020/03/kalina-cycle-power-plant-how-does-it.html) (12/08/2020)
- [43] WANG, Enhua et YU, Zhibin. A numerical analysis of a composition-adjustable Kalina cycle power plant for power generation from low-temperature geothermal sources. *Applied Energy*, 2016, vol. 180, p. 834-848.
- [44] Aspen HYSYS V8.8 help.