



UNIVERSITE KASDI-MERBAH OUARGLA

FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE

ET SCIENCES DE LA MATIERE

DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDE

**Mémoire du Projet de Fin d'Etude pour l'Obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat**

Option : Génie chimique

Présenté par

Djeridi Moufida

Niboua Nadia

Thème :

*Conversion de l'énergie géothermique en
énergie électrique par un cycle binaire dans
Le sud Algérien*

Soutenue publiquement le : 19/06/2010 devant le jury composé de :

| | | |
|---------------------------------|-----------------------------|------------------|
| Mr : Bennouna Abdel Aziz | université d'Ouargla | Président |
| Mr : Baameur Lotfi | université d'Ouargla | Examineur |
| M : Ghiaba Zineb | université d'Ouargla | Examineur |
| Mr : Chennouf Nasreddine | université d'Ouargla | Encadreur |

2009 - 2010

Résumé:

Dans ce travail nous nous intéressons à l'étude d'un système de production de l'énergie électrique, à partir de l'énergie géothermique à basse température dans la région d'Ouargla.

Le modèle adopté dans ce mémoire (le cycle binaire) nous a donné des résultats intéressants avec une température de fonctionnement de 30°C, et un rendement de la turbine de 70%, mais une étude économique pour la réalisation d'une centrale géothermique à cycle binaire reste à faire.

Mots clés : énergie renouvelable, énergie géothermique, cycle binaire, énergie électrique.

المخلص:

في هذا العمل نحن مهتمون بدراسة نظام لتوليد الكهرباء من الطاقة الحرارية الأرضية في درجات الحرارة المنخفضة في منطقة ورقلة.
وأعطى النموذج المعتمد في هذه الدراسة (دورة ثنائية) لنا بعض النتائج المثيرة للاهتمام مع درجة حرارة التشغيل 30 درجة مئوية وكفاءة التوربينات 70 % ، ولكن دراسة اقتصادية لتحقيق محطة للطاقة الحرارية في دورة ثنائي لا يزال يتعين القيام به .

مفاتيح البحث: الطاقة المتجددة الطاقة الحرارية الأرضية، دورة الثنائية، الطاقة الكهربائية.

SOMMAIRE

| | |
|----------------------------|--|
| Remerciement | |
| Dédicaces | |
| Sommaire..... | |
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Symboles..... | |
| Introduction générale..... | |

Chapitre I : Les énergies renouvelables

| | |
|--|----|
| I-1-Introduction | 01 |
| I-2-Les énergies renouvelables..... | 01 |
| I-2-1-L'énergie solaire | 01 |
| I-2-1-1-l'énergie solaire passive..... | 02 |
| a) Avantage | 03 |
| b) Inconvénient | 03 |
| c) Utilisation..... | 03 |
| I-2-1-2-L'énergie solaire photovoltaïque | 04 |
| a)Avantage | 04 |
| b) Inconvénient | 04 |
| c) Utilisation..... | 04 |
| I-2-1-3- L'énergie solaire thermique | 05 |
| a)Avantage | 05 |
| b) Inconvénient | 05 |
| c) Utilisation..... | 05 |
| I-2-2- L'énergie éolienne..... | 06 |

| | |
|---|----|
| I-2-2-1-Les éolienne à axe horizontal | 06 |
| I-2-2-2-Les éoliennes à axe vertical..... | 07 |
| a) avantage..... | 08 |
| b) Inconvénient..... | 08 |
| c) Utilisation..... | 08 |
| I-2-3-L'énergie hydraulique..... | 09 |
| a) Avantage..... | 10 |
| b) Inconvénient..... | 10 |
| c) Utilisation..... | 10 |
| I-2-4- Biomasse et déchet..... | 10 |
| I-2-4-1-Les biocarburants..... | 11 |
| a) Avantage..... | 11 |
| b) Inconvénients | 11 |
| I-2-4-2-Les bois (biocombustible)..... | 12 |
| a) Avantages | 12 |
| b) Inconvénients | 12 |
| I-2-4-3- Le biogaz | 12 |
| a)Avantages | 13 |
| b) Inconvénients | 13 |
| c) Utilisation..... | 13 |
| I-2-5- L'énergie géothermique..... | 14 |
| a) Avantages | 14 |
| b) Inconvénient..... | 15 |
| c) Utilisation..... | 15 |
| I-3-Situation actuelle..... | 16 |

Chapitre II : L'énergie géothermique

| | |
|---|----|
| II-1-Introduction..... | 18 |
| II-2-Histoire..... | 18 |
| II-3-L'origine de l'énergie géothermique..... | 19 |
| II-4-Définition de la géothermie..... | 19 |
| II-4-1- flux géothermique | 20 |

| | |
|---|----|
| II-4-2-gradient géothermique | 21 |
| II-5- principe de la géothermie..... | 24 |
| II-6- Principaux types de ressources géothermiques..... | 24 |
| II-6-1- Réservoirs de vapeur..... | 24 |
| II-6-2-Réservoirs d'eau chaude | 24 |
| II-6-3- La géothermie des roches fracturées..... | 25 |
| II-7 -Types de géothermie | 25 |
| II-7-1-La géothermie haute énergie | 25 |
| II-7-2- La géothermie moyenne énergie..... | 26 |
| II-7-3-Géothermie basse énergie..... | 27 |
| II-7-4-Géothermie très basse énergie..... | 28 |
| II-8-Utilisation et l'importance de la géothermie | 29 |
| II-9-l'application de La géothermie dans le monde..... | 30 |
| II-9-1-Habitat, santé et loisirs..... | 30 |
| II-9-2-Agriculture et alimentation..... | 31 |
| II-9-3-Industrie..... | 31 |
| II-10-L'énergie géothermique dans le sud Algérien..... | 32 |
| II-10-1-Contexte géologique de la région d'Ouargla..... | 32 |
| II-10-2- L'énergie géothermique dans la région Ouargla..... | 33 |
| II-10-3 Caractéristiques du forage thermales d'Ouargla..... | 34 |

Chapitre III : Transformation d'énergie géothermique à basse température

| | |
|--|----|
| III-1-Introduction..... | 36 |
| III-2- production d'électricité géothermale | 36 |
| III-2-1-1-Cycle binaire | 36 |
| III-2-2-Exemple sur les centrales géothermiques..... | 37 |
| III-2-2-1-Expérience de la Roumanie..... | 37 |
| III-3-Le cycle de Rankine..... | 38 |
| III-3-1-Le cycle de Rankine réel | 38 |
| III-3-2- Le cycle de Rankine idéal | 39 |

| | |
|--|----|
| III-4-Décomposition du système | 39 |
| III-4-1-Définition les composants de cycle | 40 |
| III-4-1-1-L'évaporateur | 40 |
| III-4-1-1-1-Les types d'évaporateur | 41 |
| III-4-1-2-les turbines..... | 42 |
| III-4-1-2-1-Le choix de turbine..... | 42 |
| III-4-1-2-2-Les types de turbines..... | 43 |
| III-4-1-3-alternateur..... | 44 |
| III-4-1-4 La condenseur..... | 44 |
| III-4-1-5- La pompe..... | 45 |
| III-5-Fluide de travaille..... | 46 |
| III-5-1-Les fluides frigorigènes | 46 |
| III-5-2-Choix du fluide frigorigène | 48 |
| III-5-2-1-L'eau comme fluide frigorigène | 48 |
| III-5-2-2- Le dichlorodifluoro méthane..... | 49 |
| III-5-2-2-1-Propriétés..... | 50 |
| III-5-2-2-2- Utilisation | 50 |
| III-5-2-3- Dioxyde de carbone..... | 50 |
| III-5-2-3-1-Propriétés..... | 51 |
| III-5-2-3-2-Utilisation..... | 52 |

Chapitre IV : Application et décision du résultat

| | |
|---|----|
| IV-1-Introduction | 54 |
| IV-2-Le cycle proposé | 54 |
| IV-2-1- le rendement de la turbine..... | 55 |
| IV-2-2-Premier principe de la thermodynamique | 55 |
| IV-2-3-Définition de la chaleur et du travail..... | 55 |
| IV-2-4-Conservation de la masse du système | 55 |

| | |
|---|----|
| IV-2-5-Point de saturation..... | 56 |
| IV-2-6-L'enthalpie spécifique de vaporisation | 56 |
| IV-2-7- définit le titre de la vapeur | 56 |
| IV-2-8-Diagramme T-S..... | 56 |
| IV-2-9-Chaleur de vaporisation | 58 |
| IV-3-L'application | 58 |
| 1-calcule le débit d'eau nécessaire..... | 58 |
| 2-Calcule le rendement de la turbine..... | 58 |
| 3-Calcule la détente de la turbine | 69 |
| 4-Calcule le débit d'eau nécessaire | 71 |
| 5- Calcule la puissance électrique | 73 |

Conclusion générale

Références bibliographiques

Annexe 1

Annexe 2

Liste de figure

Chapitre I : Les énergies renouvelables

| | |
|---|----|
| Figure (I-1) : L'énergie solaire | 02 |
| Figure (I-2) : L'énergie Éolienne | 06 |
| Figure (I-3) : L'énergie Éolienne à axe horizontal | 07 |
| Figure (I-4) : L'énergie Éolienne à axe vertical | 08 |
| Figure (I-5) : L'énergie hydraulique | 09 |
| Figure (I-6) : la biomasse | 10 |
| Figure (I-7) : L'énergie géothermique | 11 |
| Figure (I-8) : énergie renouvelable dans le monde en 2005 | 12 |

Chapitre II : L'énergie géothermique

| | |
|---|----|
| Figure (II -1) : la variation entre la température et la profondeur | 23 |
| Figure (II-2) : différents types d'utilisation | 29 |
| Figure (II-3) : Situation géographique de la région d'étude | 35 |

Chapitre III : Transformation d'énergie géothermique à basse température

| | |
|---|----|
| Figure (III-1) : Schéma simplifié d'un cycle binaire | 36 |
| Figure (III-2) : Schéma simplifié de la centrale géothermique | 37 |
| Figure (III-3) : Schéma simplifié d'un cycle de Rankine | 39 |
| Figure (III-4) : Schéma simplifié L'évaporateur | 40 |
| Figure (III-5) : Schéma simplifié de la turbine | 42 |
| Figure (III-6) : Schéma simplifié d'alternateur | 43 |
| Figure (III-7) : Schéma simplifié de condenseur | 44 |
| Figure (III-8) : Schéma simplifié d'une pompe | 45 |

Chapitre IV : Application et décision du résultat

Figure (IV-1) : Schéma simplifié d'un cycle de Rankine 54

Figure (III-2) : Le diagramme des phases de fluide 56

Figure (IV-3) : Le diagramme de Moulées de gaz CO₂ 57

Figure (IV-4) : La variation de débit d'eau en fonction du débit de CO₂ et l température de sortie d'eau pour une température de CO₂ de 10 °C (Pour un rendement d'évaporations 100%). 60

Figure (IV-5) : La variation de débit d'eau en fonction du débit de CO₂ et la température de sortie d'eau pour une température de CO₂ de 10°C (pour un rendement d'évaporations 80%).... 62

Figure (IV-6) : le rendement de la turbine en fonction de la détente..... 65

Figure (IV-7) : le rendement de la turbine en fonction de la chaleur d'évaporateur 65

Figure (IV- 8) : le rendement de la turbine en fonction de la détente 66

Figure (IV- 9) : le rendement de la turbine en fonction de la chaleur d'évaporateur 67

Figure (IV- 10) le rendement de la turbine en fonction de la détente 68

Figure (IV- 11) : le rendement de la turbine en fonction de la chaleur d'évaporateur 68

Figure (IV-12-a) la variation de la puissance électrique produit en fonction de débit de CO₂. ... 74

Figure (IV- 12-b) la variation de la puissance électrique produit en fonction de débit de CO₂... 75

Liste de tableaux

Chapitre I : Les énergies renouvelables

| | |
|---|----|
| Tableau (I-1) : la production et la consommation d'énergie renouvelable | 17 |
|---|----|

Chapitre II : L'énergie géothermique

| | |
|---|----|
| Tableau (II-1) : Caractéristiques du forage thermale d'Ouargla..... | 34 |
|---|----|

Chapitre III : Transformation d'énergie géothermique à basse température

| | |
|--|----|
| Tableaux (III-1) : quelque fluide frigorigène | 48 |
| Tableaux (III-2) : caractéristique principale de R12 | 49 |
| Tableaux (III-3) : caractéristique principale de CO ₂ | 51 |

Chapitre IV : Application et décision du résultat

| | |
|---|----|
| Tableau (IV-1) : la variation de débit d'eau à partir de la température de sortie de l'eau pour différent débit de CO ₂ ($\eta_e = 100\%$)..... | 59 |
| Tableau (IV-2) : la variation de débit d'eau à partir de la température de sortie de l'eau pour différent débit de CO ₂ ($\eta_e = 100\%$)..... | 61 |
| Tableau (IV-3) : le rendement de la turbine à partir la détente et l'énergie échappement de l'évaporateur | 64 |
| Tableau (IV- 4) : Le rendement de la turbine à partir la détente et l'énergie échappement..... | 66 |
| Tableau (IV-5) : le rendement de la turbine à partir la détente et l'énergie échappement | 67 |
| Tableau (IV- 6) : Les valeurs de l'enthalpie de fluide à la sortie de la turbine en fonction de la température de fluide à l'entré Pour un rendement fixé = 70% | 69 |
| Tableau (IV- 7) : Les valeurs de l'enthalpie de fluide à la sortie de la turbine en fonction de la température de fluide à l'entré Pour un rendement fixé = 60%..... | 70 |

| | |
|---|----|
| Tableau (IV-8) : Les valeurs de l'enthalpie de fluide à la sortie de la turbine en fonction de la température de fluide à l'entrée Pour un rendement fixé = 50% | 70 |
| Tableau (IV- 9) : la variation de débit d'eau en fonction de la température de sortie d'eau Pour un rendement fixé = 70%..... | 71 |
| Tableau (IV-10) : la variation de débit d'eau en fonction de la température de sortie d'eau Pour un rendement fixé = 60% | 72 |
| Tableau (IV - 11) : la variation de débit d'eau en fonction de la température de sortie d'eau Pour un rendement fixé = 50% | 72 |
| Tableau (IV-12) : la variation de la production électrique en fonction de débit CO ₂ Pour un rendement fixé = 70% | 73 |
| Tableau (IV-13) : la variation de la production électrique en fonction de débit CO ₂ Pour un rendement fixé = 60% | 73 |
| Tableau (IV-14) : la variation de la production électrique en fonction de débit C Pour un rendement fixé = 50% | 72 |
| Tableau (IV-15) : la variation de la production électrique en fonction de débit C Pour un rendement fixé = 50%. | 75 |

Symboles

| Symboles | Désignations | Unités |
|---------------------|---|------------------------|
| C_p | Chaleur spécifique à pression constante | [kJ/kg [°] K] |
| g_G | Gardienne géothermique | [°C/ m] |
| q_G | Flux géothermique | [W/m ²] |
| T | Température | [°C] |
| T_{fluide} | Température de fluide | [°C] |
| T_s | Température de sortie d'eau | [°C] |
| ΔT | La différence entre température | [°C] |
| \dot{m}_{CO_2} | Débit massique de CO ₂ | [kg/s] |
| \dot{m}_{H_2O} | Débit massique de H ₂ O | [kg/s] |
| P | Pression | [atm] |
| X | fraction massique | [-] |
| h_v | Enthalpie massique de vapeur | [kJ/kg] |
| h_L | Enthalpie massique de liquide | [kJ/kg] |
| Δh | Écart entre deux valeurs d'enthalpie | [kJ/kg] |
| h_{MAX} | Enthalpie massique maximum de la vapeur CO ₂ | [kJ/kg] |
| S_v | Entropie massique de vapeur | [KJ/Kg.°K] |
| S_L | Entropie massique de liquide | [KJ/Kg.°K] |
| S_C | Entropie massique de vapeur qui sort une turbine | [KJ/Kg.°K] |
| W_t | Travail de l'évaporateur dans cycle sans surchauffe | [kJ/kg] |
| W_1 | Travail de l'évaporateur | [KJ/Kg] |
| W_2 | Travail de CO ₂ à la phase vapeur | [KJ/Kg] |
| W_{AB} | La somme de travail W_1 et W_2 | [KJ/Kg] |
| Q | Flux de chaleur | [KJ/Kg] |
| η_e | Rendement de l'évaporateur | [%] |
| η_T | Rendement de la turbine | [%] |
| λ | Conductivité thermique | [W/m.°K] |



INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale :

La géothermie est une énergie renouvelable bien connue pour son utilisation comme chauffage et un peu moins pour sa production d'électricité. C'est bien dommage car elle possède de nombreux atouts pour produire des Mégawatt d'électricité sans combustible, à faibles coûts et proprement.

L'énergie thermique de la chaleur de la terre est utilisée depuis la nuit des temps, mais la géothermie de haute énergie, qui produit de l'électricité, existe seulement depuis le début du siècle précédent. Avant les hommes se contentaient d'utiliser les sources d'eau chaude ou plus rarement l'eau sous pression des geysers ou des fumerolles qu'ils utilisaient pour le chauffage, la cuisson d'aliments ou les thermes.

Le premier à avoir produit un courant électrique à partir de la géothermie est Ginori Conti en 1904 à Larderello (Italie). La géologie exceptionnelle de ce site est connue pour ses sources géothermales et son activité volcanique depuis l'époque romaine.

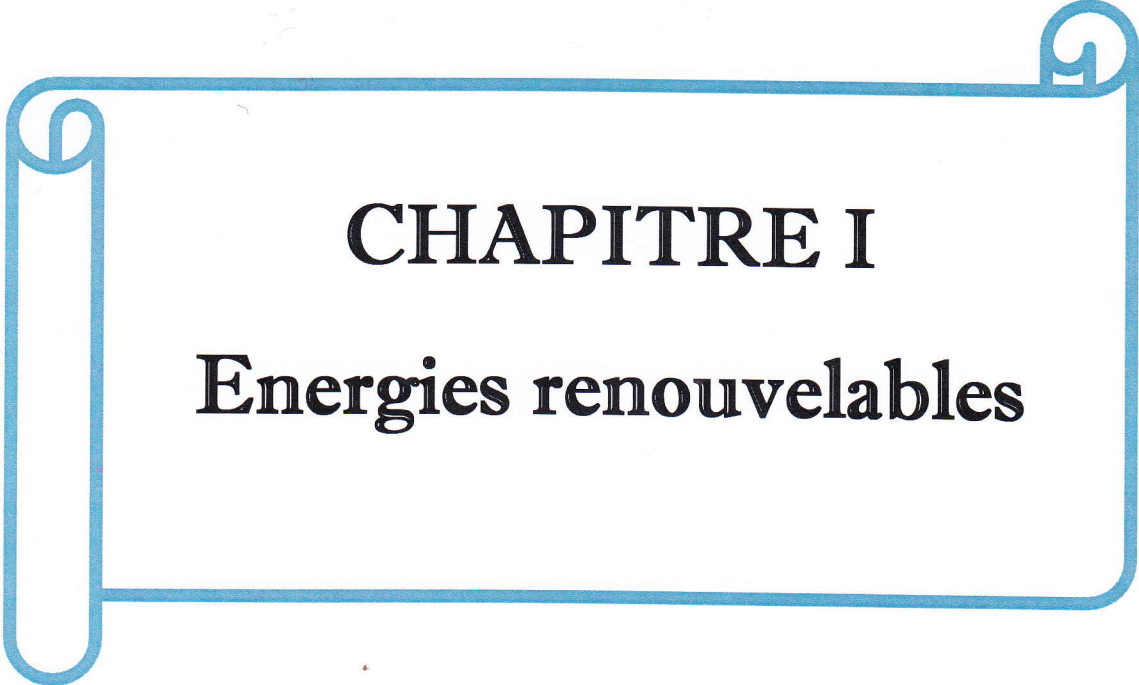
Les ressources géothermiques en Algérie sont de basse enthalpie (température $\leq 100^{\circ}\text{C}$). Elles sont destinées aux utilisations directes comme pour le chauffage de serre et le chauffage urbain. L'énergie géothermique pourrait aussi être utilisée dans la production d'électricité par cycle binaire un bon exemple est donné par la Roumanie.

La centrale géothermique à cycle binaire transforme l'énergie thermique du fluide géothermique en énergie mécanique, puis grâce à un générateur en énergie électrique.

L'objectif de ce travail est de développer de la recherche dans le but de l'exploitation des ressources géothermique de basse enthalpie pour la production d'électricité.

Ce travail est réparti en quatre chapitres :

- Au premier chapitre nous évoquons un rappel des généralités sur l'énergie renouvelable.
- Au deuxième chapitre nous avons présenté la géothermie en générale.
- Le troisième est consacré à l'étude de la transformation d'énergie géothermique à basse température à l'électricité cycle binaire.
- Le quatrième est relatif à le calcule d'électricité qui ne peut produire à cette énergie géothermique.



CHAPITRE I
Energies renouvelables

I-1-Introduction :

Une source d'énergie désigne les matières premières et tous les phénomènes à partir desquels il est possible de retirer de l'énergie. On distingue les énergies non renouvelables (énergie fossiles et fissiles) et les énergies renouvelables.

Les ressources non renouvelables ou fossiles (charbon, pétroles, gaz sont utilisées massivement depuis le début de l'ère industrielle .leurs utilisations entraînent le rejet dans l'atmosphère d'une grande quantité de gaz carbonique (CO₂), gaz qui contribue à l'augmentation de l'effet de serre et d'autres polluants atmosphériques.

Vu que l'exploitation de ces ressources non renouvelables est très coûteuse et nécessite de grands moyens : humains et matériels, et que ces dernières sont appelées à disparaître en plus de tout cela elles sont pollution très négative sur l'environnement et dans l'atmosphère même (couche d'ozone) et comme le nucléaire est dangereux et que sa technologie n'est maîtrisée que par certain pays. Par conséquent il était primordial de trouver des énergies plus propres c'est les énergies renouvelables.

I-2-Les énergies renouvelables :

Une énergie renouvelable est une énergie exploitable par l'Homme de telle manière permettent d'obtenir, après transformation, de l'énergie mécanique, de l'électricité, de la chaleur ou un combustible. Couplées à une utilisation rationnelle de l'énergie, elles permettent de réduire la consommation de combustibles d'origine fossile ou fissile, et par conséquent de réduire les impacts environnemental et socio-économique de nos besoins en énergie. Les principales formes d'énergie renouvelables connues sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, les biocarburants et l'énergie géothermie, autres énergies [1].

I-2-1-L' énergie solaire :

Le soleil est la source d'origine de la quasi-totalité de l'énergie utilisée sur la terre. Il fournit de l'énergie que nos lecteurs les systèmes météorologiques et les sources d'énergie du vent, l'eau et les vagues sont en fait une forme de l'énergie solaire.

Presque toutes les sources d'énergie, utilisées par l'homme pour le chauffage, et comme générateur de puissance, ont été empruntées du soleil. D'une manière générale, l'énergie solaire est une énergie produite par le soleil, à la suite de réactions de fusions nucléaires. C'est la source de la plupart des énergies disponibles sur la terre [2].

L'énergie solaire est une source inépuisable, et non polluante ; elle présente, en outre, l'avantage de pouvoir être utilisée sous des formes diverses, à des applications multiples, aussi bien à grande échelle, qu'à une échelle individuelle, à haute comme à basse température et utiliser sur la terre est de (300.10 KWh/an) ; ce qui représente 60 fois l'énergie mondiale exigée en l'an 2000 [3].

Il y a par conséquent un besoin pour le stockage d'énergie, et une large gamme de techniques est utilisée dans ce but. Aujourd'hui, nous captons l'énergie solaire pour chauffer les maisons et l'eau, et pour produire de l'électricité.

L'énergie solaire a directement pour origine l'activité du Soleil on peut distinguer:

1. le solaire passif.
2. le solaire photovoltaïque.
3. le solaire thermique.

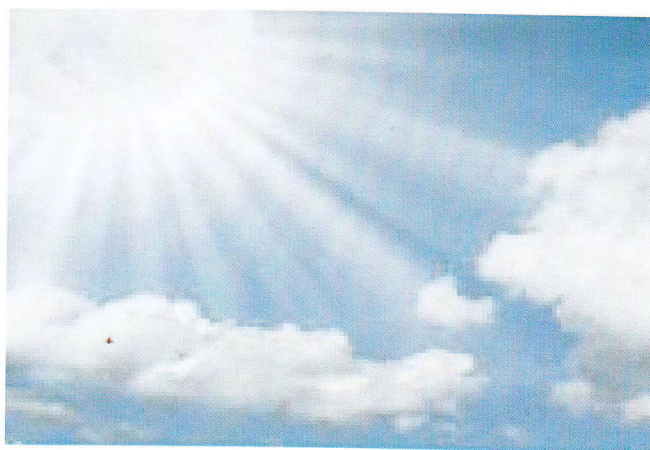


Figure (I-1) : l'énergie solaire [4]

I-2-1-1-L'énergie solaire passive :

Le terme « passif » renvoie aux techniques utilisées pour capter l'énergie. Ces techniques misent sur la conception des immeubles et le type de matériaux utilisés pour les construire plutôt que sur de l'équipement mécanique. La conception solaire passive ne date pas d'hier. Il y a cent ans, des familles peignaient des réservoirs noirs et les plaçaient au soleil pour chauffer leur eau. Les surfaces noires absorbaient la chaleur qui était transférée du métal des réservoirs à l'eau. Cette méthode est toujours utilisée dans les pays chauds, durant l'été dans les chalets et les terrains de camping, souvent avec un chauffe-eau d'appoint. Aujourd'hui, la conception solaire passive utilise les éléments fondamentaux d'un immeuble –

les murs, la toiture et les fenêtres – pour contrôler la quantité d'énergie solaire absorbée ou perdue la conception solaire passive aide aussi à conserver la fraîcheur en été. Par exemple : une maison peinte en blanc ou de couleur pâle réfléchit le soleil. Cette forme de conception solaire passive situe les fenêtres de manière à tirer parti de la lumière naturelle sans les exposer au soleil L'isolation thermique joue un rôle important pour optimiser la proportion de l'apport solaire passif dans le chauffage et l'éclairage d'un bâtiment. Dans une maison solaire passive, l'apport solaire passif permet de faire des économies d'énergie importantes [5].

a)Avantage :

- *L'utilisation passive de l'énergie solaire constitue la façon la moins chère d'utiliser l'énergie du soleil
- *Conservation de la chaleur à long terme (sous réserve d'utilisation de matériaux d'isolation durables).
- *Bien moins de problèmes d'humidité.
- *Une meilleure qualité de l'air (réserves identiques).
- *Économiquement attrayant grâce à des frais de chauffage minimaux, mais il faut compter un certain temps pour rentabiliser le surcoût de départ avec le prix de l'énergie d'aujourd'hui.
- *Écologique : protection des ressources, émission réduite de CO₂.

b) Inconvénient :

- * Source d'énergie encore peu développée.
- *Reste relativement couteux.
- *Matériel relativement fragile.
- * coûteux (temps de retour sur investissement de 3 à 6 mois).

c) Utilisation :

- *La réfrigération passive solaire des locaux est utilisée dans les climats chauds à travers le monde.
- *l'utilisation d'une bonne masse thermique face à de grandes fenêtres qui emmagasiner la chaleur solaire durant le jour pour l'irradier la nuit.

*La plus ancienne utilisation de l'énergie solaire consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie solaire passive. Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du Soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale.

I-2-1-2-L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou bien artificielle (une lampe).

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre-elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire chez un particulier ou dans une centrale solaire photovoltaïque, qui alimente un réseau de distribution électrique.

Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée [5].actuellement les meilleurs photopiles ont un rendement d'environ 15%, ce qui signifie que 85% de l'énergie qui arrive sur la surface de la photopile n'est pas transformée en électricité effectivement cela fait beaucoup de pertes mais 15% c'est déjà pas si mal et c'est surtout mieux que rien [6].

a)Avantage :

*Energie disponible partout à la surface de notre planète, surtout dans les zones tempérées, tropicales et équatoriales.

*Les panneaux photovoltaïque s'intègrent particulièrement bien aux toitures et peuvent ainsi produire une partie de l'électricité nécessaire à une habitation sans occuper inutilement l'espace [6].

Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

b) Inconvénient :

*Les panneaux photovoltaïques encore très chers.

*Le niveau de production maximale dépend de la surface de capteur exposée au soleil.

c) Utilisation :

*Bien adapté à l'électrification de sites isolés tels que refuges montagnards, relais hertziens, bergeries, maisons isolées non raccordées à un réseau.

*adapté l'alimentation d'appareils peu consommateurs et/ou mobiles (calculatrices, satellites, horodateurs, équipements de voiliers,...).

*Utilisation pour l'alimentation de systèmes frigorifique ou de climatisation (notamment dans les pays très Chauds !).

I-2-1-3- l'énergie solaire thermique :

Le solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire. Il se décline de différentes façons : centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau et chauffage solaires, rafraîchissement solaire, cuisinières et sècheurs solaires [5].

L'énergie solaire a directement pour origine l'activité du Soleil qu'est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique) mais l'énergie solaire peut aussi produire du froid si l'on utilise un dispositif frigorifique de type "absorption" Aujourd'hui, l'énergie solaire thermique non raccordées différentes applications tels les panneaux solaires chauffants (production d'eau chaude pour un logement), les fours solaires, l'énergie solaire thermodynamique [7].

a)Avantage :

* Les capteurs solaires thermiques peuvent être intégrés aux toitures ou aux façades.

*les frais de maintenance et de fonctionnement sont cependant relativement faibles.

*Les technologies à mettre en œuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les Régions.

b) Inconvénient :

*Elle est variable dans le temps. Sous les climats tempérés, cette variation est surtout importante en fonction des saisons. Ceci entraîne une nécessité de stocker cette énergie, ce qui augmente considérablement le coût des installations.

* La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée, ceci rend difficile une réponse à des besoins importants (grands ensembles d'appartements, par exemple).

c) Utilisation :

L'énergie solaire thermique peut être utilisée pour la collectivité grâce à la construction de centrales solaires thermodynamiques, mais également par les particuliers grâce au chauffage solaire en particulier. L'énergie solaire thermique sert également au fonctionnement de chauffe-eau et de climatisation solaire. On parvient même à utiliser

l'énergie solaire thermique pour des cuisinières et des sèche-linge, grands consommateurs d'énergie.

I-2-2- L'énergie éolienne :

Par définition, l'énergie éolienne (du mot grec Eole, le Dieu du vent) est l'énergie produite par le vent, l'énergie éolienne est l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses, et pour cause, puisqu'elle est également la moins coûteuse des énergies renouvelables. Toutefois, tous les sites ne peuvent pas forcément inclure des éoliennes, du fait que la vitesse moyenne du vent doit dépasser les 5 mètres par seconde, soit 18 km par heure. De nos jours, les machines les plus courantes ont une puissance de 750 kW, et les plus puissantes commercialisées atteignent 1,5 MW [8].



Figure (I-2) :L'énergie éolienne [4]

L'éolienne, que l'on nomme aussi aérogénérateur, est une machine qui permet la transformation l'énergie du vent en mouvement mécanique, puis le plus souvent en électricité. Elles ont des tailles très variables (de quelques mètres à 100 mètres de hauteur).les plus petites sont utilisées pour l'alimentation électrique de sites isolés ou de maisons particulières. Les plus grandes sont souvent regroupées en fermes éoliennes pour une production de masse sur le réseau d'électricité (centrales éoliennes). On peut distinguer deux types d'éoliennes :

I-2-2-1-Les éoliennes à axe horizontal :

Elle est composée d'une hélice perpendiculaire au vent, montée sur un mât. La hauteur est généralement de 20 m pour les petites éoliennes, et supérieure au double de la longueur

d'une pale pour les modèles de grande envergure. Celle-ci est de conception plus simple et a un rendement élevé. C'est pourquoi ce type d'éoliennes est le plus répandu aujourd'hui. Leurs caractéristiques communes résident dans le fait d'être montées au sommet d'un pylône et d'être équipées d'un système d'orientation dans le vent. Sur la base du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes bien distincts : à rotation lente « multiples » et à rotation rapide « aérogénérateurs » [1].

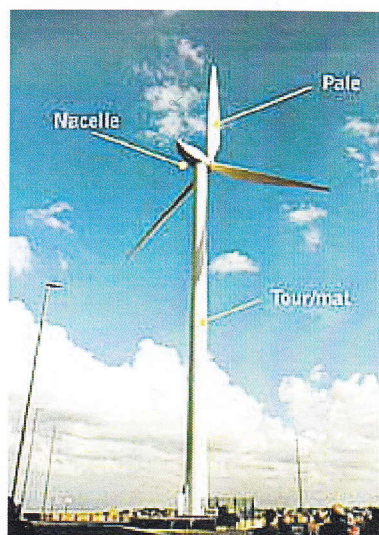


Figure (I-3) : Éolienne à axe horizontal [1]

I-2-2-2-Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ne nécessitent pas de système d'orientation par rapport à la direction du vent, mais sont, en général, de conception assez compliquée. Il existe deux modèles caractéristiques : La turbine mesure 6m de haut et 3,3m de large au niveau des rotors, qui, à vitesse maximale, tournent à 90 tours par minute sans faire de bruit [1].



Figure (I-4) : Eolienne à axe vertical [1]

a)Avantage:

- *Les frais de fonctionnement sont assez limités.
- *Une énergie propre.
- *Elle ne nécessite aucun carburant.
- *Elle ne crée pas de gaz à effet de serre.
- *L'énergie éolienne est une énergie renouvelable idéale.
- *La plupart des éoliennes sont silencieuses et ne présentent aucun danger.
- *Les éoliennes peuvent alimenter des sites isolés.

b) Inconvénient :

- *l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.
- * Les éoliennes anciennes produisent un bruit.
- *Elle dépendant de la météo (vent, hygrométrie).
- * L'énergie éolienne est variable dans le temps.

c) Utilisation :

- * Son utilisation diminue notre dépendance énergétique.
- *L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises. Ces éoliennes de petite puissance sont dites appartenir au petit éolien, par opposition au grand éolien ou à l'éolien industriel.

I-2-3- L'énergie hydraulique (La houille blanche) :

L'énergie hydraulique du moins celle des rivières et des fleuves, est très ancienne. Des l'antiquité, les moulins à eau servaient à moudre le grain, ou à élever l'eau.



Figure (I-5) : L'énergie hydraulique [4]

La quantité d'énergie productible dépend de la hauteur de chute et du débit d'eau. Or le débit d'eau dépend lui-même de la quantité de pluie qui tombe et de la surface du bassin versant sur laquelle elle tombe. Altitude, pluviométrie, surface du bassin versant sont donc les trois facteurs clés qui vont conditionner les potentielles énergétiques hydrauliques d'une région, d'un pays, d'un continent. Mais l'un de ces trois facteurs, la surface, est finalement prépondérant.

En 2005, le potentiel exploité à l'échelle mondiale n'était que d'environ 2 900 TWh, soit le tiers de ce qui serait économiquement exploitable.

Et en 2007, deux pays sur trois dans le monde exploitent l'énergie hydraulique, mais de manière très inégale. Les quatre plus gros producteurs (Chine, Canada, Brésil, Etats-Unis) dépassent chacun 300 TWh et représentent, eux quatre, presque la moitié du total mondial.

On pense que le potentiel hydroélectrique exploitable de la planète serait d'environ 14 000 TWh, soit 5 fois plus que le potentiel exploité aujourd'hui. Ce potentiel global se situerait pour 1/4 en Asie, 1/4 en Amérique du Sud et 1/4 dans l'ex-URSS. Mais son développement

actuel est très contrasté l'Europe et l'Amérique du Nord exploiteraient déjà la moitié de leur potentiel, mais l'Asie 11 %, l'ex-URSS 7 % et l'Afrique 4 % seulement [9].

a) Avantages :

* L'énergie hydraulique est une énergie naturelle exploitable à grande échelle.

* Le coût d'installation d'une centrale hydroélectrique dépend bien sûr de sa taille, de son type et de son accessibilité.

b) Inconvénient :

* Les plus gros barrages peuvent noyer des surfaces très importantes, pouvant comprendre des zones d'habitation (déplacement de population) ils peuvent mettre en péril les écosystèmes locaux (faune et flore).

* Les barrages peuvent s'envaser car ils réduisent l'écoulement de l'eau mais aussi de tous l'élément charrié par les cours d'eau.

* le lâché d'eau (et plus exceptionnellement la rupture d'un barrage) peuvent provoquer des dégâts considérables en aval du barrage (raz-de-marée).

c) Utilisation :

L'utilisation directe de la force mécanique produite par de l'énergie hydraulique est très ancienne. La méthode la plus simple est d'utiliser la force du courant d'une rivière pour transporter des marchandises vers l'aval soit avec des navires, D'autre part, la marémotrice, résultant des divers effets causés par la promiscuité terrestre de la lune et du soleil, désigne les mouvements de l'eau suscités par les marées. Egalement mise en œuvre pour produire de l'énergie hydraulique, elle est

Utilisée soit sous forme d'énergie potentielle, soit sous forme d'énergie cinétique utilisé directement soit converti en électricité (on parle alors d'hydro-électricité).

I-2-4- Biomasse et déchet :



Figure (I-6) : la biomasse [4]

La biomasse est la 2^{ème} énergie renouvelable dans le monde et la source d'énergie la plus ancienne utilisée par l'humanité. Il s'agit de toute matière organique, végétale, ou issue des êtres vivants. Cette matière obtenue de manière naturelle ou provenant de transformations artificielles de la matière (déchets forestiers, déchets agricoles et résidus solides urbains Elle comprend donc aussi tous les déchets organiques. Elle comprend très utilisées, notamment pour produire de la chaleur. Le rendement énergétique d'un carburant est supérieur à 1 et actuellement, ce rendement énergétique est de 2 atteindre 3,5 dans quelques années [9].

I-2-4-1-Les biocarburants :

➤ **Le bioéthanol (en substitution de l'essence) :** Il s'agit en fait d'un alcool produit par fermentation des sucres contenus soit dans des plantes riches en sucres (betteraves, topinambours, cannes à sucre...), soit dans des plantes riches en amidon (pommes de terres, céréales...).on peut aussi produire un éther dérivé de l'éthanol, l'ETBE (éther – tertio – butyle-éther) [10].

➤ **Les biodiesel (en substance du gazole) :**

On peut brûler dans un moteur soit de l'huile végétale (colza, tournesol, palme, soja, arachide...), soit des esters d'huile. L'ester présente deux avantages sur les huiles brutes : moindre viscosité et meilleure aptitude à s'auto enflammer dans le moteur. Certes, des constructeurs de tracteurs agricoles proposent des moteurs permettant l'utilisation d'huiles non estérifiées, mais le carburant qui au vent en poupe aujourd'hui est l'ester méthylique d'huile de colza, le "biodiesel" [9].

D'autres types de biocarburants sont en développement comme le biogaz, l'huile végétale, le bio hydrogène, Elle représente 1% de la consommation totale Française de carburants.

a) Avantages :

*Le dioxyde de carbone rejeté lors de la combustion n'augmente pas l'effet de serre. L'oxygène compris dans les plantes améliore la combustion et diminue le taux d'hydrocarbures imbrûlés ainsi que le taux de monoxyde de carbone.

* à l'heure où le prix des carburants ne cesse d'augmenter, cette énergie serait une bonne alternative au pétrole.

b) Inconvénients :

* reste encore chère.

* problèmes d'approvisionnement ; il faut en général s'adresser à des associations d'agriculteurs.

* encore peu développé.

I-2-4-2- Le bois (biocombustibles) :

Le terme bois énergie recouvre la valorisation du bois en tant que combustible sous toutes ses formes, de la bûche à la sciure, en passant par les plaquettes forestières et bocagères. Il est la plus ancienne énergie renouvelable utilisée et est très répandue en France, avec près de 14 millions d'hectares de forêt, permettant de couvrir 4.5 % des besoins énergétiques. C'est la plus importante source d'énergie renouvelable, après l'hydraulique (1). L'utilisation du bois comme combustible remonte aux origines de l'humanité. Le bois a été pendant des millénaires le seul combustible, pour des usagers domestiques ou pour des usages industriels. Parfois on utilisait directement le bois, Parfois le charbon de bois. Le bois est, le très loin, le principalement biocombustible végétale. Il y en a cependant d'autre, notamment des résidus agricoles, consacré à l'énergie tirée des déchets [9].

a) Avantages :

- * énergie la moins chère du marché.
- * énergie renouvelable si les forêts où les essences sont prélevées sont gérées.
- * son utilisation n'aggrave pas l'effet de serre.
- * le bois est une énergie renouvelable (à condition de gérer la ressource) qui génère des filières et des emplois locaux, ce qui diminue d'autant les pollutions dues à l'acheminement du pétrole.

b) Inconvénients :

- * pollution atmosphérique due à la combustion du bois.
- * problème des cendres dans les chaudières, avoir absolument nettoyage automatique ou nécessite plus d'entretien.
- * des granulés de paille peuvent être aussi utilisés mais sont de moins bonnes valeurs énergétiques.

I-2-4-3- Le biogaz :

Le biogaz est le gaz produit par la fermentation de matières organiques animales ou végétales en l'absence d'oxygène.

Cette fermentation appelée aussi méthanisation se produit naturellement (dans les marais) ou spontanément dans les décharges contenant des déchets organiques, mais on peut aussi la provoquer artificiellement dans des digesteurs (pour traiter des boues d'épuration, des déchets organiques industriels ou agricoles, etc.).

Le biogaz est un mélange composé essentiellement de méthane (typiquement 50 à 70%) et de gaz carbonique, avec des quantités variables d'eau, d'hydrogène sulfuré (H₂S) et d'oxygène.

La forme d'énergie majoritaire du biogaz est le méthane comme pour le gaz naturel : le biogaz est ainsi la forme renouvelable de l'énergie fossile très courante qu'est le gaz naturel. On peut aussi utiliser le terme bio méthane. Ce sont les digesteurs mésophiles qui sont les plus utilisés (à 38 °C).

Le biogaz est le résultat de la méthanisation ou digestion anaérobie de déchets fermentescibles.

Les sources les plus courantes de biogaz sont les suivantes : les décharges, les boues de stations d'épuration, les effluents d'élevage, les effluents des industries agroalimentaires, le fond des marais et lacs. Le biogaz ou bio méthane peut être utilisé aussi comme carburants pour véhicules.

a) Avantages :

- * diminution des gaz à effet de serre.
- * valorisation des déchets.
- * sa combustion dans une chaudière au gaz permet de produire de la chaleur ou de l'électricité.

b) Inconvénients :

- * filière développée essentiellement dans les industries.
- * le coût de réalisation d'un digesteur reste assez élevé.
- * peu utilisé dans le bâtiment.

c) Utilisation :

La biomasse est en majorité (95%) utilisée pour le chauffage des maisons privées, tandis que le chauffage des grands systèmes par la biomasse reste peu important (5%).utilisées pour produire de l'électricité dans certains pays. on 2006 la consommation finale suisse, dont 92% sont utilisés pour la chaleur, 7% pour l'électricité et 1% pour les carburants.

I-2-5-L'énergie géothermique :**Figure (I-7): L'énergie géothermique [10]**

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqué par les astres, principalement le soleil (rayonnement) mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique).

L'énergie géothermique par rapport aux autres énergies renouvelables présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphérique (soleil, pluie, vent).c'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie .les gisements géothermique ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.

Les autres formes de géothermique, la géothermie très basse énergie exploite des réservoirs situés à moins de 10 mètres et dont les eaux ont une température inférieure à 30 °C. On l'utilise pour le chauffage et la climatisation, vie une pompe à chaleur .la géothermie basse énergie s'appuie, elle, sur des aquifères à des températures comprises entre 30 °C et 100 °C. On l'exploite dans des réseaux de chaleur pour le chauffage urbain ou dans le cadre de procédés industriels [10].

a) Avantages :

*La géothermie ne dégage aucune substance polluante.

*Une source d'énergie exploitable localement.

*Elle se distingue notamment par sa double fonction de réservoir de chaleur pour les systèmes de chauffage à basse température et de refroidissement.

*La chaleur terrestre réduit les dépendances des énergies importées.

*qui offre une multitude d'applications.

*La chaleur terrestre peut être utilisée de multiples façons.

b) Inconvénient :

*Les forages pour accéder à cette ressource sont souvent très coûteux, car la production d'électricité nécessite de très haute température, donc de très grande profondeur.

*Les forages peuvent parfois s'avérer infructueux voir même dangereux, on parle de « risque géologique » : provocation de séisme notamment.

* Avant d'effectuer le forage, il faut effectuer des études de sols, des travaux d'explorations, etc.... l'implantation d'une centrale est donc un processus très long.

* Il faut faire attention à ne pas extraire plus d'énergie que pourrait en produire le sol sous peine d'épuiser ses capacités thermiques et de voir les rendements des installations diminués.

c) Utilisation :

Chauffage de logements, de bâtiments (60 à 80°C), serres (30°C), piscicultures (30°C), élevages d'animaux, séchage de produits agricoles, mise hors gel des routes (serpentins d'eau chaude sous le bitume à 30°C), climatisation ou réfrigération... Plus de deux millions de pompes à chaleur géothermale sont utilisées dans 30 pays pour le chauffage et la climatisation de bâtiments. On peut générer de l'électricité par une turbine.

I-3-Situation actuelle :

Aujourd'hui, les énergies renouvelables représentent 13,5 % de la consommation totale d'énergie comptabilisée dans le monde et 18 % de la production mondiale d'électricité. La biomasse et les déchets assurent l'essentiel de cette production 10,6%.

La production électrique renouvelable provient principalement de l'hydraulique (90 %). Le reste est très marginal : biomasse 5,5%, géothermie 1,5%, éolien 0,5% et le solaire 0,05% En 2007, les énergies renouvelables représentaient 9,6 % du total de la production d'énergie primaire aux États-Unis, le nucléaire 11,7 % [11].

Par exemple en 2005 voir le schéma suivant :

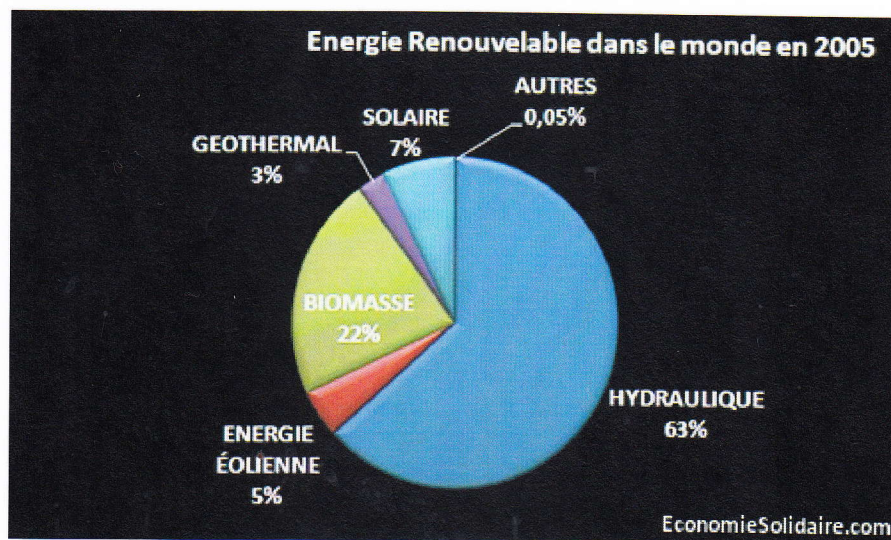


Figure (I-8) : énergie renouvelable dans le monde en 2005 [11]

La production et la consommation d'énergie renouvelable d'après 1986 jusqu'à 2008
Sont présentées dans le tableau ci-dessous :

| Année | Production [BTU] | Consommation [BTU] |
|-------|---------------------|-----------------------|
| 1986 | 6.225 | 6.226 |
| 1987 | 5.741 | 5.741 |
| 1988 | 5.570 | 5.570 |
| 1989 | 6.394 | 6.394 |
| 1990 | 6.208 | 6.208 |
| 1991 | 6.240 | 6.240 |
| 1992 | 5.995 | 5.995 |
| 1993 | 6.265 | 6.264 |
| 1994 | 6.157 | 6.157 |
| 1995 | 6.705 | 6.707 |
| 1996 | 7.168 | 7.169 |
| 1997 | 7.181 | 7.178 |
| 1998 | 6.659 | 6.668 |
| 1999 | 6.683 | 6.681 |
| 2000 | 6.262 | 6.264 |
| 2001 | 5.318 | 5.316 |
| 2002 | 5.899 | 5.894 |
| 2003 | 6.148 | 6.150 |
| 2004 | 6.248 | 6.260 |
| 2005 | 6.410 | 6.423 |
| 2006 | 6.857 | 6.908 |
| 2007 | 6.800 | 6.814 |
| 2008 | 7.316 | 7.300 |

**Tableau (I-1) : la production et la consommation d'énergie renouvelable
d'après 1986 jusqu'à 2008 dans le monde [12]**

$$1\text{BTU} = 1.055 \cdot 10^3 \text{ Joule}$$

CHAPITRE II

L'énergie géothermique

II-1-Introduction :

L'énergie géothermique qui est souvent considérée comme renouvelable ; elle n'est pas dérivée de l'énergie solaire, mais de la chaleur dégagée par la croûte terrestre, Les meilleures perspectives paraissent offertes par les roches sèches et profondes à haute température dans lesquelles on fait circuler de l'eau qui sert de caloporteur. On peut alors générer de l'électricité par une turbine. Cette géothermie haute énergie bénéficie du développement des recherches en modélisation des transferts de fluides, ainsi que du suivi géophysique et géochimique des opérations. Elle est aussi une des rares énergies renouvelables exploitables à plein temps [6].

II-2-Histoire :

La géothermie a de tout temps été utilisée par les hommes ; mais ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle que cette énergie a été "redécouverte" et appliquée à une échelle industrielle Le dix-neuvième siècle marque les débuts industriels de la géothermie. Les facteurs de cette évolution sont doubles : d'une part, les progrès scientifiques permettent de mieux connaître le sous-sol, d'autre part, les progrès technologiques permettent le développement à la fois, des techniques de forage et des nouveaux systèmes d'exploitation de l'énergie. Auparavant, avant 1800, on se contentait d'exploiter la chaleur telle qu'elle arrivait en surface, en particulier dans les sources chaudes ; la véritable révolution industrielle après 1800, va consister à étudier, explorer, creuser pour atteindre la chaleur en profondeur, enfin adapter des dispositifs pour mieux exploiter ou transformer cette énergie en Italie Des réseaux de chaleur urbains importants utilisant l'énergie géothermique se développeront plus tard en France, Italie, Roumanie, URSS, Turquie, Géorgie, Chine, tats-Unis,.....

Dix ans plus tard, travaux de forage permirent d'augmenter la quantité de vapeur qui plus tard conduira à fabriquer de l'électricité. Parmi les premiers usages industriels de la géothermie, on peut citer aussi l'extraction du sel durant le dix-huitième siècle En France, le premier forage géothermique .A 1900 En France possède la source thermo minérale la plus chaude d'Europe (82°C) les archives font mention d'un réseau qui distribuait l'eau géothermale à quelques maisons Cette période correspond à une émergence des applications industrielles de la géothermie. De grands progrès ont été réalisés depuis le début du siècle dans la connaissance des structures du sous-sol grâce au perfectionnement des méthodes d'exploration, notamment géophysiques et

géochimiques. Du début du siècle à 1960, on aura exploré 23 pays et identifié une cinquantaine de champs Haute énergie, ce qui correspondra à un total de près de 400 MW installés.

En France, la première expérience significative démarre en 1969, avec la mise au point de la technique dite du " doublet ", permettant d'exploiter un des aquifères profonds du bassin de Paris. Entre 1980 et 1986 d'opérations seront réalisées en France, ce qui donnera naissance à une filière française spécifique de réseaux de chaleur alimentés par la géothermie. Aujourd'hui, la baisse du coût des énergies traditionnelles a ralenti de manière significative le développement de la géothermie basse énergie. Néanmoins, certains pays ont adopté une politique volontariste de développement de ce type d'énergie, notamment pour des raisons environnementales. En réalité, la production mondiale d'électricité géothermique va commencer à croître rapidement pendant les vingt années suivantes. L'augmentation annuelle moyenne est alors de 17,5 % [12].

II-3-L'origine de l'énergie géothermique :

a) La terre produit de la chaleur .Le centre de la terre est très chaud l'essentiel de la chaleur dégagée par la terre ne vient pas de ce lent refroidissement : les roches intermédiaires son en effet de mauvais conducteurs de la chaleur, et si le flux de chaleur mesuré à la surface de la terre provenait uniquement du noyau.

b) la chaleur dégagée provient de la radioactivité : c'est l'énergie nucléaire produit par la désintégration de l'uranium, du thorium ou du potassium qui génère l'essentiel du flux de chaleur.

c) Le rayonnement solaire fournit la plus grande partie de l'énergie sur Terre [8].

II-4-Définition de la géothermie :

La géothermie (mot issu du grec « géo » = terre et « thermos » = chaud) est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre. C'est aussi l'ensemble des applications techniques qui permettent d'exploiter les sources d'énergie géothermique. La géothermie désigne aussi l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur [11].

Pour la majorité des problèmes d'intérêt, compte tenu des faibles profondeurs et de l'étendu restreinte des études hydrogéologique, même régionales, le flux géothermique pourra être considéré constant à la fois en fonction de la profondeur et sur l'ensemble de la région d'étude considérée. Pour les continents, le flux géothermique moyen varie entre 40 Mw/m² dans les cratons stables et 70 Mw /m² dans provinces tectonique tertiaires.

Le flux géothermique est transféré par conduction à travers la croûte terrestre. Pour que ce flux se fasse vers la surface de la terre, ceci implique forcément que la température est plus élevée en profondeur qu'à la surface de la terre. Compte tenu du temps généralement très long pendant lequel le flux géothermique s'est maintenu pratiquement constant dans une région donnée, les conditions de transfère de chaleur du flux géothermique peuvent généralement être considérées en régime permanent.

La chaleur est originellement transmise de proche en proche à travers les roches de la croûte terrestre par conduction thermique. Il est donc assez facile de corréler les mesures du flux de chaleur avec les phénomènes géologiques profonds. Cependant, l'interprétation de ces mesures devient plus délicate quand la croûte est parcourue par des circulations d'eau. La présence de nappes aquifères peut abaisser le flux de chaleur ; de même l'existence de sources chaudes et de geysers complique la géométrie des échanges thermiques [13].

II-4-2-gradient géothermique :

La carte de gradient géothermique est une étape importante en géothermie. Elle montre la variation de la température en fonction de la profondeur en chaque point de la région d'étude. Généralement, le gradient géothermique observé varie largement d'un endroit à un autre, ne dépassant pas parfois 1°C/100 m.

La température des roches augmente en moyenne de 1°C tous les 30 mètres de profondeur : c'est le gradient géothermique terrestre moyen. En certains points du globe, et notamment dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, le gradient géothermique est plus élevé (10°C par 100 mètres en Alsace et même exceptionnellement 100°C par 100 mètres à Larderello, Italie, seulement 1°C par 100 mètres près

Le principe est d'extraire de la chaleur contenue dans le sous-sol pour l'utiliser comme chauffage ou au contraire de lui restituer de la chaleur afin d'utiliser l'air froid obtenu en climatisation. On peut également utiliser l'énergie géothermique pour la transformer en électricité. Aujourd'hui, la donne change L'épuisement programmé des réserves d'énergies fossiles entraînant l'augmentation des prix de l'énergie, et la nécessité de limiter le réchauffement climatique dû à l'effet de serre impose de faire toute leur place aux énergies renouvelables. L'énergie géothermique est potentiellement considérable puisqu'un km^2 de roche renferme en moyenne, sur une profondeur de 10 km une quantité d'énergie équivalent à 15 millions de TEP. De plus, par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie, présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques telles que l'ensoleillement, la pluie, ou encore le vent. C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie Cette énergie renouvelable est intéressante mais elle est encore au niveau expérimental. En effet, pour pouvoir l'exploiter il faut une étude poussée afin de prévenir les risques sismiques liés à la géothermie [13].

II-4-1- flux géothermique :

Il n'est pas possible d'observer les processus thermiques qui se déroulent au sein de la croûte terrestre et dans le manteau sous-jacent. Toutefois, grâce à l'étude des dégagements thermiques à la surface de notre planète, Il y a un flux de chaleur, appelé flux géothermique q_G (W/m^2), a travers la croûte terrestre (continentale et marine) cause par la chaleur transférée du manteau a la base de la croûte terrestre ainsi que par la désintégration des matériaux radioactifs contenus dans la croûte. Le flux géothermique montre le comportement général suivant :

- Le flux diminue avec l'âge géologique à cause de la désintégration du matériel radioactif impliqué.
- Le flux est maximal à la surface de la terre et diminue avec la profondeur a cause de la réduction de la quantité de matériel radioactif sous-jacent.
- Le flux varie géographiquement mais relativement uniforme sur de vastes étendues.

de Padoue) et l'eau des précipitations qui traverse les roches s'échauffe de plus en plus en profondeur.

Le gradient géothermique représentant l'augmentation de la température avec la profondeur, sera donc directement fixé par la magnitude du flux géothermique et la conductivité thermique du matériel terrestre traversé par ce flux, tel que spécifié par la loi de Fourier de conduction thermique.

$$g_G = \frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{q_G}{\lambda} \quad (\text{II-1})$$

L'effet du flux géothermique et son expression dans le gradient géothermique se retrouvent à des profondeurs excédant généralement 100 m. la température près de la surface du sol (moins de 10m) est affectée par les variations de température saisonnières tandis qu'à 50-100 m de profondeur l'écoulement de l'eau souterraine contrôle la température le gradient géothermique des régions de bouclier et de bassins sédimentaire est généralement entre 15 et 30. De fortes valeurs sont présentes dans les régions tectoniquement actives.

Dans le cas simple ou tout le matériel considéré à une seule valeur de conductivité thermique, le profil de température en fonction de la profondeur augmentera linéairement avec la profondeur en fonction du gradient géothermique à partir de la température moyenne à la surface du sol.

$$T(z) = T_s + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot z = T_s + g_G \cdot z = T_s + \frac{q_G}{\lambda} \cdot z \quad (\text{II-2})$$

Lorsqu'on considère l'évolution de la température sur de grandes profondeurs, comme dans les bassins sédimentaires, il est probable que les formations rocheuses aient des conductivités thermiques variables. Dans un tel cas, la figure I-01 montre que le profil de température sera la même plus complexe. Pour une formation donnée, la définition du gradient géothermique reste la même et le changement de température avec la profondeur dépendra toujours du flux géothermique et de la conductivité thermique de la formation (équation I-01). Les lignes d'égale température, les iso géothermies, seront plus rapprochées dans les formations à

faible conductivité thermique. Le flux géothermique est en fait le même à travers toutes les formations mais leur conductivité thermique distincte modifient le gradient géothermique relié au flux chaleur à travers les formations. Dans un tel cas le profil de température évoluera à partir de la température moyenne en surface en augmentant en fonction du gradient géothermique de la formation. La température atteinte à la surface la formation sous-jacente sera le point de départ du profil de température à travers cette formation, et ainsi de suite [14].

Lorsque l'évolution de la température à travers toute l'épaisseur de la croûte terrestre est considérée, il faut alors tenir compte de la diminution du flux géothermique avec la profondeur. Dans la partie supérieure de la croûte, les gradients géothermiques sont soumis à toutes sortes de perturbations qui donnent en fait des indications importantes sur plusieurs processus géologiques : perturbations par la topographie en région montagneuse ; effet persistant de la dernière glaciation et effet majeur de la présence de pergélisol sur le gradient géothermique ; effets de processus tectoniques, volcaniques, géothermaux et intrusions de sel. Enfin, l'identification de régions de forts gradients géothermiques est faite lors de l'évaluation du potentiel d'exploitation de l'énergie géothermique. Cette énergie renouvelable pourrait représenter globalement un apport plus important à la consommation énergétique [11].

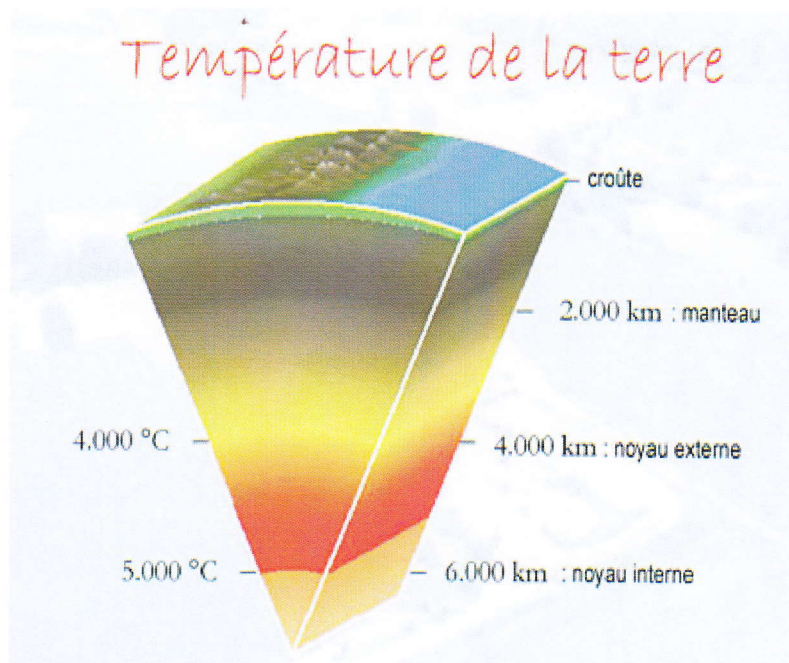


Figure (II -1) : la variation entre la température et la profondeur [15]

II-5- principe de la géothermie :

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Il existe un flux géothermique naturel à la surface du globe, mais il est si faible qu'il ne peut être directement capté. En réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous sol (nappes d'eau).

L'énergie géothermique est fournie par la chaleur interne de la terre, produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre, pour une faible part, par les échanges thermique avec les zones interne de la terre. En effet, à mesure que l'on s'enfonce sous terre, la température augmente d'environ 3,3°C tous les 100 m [10].

II-6- Principaux types de ressources géothermiques :

La chaleur géothermiques peut-être exploitée grâce à la présence dans le sous-sol de véritables gisements où se trouve stockée l'énergie calorifique. Selon la nature des terrains, on classera ces gisements en trois catégories : réservoirs de vapeur, réservoirs d'eau chaude, ou roches chaudes sèches.

Les deux premiers types de gisements sont constitués par des infiltrations d'eau circulant dans une couche géologique perméable et poreuse recouverte de terrains imperméables [11].

II-6-1- Réservoirs de vapeur :

Si l'eau de gisement est partiellement vaporisée, elle pourra être récupérée sous la forme de vapeur sèche directement utilisable pour faire tourner les turbines des centrales électriques. Cependant, ces gisements de vapeur sont relativement rares. Les gisements les plus connus sont Larderello (Italie), Geysers (Californie) et Matsukawa (Japon). [11].

II-6-2-Réservoirs d'eau chaude :

Le plus souvent, l'eau des gisements géothermiques reste liquide et, suivant sa température, elle peut être utilisée soit pour le chauffage, soit pour la production d'électricité. Dans ce dernier cas, la baisse de pression que subit l'eau chaude pendant sa remontée vers la surface produit sa vaporisation de sorte qu'en tête de puits on dispose d'un mélange diphasique eau-vapeur dont on peut utiliser la phase gazeuse pour alimenter des turbines [16].

II-6-3- La géothermie des roches fracturées :

Consiste à récupérer la chaleur de roches chaudes en profondeur par une circulation d'eau vers la surface. Elle constitue une énorme réserve d'énergie puisque l'exploitation de la chaleur contenue dans une sphère de 1 m de rayon permettrait d'alimenter pendant un siècle une centrale électrique de 10 MW.

La principale difficulté consiste à créer un échangeur souterrain par stimulation hydraulique des fractures existantes dans la roche en profondeur [16].

II-7-Types de la géothermie :

La géothermie a donné naissance à deux filières qui se distinguent par des technologies et des applications différentes : la production d'électricité pour les hautes (supérieures à 150 °C) et moyennes températures (comprises entre 150 et 100 °C), et la production de chaleur pour les basses (comprises entre 100 et 30 °C) et très basses températures (comprises entre 30 et 10 °C), et nous avons discuté dans ce sujet les types en détail.

II-7-1-La géothermie haute énergie :

La géothermie haute énergie, ou géothermie profonde, appelée plus rarement géothermie haut température, ou géothermie haute enthalpie, est une source d'énergie contenue dans des réservoirs localisés généralement à plus de 1500 m de profondeur et dont la température est supérieure à 150 °C [6].

La géothermie à haute énergie ou géothermie privilégiée exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Il devient alors rentable de la convertir en électricité grâce à la vapeur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine. Plus on fore profond dans la croûte terrestre, plus la température augmente. En moyenne, l'augmentation de température atteint 20 à 30 degrés par kilomètre. Ce gradient thermique dépend beaucoup de la région. Il peut varier de 3- 4 °C / 100 m (régions sédimentaires) jusqu'à 1000°C / 100 m (régions volcaniques, zones de rift). La méthode utilisée pour les transferts thermiques est plus simple (échangeur de température à contre courant) et ne nécessite pas de fluide caloporteur comme cela est le cas avec la géothermie peu profonde basse température. L'exploitation de la chaleur provenant de la géothermie haute énergie est ancienne. Les bains dans des sources chaudes étaient déjà pratiqués dans l'Antiquité

dans de nombreuses régions du monde. C'est au début du XXe siècle. La géothermie haute température connaît actuellement un renouveau important, notamment parce que la protection contre la corrosion et les techniques de forage se sont fortement améliorées. De nouvelles applications technologiques sont envisageables pour récupérer la chaleur de la Terre. La cogénération permet déjà de combiner la production de chaleur et d'électricité sur une même unité, et augmente ainsi le rendement de l'installation [17].

Grâce aux températures élevées, il est possible de produire de l'électricité. En effet, la pression de la vapeur extraite est suffisamment élevée pour alimenter directement une turbine. De plus, la récupération des condensats de cette vapeur permet de produire simultanément de la chaleur par cogénération. (Production conjointe d'électricité grâce à des turbines à vapeur et de chaleur avec la récupération des condensats de la vapeur).

Ce type de géothermie est possible dans des zones géographiques au gradient géothermal anormalement élevé. Elles correspondent aux régions volcaniques situées à proximité des frontières des plaques lithosphériques

Dans les rares cas où de la vapeur sèche peut être récupérée, l'exploitation est simple puisqu'on a affaire à une centrale thermique dans laquelle la vapeur est fabriquée gratuitement. Dans la majorité des cas, c'est un mélange eau-vapeur que l'on récupère. Il faut alors séparer les deux phases avant d'utiliser la vapeur. Dans les deux cas, on utilise généralement un cycle ouvert [13].

II-7-2- La géothermie moyenne énergie :

On parle de "géothermie moyenne énergie" lorsque le forage permet d'attendre une température de l'eau entre 100°C et 10°C dans des gisements situés entre 1500 et 2500 m de profondeur. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, et certaines applications industrielles. La production de chaleur au moyen d'une pompe à chaleur sur nappe, repose sur le prélèvement et le transfert de l'énergie contenue dans l'eau souterraine vers les locaux à chauffer. Par ailleurs, une pompe à chaleur peut assurer simultanément et /ou successivement des besoins en chauffage et /ou climatisation /rafraîchissement. Cette catégorie est toute de même, d'un point de vue technique et d'investissement financier, plus de la famille des géothermies de basse température [6].

La géothermie moyenne énergie (aux températures comprises entre 100 °C et 150 °C) par laquelle la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire. Présentes dans de nombreux endroits du globe, les ressources de moyenne énergie se retrouvent dans le même décor géologique que la géothermie haute énergie [17].

II-7-3-La géothermie basse énergie :

On parle de « géothermie basse énergie » lorsque le forage permet d'atteindre une température de l'eau entre 30 °C et 100 °C dans des gisements situés entre 1500 et 2500 m de profondeur. Cette technologie est utilisée principalement pour utiliser directe comme le chauffage de serre et le chauffage des Habitants et chauffage urbain.

En France, un réseau de chauffage urbain situé en région parisienne utilise la géothermie basse énergie. Les installations de pompes à chaleur sur nappe continuent à se développer en région parisienne car elles correspondent à des techniques de chauffage et de refroidissement particulièrement bien adaptées aux secteurs tertiaire et résidentiel.

Une centrale géothermique fonctionnant sur le principe du doublet a été mise en service en 1994 à Riehen en Suisse, pour le chauffage des immeubles locaux. Depuis décembre 2000, une partie de la chaleur produite est exportée en Allemagne.

La production de chaleur au moyen d'une pompe à chaleur sur nappe, repose sur le prélèvement et le transfert de l'énergie contenue dans l'eau souterraine vers les locaux à chauffer. Par ailleurs, une pompe à chaleur peut assurer simultanément et/ou successivement des besoins en chauffage et/ou climatisation/rafraîchissement. Cette catégorie est tout de même, d'un point de vue technicien et d'investissement financier, plus de la famille des géothermies de très basse énergie.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur, présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent, etc...). C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 50 ans en moyenne).

Les installations géothermiques ont parfois besoin de détartre les fissures où circule l'eau. Pour cela, elles injectent parfois de l'eau sous pression, ce qui dans certains cas peut déclencher des séismes de magnitude pouvant aller jusqu'à 4,6 sur l'échelle de Richter. Un moyen de limiter leur intensité est d'utiliser [13].

II-7-4- La géothermie très basse énergie :

La géothermie très basse énergie est une géothermie au niveau des températures comprises entre 10 °C et 30 °C. Dans ce cas, la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain jouant un rôle de source chaude du fait de son inertie et de sa mauvaise conductivité thermique.

Cette technologie est appliquée à :

- la climatisation passive avec par exemple le système du puits provençal.
- le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique.

Ces systèmes permettent de faire, par rapport à l'usage unique d'une énergie primaire, des économies d'énergie sur le chauffage et la production d'eau chaude. Néanmoins ils nécessitent une source d'énergie extérieure, le plus souvent l'électricité, qui doit rester disponible.

La géothermie de pompe à chaleur consiste à puiser la chaleur présente dans le sol à travers des capteurs verticaux ou horizontaux, selon la configuration du terrain.

Un système thermodynamique (ou pompe à chaleur) a un fonctionnement comparable à celui d'un réfrigérateur ménager : il assure le chauffage d'un local à partir d'une source de chaleur externe (dont la température est inférieure à celle du local à chauffer). Il puise les 2/3 de l'énergie de chauffage dans la chaleur produite par les entrailles de la terre (géo = terre, thermie = chaleur) et l'autre tiers est un apport électrique pour le compresseur [13].

II-8-Utilisation et l'importance de la géothermie :

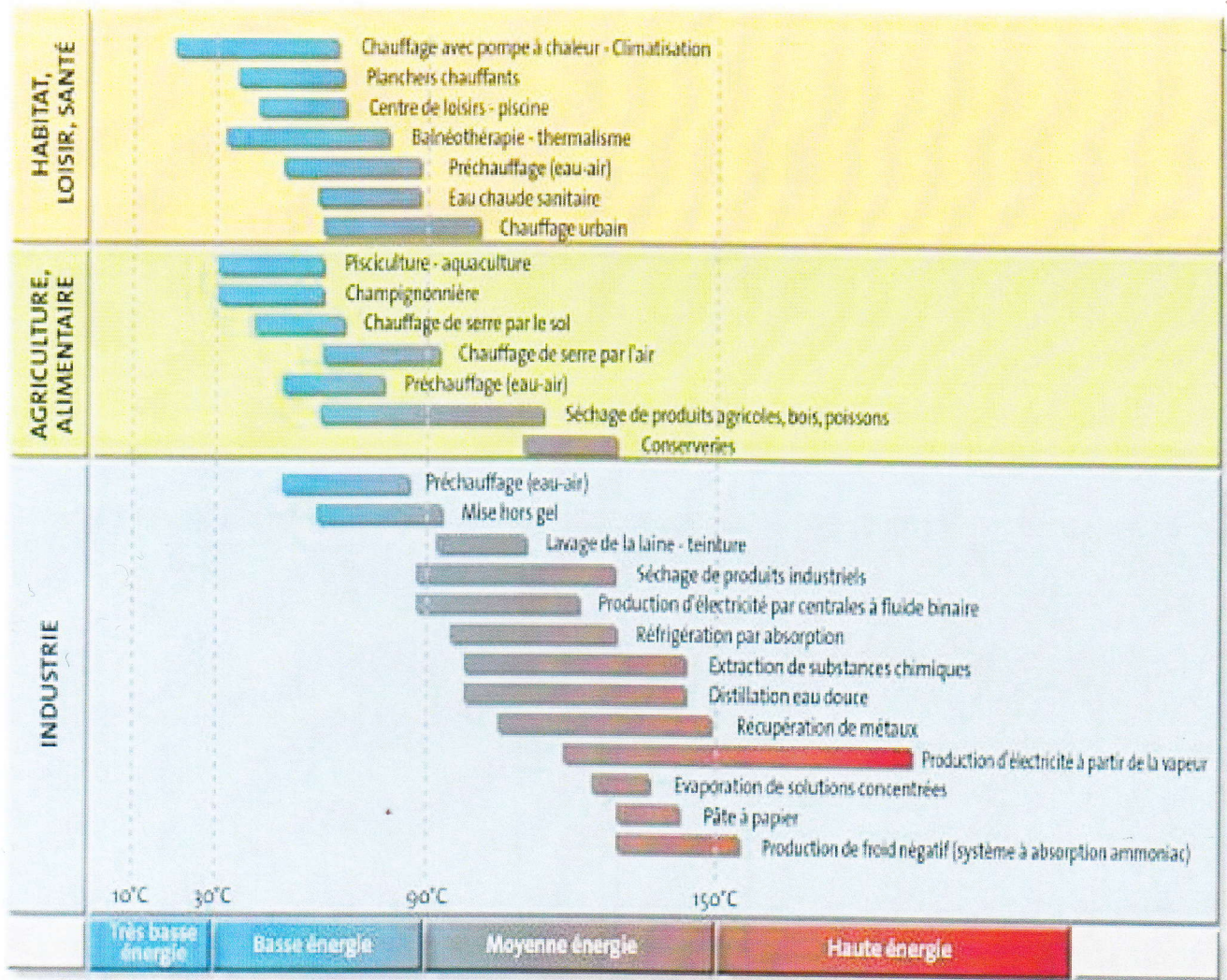


Figure (II-2)- différents types d'utilisation [18].

Ce tableau illustre bien les maintes utilisations possibles de l'énergie géothermique. Comme cité précédemment, celle-ci couvre le chauffage et/ou l'électricité. Elle concerne essentiellement trois secteurs : les particuliers, l'agriculture et l'industrie.

Ainsi, la géothermie de basse énergie est essentiellement utilisée dans l'habitat, les loisirs, la santé, et l'agriculture. Les planchers chauffants, par exemple, sont très prisés par les particuliers. Concrètement, il est possible de réaliser, chez soi, un système de chauffage géothermique : le

puits Canadien. Son principe est d'utiliser l'énergie thermique du sol afin de prétraiter l'air ventilant les bâtiments : l'air sera ainsi plus chaud en hiver et plus frais en été.

En agriculture, la géothermie a souvent été utilisée dans plusieurs pays pour chauffer les serres agricoles. La pisciculture recourt aussi à la géothermie.

Le secteur industriel, quant-à-lui, utilise principalement la géothermie à moyenne énergie, qui sert non pas à chauffer mais à produire de l'électricité.

La géothermie haute énergie est uniquement utilisée dans la production d'électricité à partir de la vapeur [18].

II-9-L'application de la géothermie dans le monde :

Au niveau mondial, L'utilisation de l'énergie géothermie dans le monde est actuellement en forte progression [6], les ressources géothermiques sont utilisées dans une gamme de températures allant de 10°C à plus de 250°C. Cette variété permet de nombreuses applications, telles que le chauffage de locaux à basse température jusqu'à la conversion en électricité, en passant par la pisciculture, le chauffage des serres ou encore le séchage de produits industriels.

II-9-1-Habitat, santé et loisirs :

Le chauffage de logements est la première application de la géothermie dite de «basse énergie». De multiples solutions existent en fonction de la température de la ressource et de celle du réseau de chaleur. Pour une maison familiale ou un immeuble, le chauffage de basse température peut être assuré par une ou plusieurs sondes géothermiques installées dans des forages de 100 à 200 m et couplées à une pompe à chaleur. Dans le cas d'un réseau de chauffage urbain de taille importante (plusieurs centaines de logements), un aquifère profond peut être exploité par un doublet géothermique. Selon le type d'installation, la géothermie couvre de 50% à 100% des besoins en chaleur. Si nécessaire, le solde est assuré par une chaudière d'appoint et/ou une pompe à chaleur. Dans le domaine de la santé et des loisirs, des sources chaudes naturelles et des forages alimentent les piscines des stations thermales, et peuvent également assurer tout ou partie du chauffage des bâtiments.

II-9-2-Agriculture et alimentation :

Les deux applications principales de la géothermie dans le domaine agricole sont la pisciculture et les serres. Les cultures sous serres constituent une option intéressante, car les besoins en énergie sont élevés. C'est en Italie, en Hongrie et en Islande que l'on trouve les plus grands complexes de serres chauffées par la géothermie. En ce qui concerne la pisciculture, une augmentation de la température de quelques degrés et surtout son maintien à un niveau constant produit un accroissement du métabolisme chez les poissons et les crustacés. Dans le domaine de la fabrication de produits alimentaires, des températures entre 40°C et 100°C sont utilisées pour déshydrater fruits et légumes. A partir de 60°C, de l'air réchauffé peut servir au séchage de produits agricoles, de poissons et de bois.

II-9-3-Industrie :

La mise hors gel de grands bâtiments industriels peut être assurée par une ressource géothermique de température modérée, mais la plupart des besoins en eau chaude ou en vapeur de l'industrie se situent entre 10°C et 200°C. Si la ressource géothermique est inférieure à 100°C, elle sera utilisée pour préchauffer l'eau, dont la température sera ensuite relevée au moyen d'une chaudière à gaz ou à fuel. De nombreux processus nécessitent de grandes quantités d'eau chaude, tels que la fabrication de pâte à papier, le lavage de textiles, l'extraction de substances chimiques ou encore l'évaporation de solutions concentrées [18].

Au total, 9000 MW d'électricité géothermique sont installés dans 24 pays et 28000 MW th de chaleur proviennent d'installations situées dans 71 pays. De nouvelles centrales sont en construction dans dix pays, pour une production totale.

L'électricité est produite à partir de la géothermie dans plus de 20 pays dans le monde, la Chine, l'Islande, les États-Unis, l'Italie, la France, l'Allemagne, la Nouvelle-Zélande, le Mexique, le Nicaragua, le Costa Rica, la Russie, les Philippines, l'Indonésie, le Japon, le Kenya et le Canada [6].

II-10-L'énergie géothermique dans le sud Algérien :

L'énergie géothermique a été utilisée dans plusieurs pays dans le domaine de l'agriculture pour chauffer les serres agricoles et les puits d'eau chaude qui étaient destinés depuis plusieurs décennies pour la consommation humaine et pour l'irrigation, ne furent exploités pour le chauffage des serres agricoles et c'était une contribution assez modeste de l'énergie géothermale dans le développement du secteur agricole et comme en algérien et les domaines d'application directe de cette énergie est vastes.

L'Algérie est l'un des plus vastes pays d'Afrique et le plus vaste du Nord du continent et Les ressources géothermiques de l'Algérie sont relativement importantes et diverses. Elles sont Localisées aussi bien au Nord qu'au sud.

Les ressources géothermiques en Algérie sont de basse enthalpie (température ≤ 100 °C) et sont destinées à des utilisations directes comme le chauffage de serre et le chauffage des Habitations en milieu urbain [19].

En Algérie, la nappe continentale intercalaire dite Albienne, constitue un réservoir ensemble géothermique continu. Les températures enregistrées varient entre 50-70 °C, certains forages débitent à 400l/s. La profondeur du réservoir passe de 800 m à Ouargla, à 1300 m à Touggourt puis à 2600 m à Biskra. Les eaux chaudes de l'Albien sont utilisées essentiellement pour le bal néologie. Une place particulière doit être accordée à ces ressources qui présentent des réserves importantes et des températures non négligeables, atteignant dans la partie Est les 70 °C. Les domaines d'application sont variés, ces eaux peuvent convenir pour le chauffage urbain et pour des usages agricoles. Dans un premier temps, nous devrions utiliser les eaux de l'Albien pour a production l'électricité [20].

II-10-1-Contexte géologique de la région d'Ouargla :

La région d'Ouargla est située au nord-est de la Grand Sahara algérien, il est distant 850 km de capitale Alger. Elle est limitée au nord par Djelfa et ministères El-Oued, au sud par Illizi et ministères Tamanrasset, à l'ouest par Ghardaïa. Le bassin d'Ouargla correspondant à une grande dépression (un grand Oasis du Sahara algérien) , qui couvre une superficie d'environ 750 km² [21] .

Sur la région d'Ouargla, l'albien correspond à la série lithologique supérieure du Continental Intercalaire ; Ce sont des grès, argiles et sables. L'épaisseur de ces formations est variable (417- 432 m). Les éléments détritiques (non argileux) sont Largement prépondérants (70 à 90%) et sont représentés par des grès fins avec des passées de grès moyens et parfois d'intercalations de sables grossiers à limons argileux ou souvent carbonatés [22].

II-10-2- L'énergie géothermique dans la région Ouargla :

La géothermie basse énergie entre 30 °C et 100 °C dans des gisements situés entre 1500 et 2500 m de profondeur. Elle présent dans plus de 70 pays du monde et totalisait, équivalent que Dans les payes de le monde les deux principaux usages sont, d'une part, les bains et piscines, d'autre part, le chauffage de logements ou de bâtiments, chacun pour plus du tiers .mais la géothermie peut aussi servir au chauffage de serres, de lieux d'élevage d'animaux, de Piscicultures, au séchage de produit agricoles, à la mise hors gel des routes, à la climatisation ou à la réfrigération (la chaleur géothermique, grâce à une machine frigorifique à absorption, rafraichit les locaux).

Ce type de géothermie est économique à l'heure actuelle, toutefois, la faisabilité des opérations doit être déterminée au cas par cas. En effet, d'une part la ressource est très divers selon les régions (profondeur des nappes exploitables, souvent superposées, variant de 800 à 3000 m) et, d'autre part, le type des besoins en surface (nombre de logements à raccorder, dispersion, mode de chauffage dans les locaux) varie et doit être adapté au mieux à la ressource. Les potentiels énergétiques de ce type de géothermie sont bien connus grâce aux nombreuses compagnies pétrolières dont les résultats sont en général disponibles dans les zones de bassins sédimentaires.

Il existe dans le Sud algérien des nappes d'eaux fossiles géothermales à grande profondeur (albien), ce qui représente un potentiel géothermique très important. Cette énergie thermique permet de développer l'agriculture sous serres (Healing green house) et même pour chauffer les locaux et habitations (comme en Allemagne) [23].

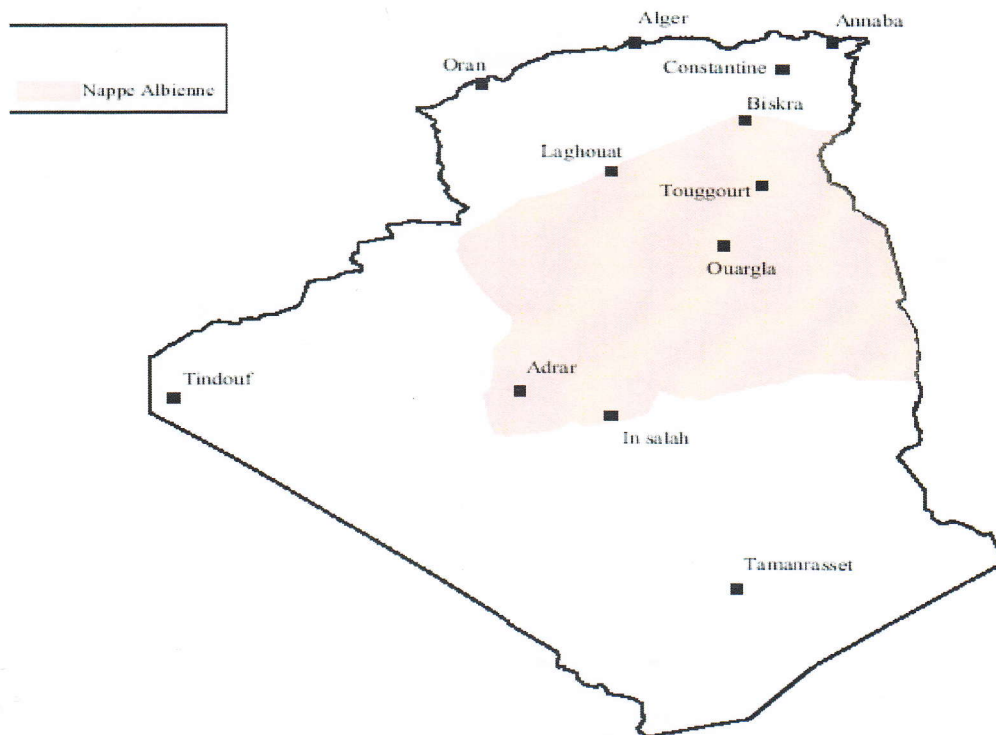


Figure (II-3) : Situation géographique de la région d'étude [24].

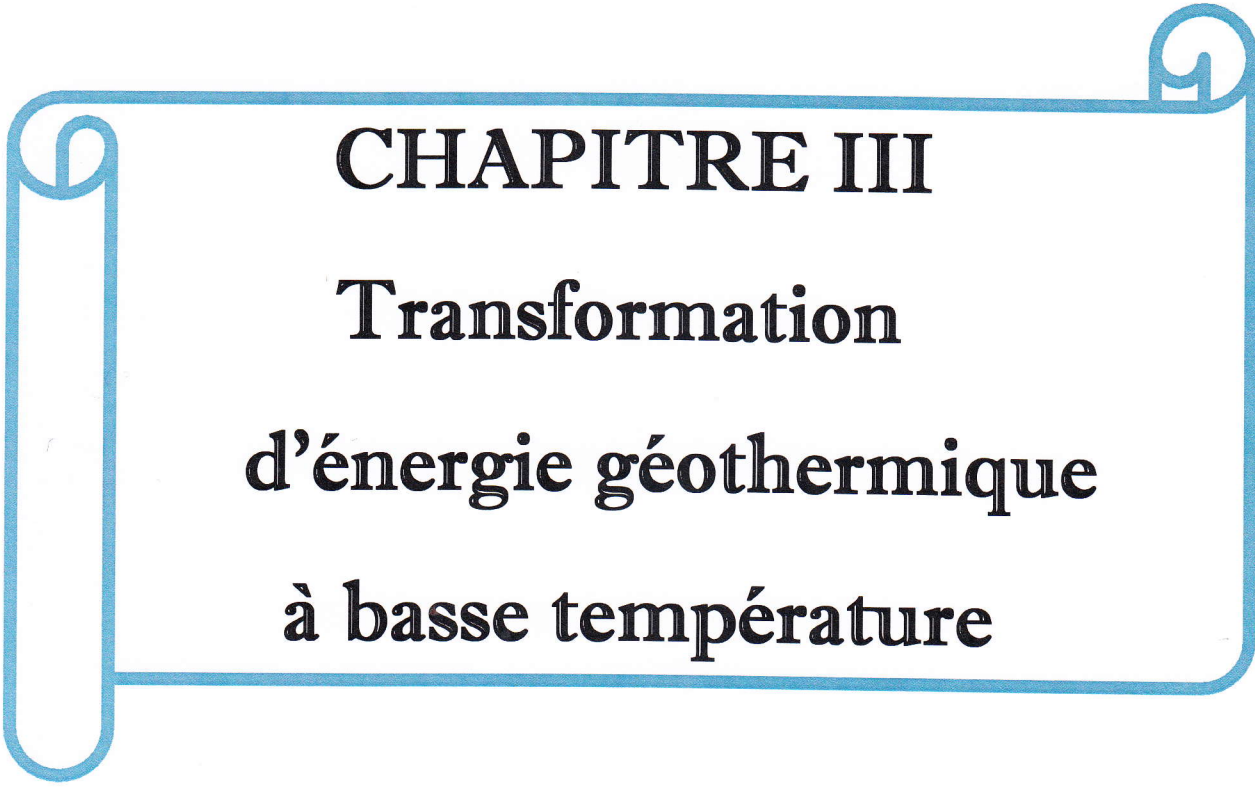
II-10-3 Caractéristiques du forage thermale d'Ouargla :

| Application forage | nappe | Profond | Niveau statique | Niveau dynamique | Débit départ (l/ s) | Débit actuel (l/ s) | Date de mise en service |
|--------------------|----------|---------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| Forage albien n 1 | albien | 1335 | - | | 200 | 180 | 1973 |
| Forage albien n 2 | albien | 1409 | - | - | 200 | 180 | 1987 |
| Forage sokra | sénonien | 200 | 6,30 | 29,70 | 30 | 20 | 1976 |
| Forage sokra | sénonien | 200 | 6,00 | 9,32 | 30 | 20 | 1993 |
| Forage haï bouzid | N, p | 64 | - | - | 20 | 20 | 1990 |

Tableau (II-1) : Caractéristiques du forage thermale d'Ouargla

La température de l'eau, à la sortie de ces forages, varie entre 50 et 73 °C ; la plupart de ces forages sont artésiens et l'eau émerge sous une pression d'une vingtaine de bars. Le débit d'exploitation est généralement compris entre 80 et 100 l/s, soit une moyenne de 7 800 m³/jour.

La chaleur de cette eau est exploitée dans le but d'améliorer la production et la précocité des primeurs (tomate, concombre, melon, etc.) dont le rôle est très important dans le développement de la région. Cette eau est utilisée, après refroidissement, pour l'irrigation des cultures et de la palmeraie.



CHAPITRE III
Transformation
d'énergie géothermique
à basse température

III-1-Introduction :

La géothermie basse énergie (50 à 90 °C) peut se développer dans les zones à gradient normal où des formations géologiques favorables (porosité, perméabilité, épaisseur importantes) sont situées à une profondeur suffisante pour atteindre les températures que l'on cherche.

Il existe dans le Sud algérien des nappes d'eaux fossiles géothermales à grande profondeur (albien), ce qui représente un potentiel géothermique très important. Cette énergie thermique permet de développer l'agriculture sous serres et même pour chauffer les locaux et habitations (comme en Allemagne).

La température de l'eau, à la sortie de ces forages, varie entre 50 et 60°C ; la plupart de ces forages sont artésiens et l'eau émerge sous une pression d'une vingtaine de bars. Le débit d'exploitation est généralement compris entre 100 et 180 l/s.

Néanmoins l'énergie géothermique pourrait être aussi utilisée pour la production d'électricité à cycle binaire [20].

III-2- production d'électricité géothermale :

III-2-1-1-Cycle binaire :

Lorsque la température du fluide géothermique est moins de 100°C seulement un cycle binaire pourrait être considéré pour la production d'électricité (selon Maghiar T). La centrale géothermique à cycle binaire transforme l'énergie thermique du fluide géothermique en énergie mécanique, puis grâce à un générateur en énergie électrique. Le schéma de l'installation est montré en (Fig. III-1).

Le fluide géothermique chaud passe à travers un côté d'un échangeur de chaleur pour chauffer une pipe. Habituellement le fluide de fonctionnement est un hydrocarbure, tel que l'iso-pentane ou réfrigérant, pour des raisons environnementales, le fluide de fonctionnement approprié est le dioxyde de carbone CO₂. Le fluide de fonctionnement est vaporisé au contact de la chaleur d'origine géothermique, ensuite passé à travers une turbine pour générer de l'électricité [20].

La centrale géothermique à cycle binaire transforme l'énergie thermique du fluide géothermique en énergie mécanique, puis grâce à un générateur en énergie électrique

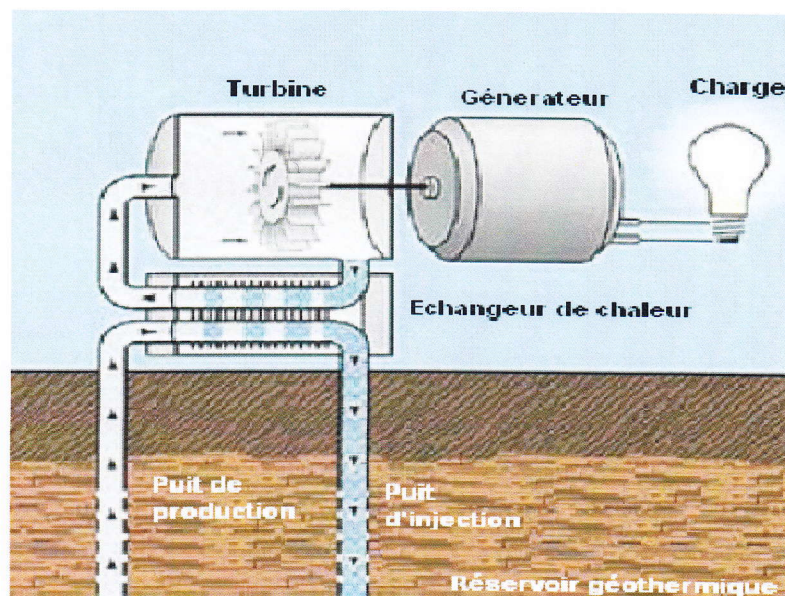


Figure (III-1) : Schéma simplifié d'un cycle binaire

III-2-2-Exemple sur les centrales géothermiques :

III-2-2-1-Expérience de la Roumanie :

Un groupe de chercheurs à l'université d'Oradea en Roumanie a développé des recherches dans le but de l'exploitation des ressources géothermiques de basse enthalpie pour la production d'électricité. Etant donné que la température du fluide géothermique est de moins que 100 °C (212 °F) seulement un cycle binaire pourrait être considéré pour la production d'électricité.

La centrale de l'université quant à elle est basée sur l'exploitation d'un seul puits artésien, au débit constant de 25 l/s et à la température de 84 °C. Une unité expérimentale de production d'électricité par cycle binaire d'une capacité installée de 1MW fonctionne seulement pendant l'été, lorsque la demande en chauffage est inexistante [20].

La première centrale pilote a été réalisée et examinée en 1984, d'une capacité installée de 100 kilowatts, le programme de recherche a continué et deux autres centrales ont été conçues avec des capacités respectivement de 500 MW en 1986 et de 1 MW en 1988. Basé sur l'expérience acquise et les résultats encourageants obtenus avec ces installations, l'équipe de chercheurs de Roumanie travaille actuellement sur la mise en application d'une nouvelle centrale avec une augmentation de la capacité et du rendement [19].

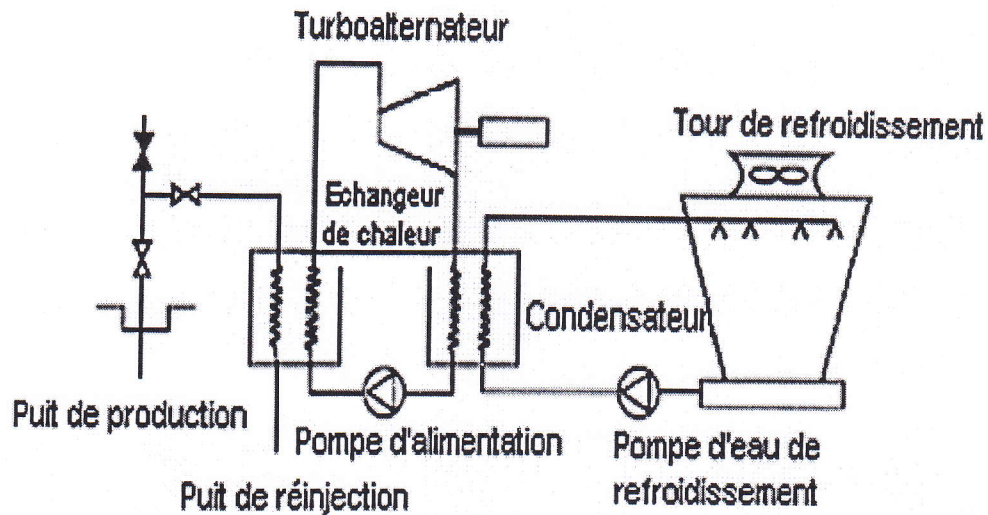


Figure (III-2) : Schéma simplifié de la centrale géothermique d'Oradea en Roumanie [25].

III-3-Le cycle de Rankine :

Le cycle de Rankine est un cycle organique thermodynamique sans surchauffe que dont la source de chaleur externe est transmise à une boucle fermée .ce cycle est très utilisée dans l'industrie ,il tient son nom de William John marquon Rankine qui utilise un fluide de travail organique pour générer de l'électricité à partir de source de chaleur géothermique ou solaire naturelle .le fluide de travail est chauffé à son point d'ébullition et la vapeur en expansion est utilisée pour actionner une turbine .

III-3-1- Le cycle de Rankine réel :

La plus grande source d'irréversibilité provient des turbines, dont le rendement est toujours inférieur à l'unité. Vient ensuite le rendement des pompes. Il y a finalement les pertes de chaleur et les chutes de pression à travers les diverses composantes.

En ce qui concerne l'influence des pressions sur le rendement, les tendances sont les mêmes que pour le cycle idéal. De façon générale, il est souhaitable de maintenir la pression dans le condenseur au-dessous de la pression atmosphérique, afin de faciliter le travail de la turbine, tout en gardant la température de condensation au-dessus de la température environnante pour favoriser le refroidissement.

Mentionnons qu'il est recommandé de maintenir un titre de vapeur d'au moins 0.9 à la sortie de la turbine afin de prévenir l'usure prématurée des ailettes. On préfère également recueillir un liquide saturé à la sortie du condenseur, plutôt qu'une vapeur humide, car cela facilite le travail de la pompe.

III-3-2-Le cycle de Rankine idéal :

Le cycle de Rankine idéal est complètement réversible. Les rendements de la turbine et de la pompe sont égaux à l'unité. Comme ces composantes sont également adiabatiques, la détente et la pressurisation de la vapeur se produisent à entropie constante, comme ci-dessous: pour calculer la puissance requise qui est égale à la variation d'enthalpie de la vapeur à travers la pompe.

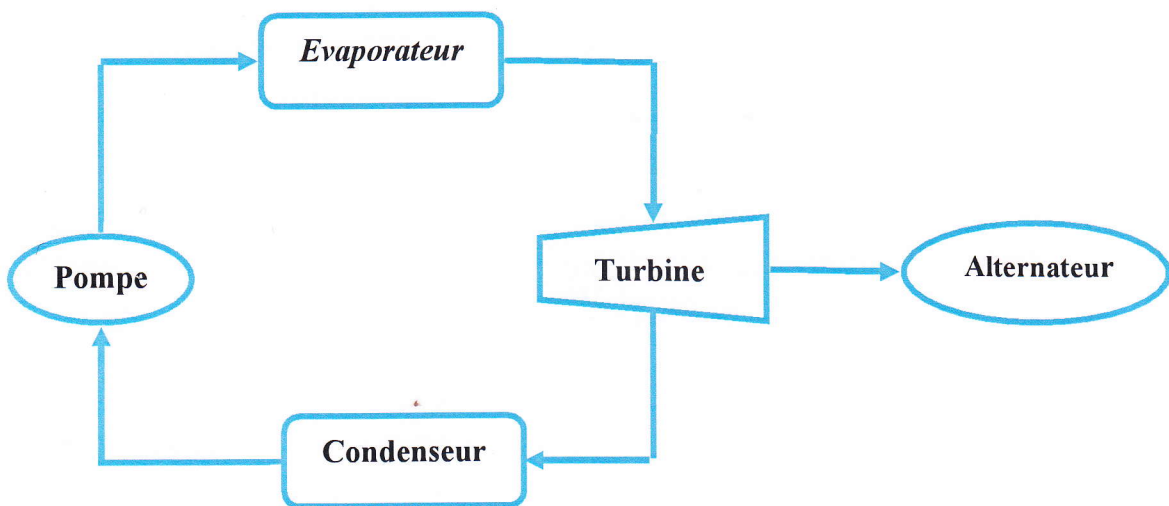


Figure (III-3) : Schéma simplifié de cycle de Rankine

III-4-Décomposition du système :

1. **L'évaporateur** : la chaleur est prélevée au fluide secondaire pour vaporiser le fluide frigorigène.
2. **La turbine** : il réduit la pression du fluide frigorigène en phase liquide.
3. **alternateur** : transformation l'énergie mécanique à énergie électrique.
4. **le condenseur** : le fluide frigorigène libère sa chaleur au fluide secondaire (eau, air...) en passant de l'état gazeux à l'état liquide.

5. **la pompe** : actionné par un moteur électrique, il élève la pression et la température du fluide frigorigène.

III-4-1-Définition les composants de cycle :

III-4-1-1-L'évaporateur :

L'évaporateur est un échangeur de chaleur, son rôle fondamental consiste à assurer un transfert de la chaleur aussi parfait que possible entre le milieu que l'on désire réfrigérer. En ce sens, l'évaporateur constitue le centre de l'absorption de chaleur, but final de tout système frigorifique [11].

En génie chimique, l'évaporateur est un appareil dessiné pour concentrer une solution par apport d'énergie, la solution étant composée par un solvant volatil en mélange avec une phase non volatile. La différence entre évaporation et séchage est dans le résultat du procédé : un liquide dans l'évaporation, un solide dans le séchage. L'évaporation peut engendrer la précipitation de la phase non volatile, faisant ainsi un procédé de cristallisation.

Dans le processus d'évaporation de l'énergie est consommée, sous forme de chaleur fournie au système ; l'évaporateur est donc classé comme un appareil exploitant un procédé thermique [26].

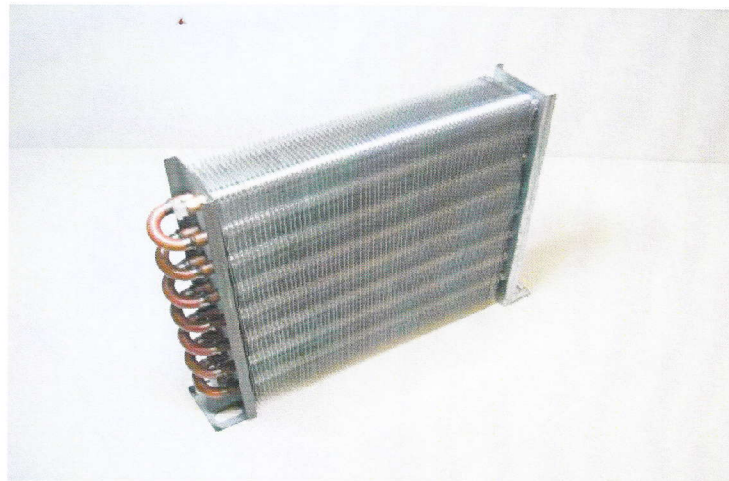


Figure (III-4) : Schéma simplifié L'évaporateur

III-4-1-1-1-Les types d'évaporateur :**III-4-1-1-a- Evaporateur à simple passage :**

Dans ce modèle, la séparation des phases liquide et gazeuse est faite soit dans le même échangeur, soit dans une chambre séparée ; la phase liquide est ensuite immédiatement extraite du circuit. On obtient ainsi un temps de contact avec les surfaces à haute température le plus réduit.

III-4-1-1-b-évaporateur à recirculation :

Ici le liquide circule continuellement entre échangeur et chambre de séparation de phases ; la circulation est engendrée soit par un effet thermosiphon - prenant avantage du différentiel de densité entre les liquides chaud et froid, soit par l'entraînement dû au changement d'état physique se développant à l'intérieur des tubes ceux-ci sont nommés à circulation naturelle.

III-4-1-1-C-évaporateur frigorifique :

Dans cet appareil un fluide frigorigène est vaporisé, en absorbant de l'énergie thermique du milieu existant dans la partie opposée d'un échangeur. On devrait donc classifier celui là comme un échangeur tout simple.

Dans le cas de tout système frigorifique à compression comme la pompe à chaleur par exemple, le fluide frigorigène, après avoir libéré sa chaleur et s'être condensé dans le condenseur, circule dans un circuit fermé. Ensuite, il passe à proximité d'une source de chaleur (air, sol ou eau) et ainsi se vaporise pour refaire un cycle.

Cet échangeur de chaleur permet l'évaporation du fluide frigorigène. Ce changement d'état consomme des calories et permet donc d'absorber de la chaleur au milieu (eau, air...), donc de le refroidir.

Cet échange de chaleur peut être fait de différentes façons :

- **Le plus répandu est l'évaporateur statique du réfrigérateur ménager :** L'air à la surface de la paroi se refroidit et par convection naturelle l'air se met en mouvement (l'air froid tombe vers le bas et l'air chaud va vers le haut). Ce procédé est réservé à de faibles puissances frigorifiques.

- **Échange de chaleur avec ventilation forcée :** Cet échange consiste à forcer la circulation d'air sur l'évaporateur et ainsi améliorer l'échange thermique entre le fluide frigorigène (ou caloporteur) et le corps à refroidir (air, eau...). Avec ce système, il est possible d'avoir de plus grosses puissances frigorifiques. Avec ces 2 procédés, il est possible de fonctionner en détente directe ou indirecte.
- **Échange entre le fluide frigorigène et l'eau :** L'eau peut être refroidie dans des échangeurs de type multitubulaires, échangeurs à plaques... Une fois cette eau refroidie, elle va circuler dans un réseau pour aller refroidir le corps. Dans ce cas on parle de détente indirecte et l'évaporateur devient frigorigène (tout reste identique, sauf que le tube est de qualité plomberie pour pouvoir accueillir de l'eau). Cette type on utilise dans nos études. [26].

III-4-1-2-les turbines :

Les turbines utilisées pour transformer l'énergie thermique du fluide en énergie mécanique Selon le type de fluide utilisé, dit fluide actif ou fluide moteur, on a affaire à une turbine hydraulique, une turbine à gaz ou une turbine à vapeur.

La turbine à vapeur est une machine thermique transforme l'énergie thermique d'un fluide et de pression de la vapeur d'eau en énergie mécanique de rotation disponible sur un arbre et permettant d'entraîner une autre machine, alternateur pour la production d'électricité compresseur.... (Ensemble d'organes mécanique) [27].

III-4-1-2-1-Le choix de turbine :

Selon le type de fluide utilisé, dit fluide actif ou fluide moteur, on a affaire à une turbine hydraulique, une turbine à vapeur ou une turbine à gaz.

Les turbines utilisées pour transformer l'énergie thermique du fluide en énergie mécanique sont de deux types : turbines axiales ou turbines radiales. Le choix de la technologie pour la turbine ORC dépend de plusieurs paramètres (plage de températures et de pressions pour le fluide organique, type de réseau électrique alimenté, diagramme de charge...) et influe très fortement sur le design (détente sur un ou plusieurs étages, installation d'un cycle de Rankine en cascade...), les performances (fonctionnement à charge partielle,...) et bien sûr le coût de l'installation. C'est une des raisons pour lesquelles les modules ORC sont toujours conçus pour des applications spécifiques (géothermie, biomasse, solaire, récupération de chaleur).

Pour ces différentes raisons, à capacité comparable, un module ORC avec fluide organique offrira un meilleur rendement qu'une machine thermodynamique classique donc offrira un prix de revient de l'électricité ou de la chaleur produite inférieure à une installation traditionnelle [27].

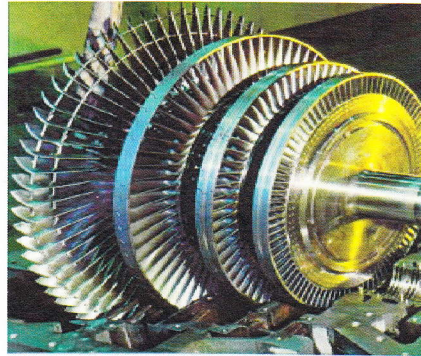


Figure (III-5) : Schéma simplifié de la turbine

III-4-1-2-2-Les types de turbines :

➤ Turbine à gaz :

C'est la technologie la plus utilisée en général pour les moyennes et grandes puissances. Ses systèmes sont à démarrage rapide et s'adaptent rapidement à une variation de la charge.

Une grande quantité d'air est aspirée et comprimée dans une chambre de combustion où a lieu une injection en continu du combustible. Les produits de combustion, lors de leur détente, entraînent le compresseur et l'arbre de sortie. La turbine fonctionne au gaz ou au fioul domestique. L'énergie mécanique est soit utilisée directement en entraînement de machines tournantes, soit convertie en énergie électrique via un alternateur. La température des gaz d'échappement avoisine les 500°C, autorisant ainsi un large choix de valorisation.

Comme précédemment, on distingue deux types de turbines à gaz. [28]

➤ Turbine à vapeur :

La turbine à vapeur est une machine thermique transforme l'énergie thermique et de

pression de la vapeur d'eau en énergie mécanique, à l'aide d'un ensemble d'organes mécanique.

Les turbines à vapeur sont utilisées en raffinerie pour entraîner les machines suivantes : pompe, compresseur centrifuges, compresseurs alternatifs (dans certaines raffineries seulement), alternateurs utilisés pour la production d'électricité. [28]

III-4-1-3-Alternateur :

L'alternateur est une machine tournante destinée à produire une tension alternative sinusoïdale. Son fonctionnement est proche de celui d'une génératrice de bicyclette à cette différence près qu'il peut peser plusieurs dizaines de tonnes.

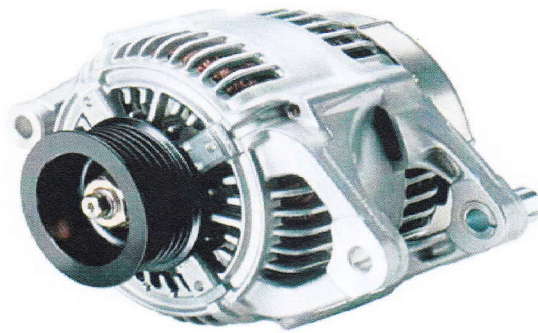


Figure (III-6) : Schéma simplifié d'alternateur

III-4-1-4-Le condenseur :

Le condenseur d'une machine frigorifique est essentiellement un échangeur de chaleur, à travers le quel le cycle frigorifique rejette de la chaleur au milieu extérieur. Le condenseur est un appareil "essentiellement un échangeur de chaleur", dont la fonction principale est de condenser (transformation d'un gaz en liquide) de la vapeur à l'aide d'un fluide réfrigérant. Le fluide à condenser est soit un corps pur, soit un mélange. La chaleur latente du corps est transférée dans le fluide réfrigérant, ce qui consiste en un changement de phase à température constante. Le fluide réfrigérant varie en fonction de la température de condensation du gaz : air, eau, saumure, le changement d'état étant appelé condensation. Nous avons vu qu'il était nécessaire de fournir une certaine quantité de chaleur pour transformer le liquide en vapeur, inversement il est nécessaire de prélever à la vapeur une certaine quantité de chaleur pour la

ramener à l'état liquide, les quantités de chaleur nécessaires à la condensation et à la vaporisation sont égales [26].

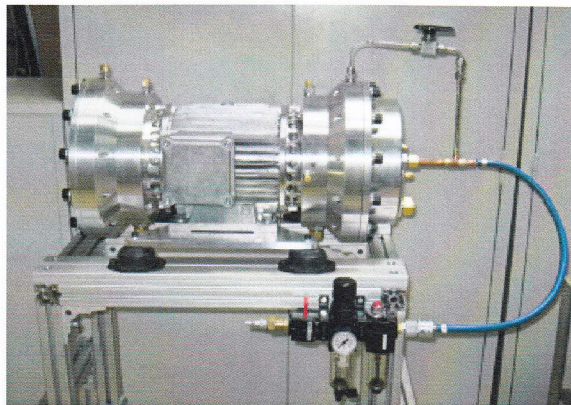


Figure (III-7) : Schéma simplifié de condenseur dans laboratoire

III-4-1-5- La pompe :

Est un dispositif technique qui est connecté à une entrée et conduit de sortie, un fluide comme un liquide, de vapeur ou de gaz à l'entrée d'un tuyau d'admission, puis à un tuyau de sortie par l'offre d'énergie extérieures et transportés dans le même temps un appui supplémentaire en augmentant l'énergie de l'augmentation de la pression (liquide, accélération) permet. À l'exception du mécanisme de bélier hydraulique est l'énergie de la réalité, il pompe à travers une ligne de transport d'énergie distinctes sous la forme d'une liaison mécanique (approvisionnement en énergie mécanique), un câble (fourniture d'énergie électrique) ou une fluide ligne distincte (pression d'alimentation l'énergie).



Figure (III-8) : Schéma simplifié d'une pompe.

III-5-Fluide de travail :

Le fluide géothermal est maintenu sous pression à l'état liquide au moyen d'une pompe placée dans le(s) puits. En surface, le fluide géothermal est amené dans un échangeur de chaleur où il cède une partie de son énergie à un fluide volatil (alcane, HCFC...), appelé fluide de travail, présentant la propriété de se vaporiser à basse température. Le fluide de travail ainsi vaporisé est ensuite détendu dans une turbine couplée à un alternateur, puis condensé au contact du circuit d'eau de refroidissement d'un condenseur. Le liquide obtenu est alors renvoyé à l'échangeur de chaleur, au moyen d'une pompe, pour effectuer un nouveau cycle (vaporisation, détente, condensation, pressurisation).

Le fluide de travail évolue donc en circuit fermé. Le fluide géothermal est, quant à lui, rejeté en surface ou réinjecté dans sa formation d'origine après son passage dans l'échangeur de chaleur et épuisement de son contenu énergétique.

Le fluide de travail est chauffé à son point d'ébullition et la vapeur en expansion est utilisée pour actionner une turbine. Cette dernière peut servir à entraîner un générateur pour convertir le mouvement en électricité. La vapeur du fluide de travail est ensuite décondensé sous la forme liquide et réintroduite dans le système pour accomplir un nouveau cycle.

III-5-1-Les fluides frigorigènes :

Les fluides halogènes sont les plus répandus de tous les fluides frigorigènes. Ils sont inodores dans l'air pour des concentrations jusqu'à 20% en volume pour des concentrations supérieures ils donnent une odeur faible, les vapeurs de ces fluides sont donc pratiquement inodores et elles n'irritent pas. Les fluides frigorigènes de cette classe sont pratiquement non toxiques, ils sont ininflammables et incombustibles, car ils ne contiennent aucun élément capable d'entretenir la combustion.

Les fluides frigorigènes qui pénètrent dans l'évaporateur sont constitués par un mélange de liquide et de vapeur. Doivent donc présenter un certain nombre de caractéristiques indispensables dont les plus importantes sont indiquées ci-dessous. L'ordre d'importance de ces caractéristiques varie suivant l'application considérée :

Habituellement le fluide de fonctionnement est un hydrocarbure, tel que l'iso-pentane ou réfrigérant tel que R12, pour des raisons environnementales, le fluide de fonctionnement

approprié est le dioxyde de carbone CO_2 (aucun danger d'explosion, ininflammable, non toxique). Le fluide de fonctionnement est vaporisé au contact de la chaleur d'origine géothermique, ensuite binaire.

1- Le fluide frigorigène doit être ininflammable et non toxique.

2- les pressions correspondant aux températures de condensation usuelles, ne doivent pas être trop importantes, pour éviter la nécessité de prévoir une résistance mécanique élevée des divers éléments du circuit.

3- les pressions correspondant aux températures d'évaporation courantes pour le conditionnement d'aire et la réfrigération, doivent être supérieures à la pression atmosphérique, de façon à éviter l'introduction d'aire et de vapeur d'eau dans le circuit.

4- la chaleur latente de vaporisation doit être relativement importante, de façon à diminué le de fluide nécessaire pour une puissance frigorifique donnée.

5- le volume spécifique de la vapeur doit être relativement faible, puisque ce volume spécifique conditionne le déplacement nécessaire du compresseur. Cette propriété est plus importante pour les compresseurs alternatifs que pour le compresseur centrifuge, puisque ces derniers travaillent comme des pompes avec un grand débit et un taux de compression faible.

6- la chaleur spécifique du fluide en phase liquide doit être faible, de façon à ce que la quantité de chaleur à prélevé pour refroidir le liquide de la température de condensation à la température d'évaporation, soit peu importante. Cette chaleur est absorbée par vaporisation d'une partie du fluide, qui pour l'effet utile, vient donc débit en circulation.

7- la présence du fluide frigorigène doit pouvoir être détectée facilement par des appareils appropriés, de façon à permettre de localiser les fuites éventuelles du circuit.

8- le fluide frigorigène ne doit pas être préjudiciable à la qualité des huiles de graissage avec lesquelles il entre en contact.

9- les coefficients de conductibilité et la viscosité doivent donner lieu à des coefficients de convection élevés.

10- on doit pouvoir se le procurer facilement, son prix doit être et sa manipulation ne doit pas demander de précautions spéciales.

11- le fluide frigorigène ne doit pas avoir d'action corrosive sur les métaux généralement employés dans les circuits frigorifiques et doit chimiquement stable.

III-5-2-Le choix du fluide frigorigène :

Fluide présentant des caractéristiques particulières : Δh élevée, point d'ébullition à P_{atm} bas, Température critique élevée, Taux de compression faible, non inflammable, non toxique, stable chimiquement.

| Référence | Formule chimique | Température [°C] d'ébullition sous la pression atmosphérique normale |
|-----------------|------------------|--|
| R11 | $CCL_3 F$ | -23,7 |
| R12 | $CCL_2 F$ | -29,8 |
| R13 | $CCLF_3$ | -81.5 |
| R22 | $CHCLF_2$ | -40.8 |
| CO ₂ | CO ₂ | -56.6 |

Tableaux (III-1) : quelque fluide frigorigène

III-5-2-1-L'eau comme fluide frigorigène :

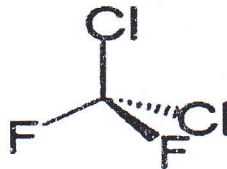
Le principe du cycle de réfrigération a été exposé en admettant que le fluide volatil employé était l'eau présente en effet un certain nombre de propriétés intéressantes, en tant que fluide frigorigène. On en trouve en abondance dans la nature et son prix est faible, son emploi ne présente aucun danger puisqu'elle est non toxique et ininflammable, de plus, sa chaleur de vaporisation est importante. Quoiqu'il existe des machines frigorifiques à vapeur d'eau et que l'eau serve de solvant dans les machines à absorption, son emploi n'est pas

pratique pour la réfrigération mécanique.

La limite inférieure de la température est de 0 °C, point de congélation. D'autre part pour obtenir une température d'eau suffisamment basse pour être utilisée dans les applications de conditionnement d'air, il faudrait fonctionner à des pressions entement basses, c'est-à-dire sous des vides difficiles à obtenir avec les compresseurs alternatifs. A cette faible pression, le volume spécifique important de la vapeur d'eau proscrit l'emploi des compresseurs alternatifs, alors que les compresseurs centrifuges sont incapables d'entretenir les vides élevés nécessaires.

Il est donc indispensable d'avoir recours à des fluides volatils, dont les propriétés correspondent mieux au but recherché.

III-5-2-2- Le dichlorodifluoro méthane :



Aussi vendu sous l'appellation Fréon-12 ou R12 selon la liste des gaz fluorés et frigorigènes, est un chlorofluorocarbure (CFC). CCl₂F₂, aussi vendu sous l'appellation Freon-12 ou R12 selon la liste des gaz fluorés et frigorigènes, est un chlorofluorocarbure (CFC) utilisé comme propulseur dans les aérosols jusqu'à ce que sa fabrication .

III-5-2-2-1- Propriétés :

| | | |
|-----------------|---|--------|
| Etat liquide | Température d'ébullition sous 1,013bar..... ⁰ C | -29 |
| | Masse volumique sous 1,013 bar et à la température d'ébullition.. (kg.m ⁻³) | 120,92 |
| | Equivalence liquide –gaz (1,013 bar et 15 ⁰ C)..... (vol/vol) | 292 |
| Etat gazeux | Masse volumique sous 1,103 bar au point d'ébullition (kg.m ⁻³) | 6,25 |
| | Masse volumique sous 1,103 bar et 15 ⁰ C..... (kg.m ⁻³) | 5,11 |
| Point critique | Température..... (⁰ C) | 110 |
| | Pression..... (bar) | 4,85 |

Tableaux (III-2) : caractéristique principale de R12

III-5-2-2- 2-Utilisation:

Intensivement utilisé comme réfrigérant, moussant, propulseur d'aérosol.

- Ancien frigorigène notamment pour les installations frigorifiques (industrielles, commerciales et domestiques)
- Ancien frigorigène pour les systèmes de conditionnement d'air
- Ancien frigorigène pour les climatisations automobiles
- Agent gonflant pour les mousses de polymères

III-5-2-3- Dioxyde de carbone :



Communément appelé gaz carbonique ou anhydride carbonique, est un composé chimique composé d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène et dont la formule brute est CO₂. C'est donc un oxyde de carbone, Le dioxyde de carbone est produit lors de tous

les processus de combustion. La production industrielle et les émissions des automobiles représentent un problème écologique majeur (effet de serre). Dans la maison, la principale source après les combustions est l'homme. (aucun danger d'explosion, ininflammable, non toxique mais le grand obstacle à son utilisation réside dans ses pressions élevées de fonctionnement) il nécessite de prévoir des éléments de forte résistance mécanique de plus, sa puissance frigorifique spécifique étant faible, son emploi comme fluide frigorigène se trouve très limité. Dans les conditions normales de température et de pression, le dioxyde de carbone est un gaz incolore, inodore et à la saveur piquante.

Il est présent dans l'atmosphère dans une proportion approximativement égale à 0,0375 % en volume Il est produit notamment lors de la fermentation aérobie ou de la combustion de composés organiques, et lors de la respiration des animaux ainsi que des végétaux. Pour ces derniers, la photosynthèse piège beaucoup plus de CO₂ que leur respiration n'en produit.

III-5-2-3-1-Propriétés :

| | | |
|---|---|----------------------|
| Etat liquide | Température d'ébullition sous 1,013bar..... ⁰ C | -78,5 ⁽²⁾ |
| | Masse volumique sous 1,013 bar et à la température d'ébullition (kg.m ⁻³) | 1562 ⁽²⁾ |
| | Equivalence liquide -gaz..... | 845 ⁽²⁾ |
| Etat gazeux | Masse volumique sous 1,103 bar et à 15 ⁰ C..... (kg.m ⁻³) | 1,87 |
| Point critique | Température..... (⁰ C) | +31 |
| | Pression..... (bar) | 73,8 |
| (2)-le dioxyde de carbone passe de l'état solide à l'état gazeux : données de température de sublimation ; de masse volumique solide sous 1 bar et d'équivalence solide -gaz pour 1 kg de solide. | | |

Tableaux (III - 3) : Caractéristique principale de CO₂

III-5-2-3-2-Utilisation:**➤ Sous forme gazeuse :**

- composant pétillant dans les boissons gazeuses ; en aquariophilie et culture sous serre pour une meilleure croissance des plantes
- solubilisation du calcaire dans les eaux dures ($TH > 25 \text{ °F}$) ;
- les pompes à bière : en étant en contact avec la surface de la bière, il évite son oxydation et prolonge sa conservation, contrairement à un compresseur utilisant de l'air (ambient) ;
- on se sert aussi parfois du CO_2 dans les grands abattoirs de porcs afin de les insensibiliser avant de les saigner.

➤ Sous forme liquide :

- réfrigérant pour congeler certains aliments ;
- réfrigérant dans l'industrie électronique ;
- agent d'extinction dans les extincteurs dits « au dioxyde de carbone », on parle parfois de neige carbonique parce que le CO_2 liquide se solidifie immédiatement à la sortie de l'extincteur en produisant une poudre blanche ;
- agent propulseur (et parfois également carbonatant) pour les boissons servies à la pression.
- Quand il est utilisé comme fluide frigorigène, le CO_2 porte la dénomination R744.
- À pression atmosphérique, le dioxyde de carbone n'est jamais sous forme liquide. Il passe directement de la forme solide à la forme gazeuse (sublimation).

➤ **Sous forme solide :**

Le dioxyde de carbone sous forme solide a de nombreuses appellations : « glace carbonique », « neige carbonique », « carboglace », « glace sèche ». Il est issu de la solidification du CO₂ liquide. On obtient de la neige carbonique qui est ensuite comprimée pour obtenir de la glace carbonique. et également présent en abondance aux pôles de la planète Mars, où il forme de véritables calottes glaciaires.

A notre une les forages albiens débitent à une pression en tête du forage de 24 bars et une température de 60 °C.

CHAPITRE IV

Application et discussions

Des résultats

IV-1-Introduction :

Les ressources géothermiques dans le Sud Algérie sont de basse enthalpie (température $\leq 100^{\circ}\text{C}$). Elles sont destinées aux utilisations directes comme pour le chauffage de serre et le chauffage urbain. L'énergie géothermique pourrait aussi être utilisée dans la production d'électricité par cycle binaire.

Un bon exemple est donné par la Roumanie. Étant donné que la température du fluide géothermique est de moins que 100°C seulement un cycle binaire pourrait être considéré pour la production d'électricité. La centrale géothermique à cycle binaire transforme l'énergie thermique du fluide géothermique en énergie mécanique, puis grâce à un générateur en énergie électrique. (Fig. IV-1) le fluide de fonctionnement approprié est le dioxyde de carbone CO_2 (aucun danger d'explosion, ininflammable, non toxique). Le fluide de fonctionnement est vaporisé au contact de la chaleur d'origine géothermique, ensuite il est passé à travers une turbine pour générer de l'électricité.

IV-2-Le cycle proposé :

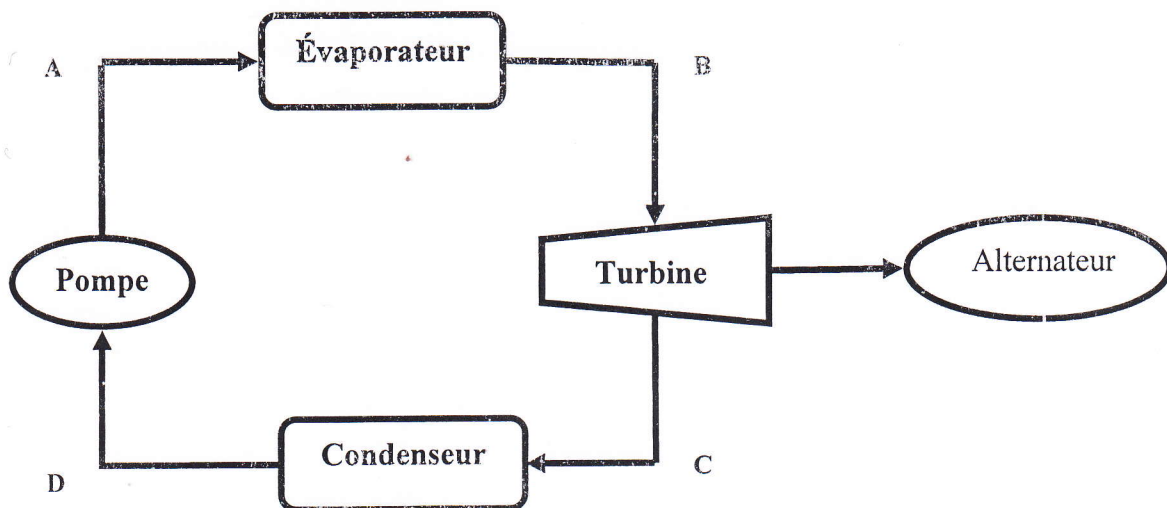


Figure (IV-1) : schéma simplifié d'un cycle Rankine

A-->B : vaporisation à pression et température constantes dans l'évaporateur.

B--> C : détente isentropique dans la turbine.

C--> D : condensation totale à pression constante et température constante dans le condenseur.

D-> A : compression isentropique dans la pompe.

IV-2-1-Le rendement de la turbine :

Le rendement est le rapport entre le travail de la turbine et l'énergie consommé.

IV-2-2-Premier principe de la thermodynamique :

On rappelle l'expression du premier principe de la thermodynamique pour un fluide en écoulement permanent entre une entrée et une sortie de machine sans variation d'énergie cinétique ni variation d'énergie potentielle :

$$W + Q = \Delta h = h_{\text{sortie}} - h_{\text{entrée}}$$

IV-2-3-Définition de la chaleur et du travail :

La chaleur Q est définie comme une forme d'énergie qui est transférée à travers la frontière du système à une température donnée à un autre système, à une température plus faible, en raison de la différence de température entre les deux systèmes δQ comptée positivement quand elle est reçue par le système.

Le travail w est défini comme résultant de l'action d'une force F au cours d'un déplacement, le déplacement s'effectuant dans la direction de la force.

IV-2-4-Conservation de la masse du système :

Dans un système fermé, au cours d'une transformation, la masse totale du système est conservée. Pour un système ouvert, il est nécessaire de définir un volume de contrôle déformable tel que, pour une transformation, au cours d'un pas de temps considéré, la masse à l'intérieur de ce volume soit constante. Le volume de contrôle contient alors un système fermé défini autour du système ouvert [28].

IV-2-5-Point de saturation :

Les points de saturation du mélange sont dénotés avec les indices L (pour le liquide saturé) et V (pour la vapeur saturée), et sont tabulés pour chaque pression et température.

Les valeurs de l'enthalpie dans les points de saturation, h_L et h_V , sont également tabulées, avec l'utilité que nous avons. Lorsque le fluide liquide passe de son état saturé à un état de vapeur saturée, nous avons, par application du premier principe :

IV-2-6-L'enthalpie spécifique de vaporisation :

Δh est donc la chaleur nécessaire pour transformer un liquide saturé en une vapeur saturée, à pression (ou température) constante. La valeur de Δh est indiquée pour chaque température.

IV-2-7- définit le titre de la vapeur :

Le titre X est la masse de vapeur saturée contenue dans un kilo de mélange liquide-vapeur. Cette définition nous permet de calculer les propriétés de tout mélange liquide-vapeur dont on connaît le titre. En effet, le volume total du mélange est égal au volume du gaz plus celui du liquide.

$$S = X S_V + (1-X) S_L \Rightarrow X = \frac{S - S_L}{S_V - S_L}$$

IV-2-8-Diagramme T-S :

Diagramme peut être construit pour toute substance pure. Fourni permet de visualiser l'évolution de l'eau au cours du cycle. On peut voir sur ce diagramme la courbe de saturation (courbe de rosée et courbe d'ébullition se rejoignent au point critique), qui délimite la zone "état liquide", la zone "état vapeur" et la zone "coexistence liquide vapeur".

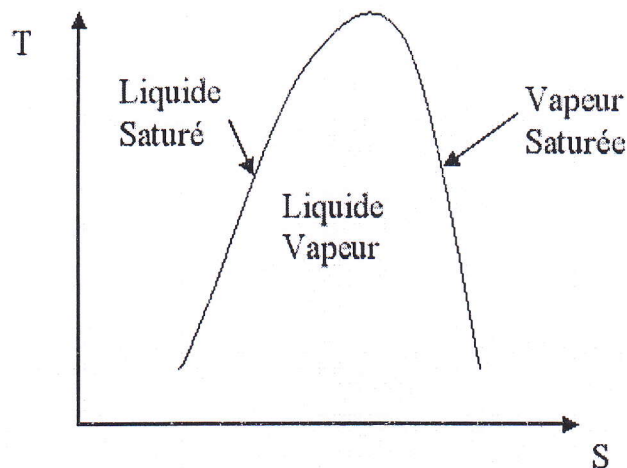


Figure (IV-2) : le diagramme des phases de liquide

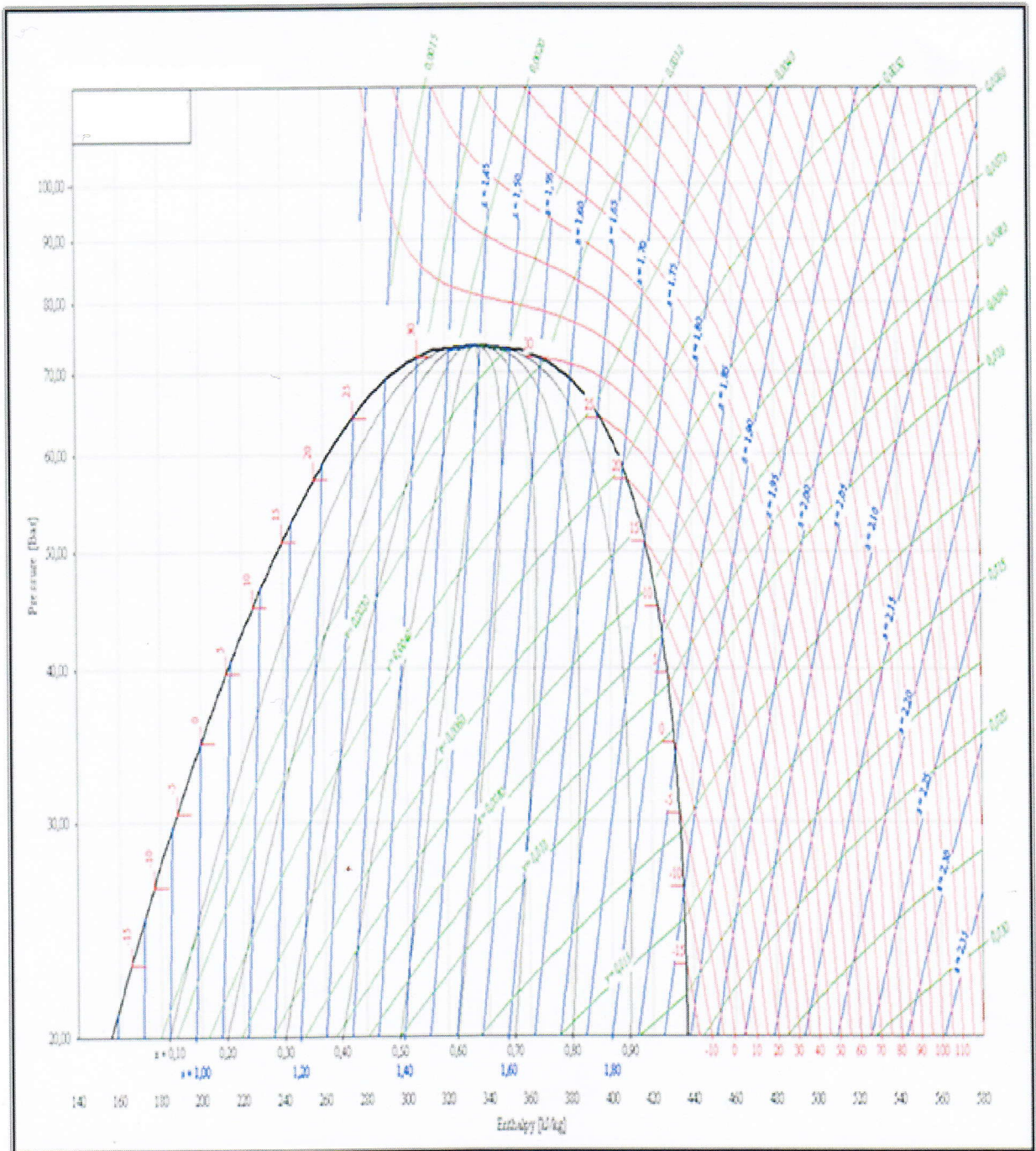


Figure (IV- 3) : Le diagramme de l'enthalpie et pression CO₂

IV-2-9-Chaleur de vaporisation :

La chaleur nécessaire pour faire passer le fluide de l'état liquide à l'état gazeux à la température constante, est appelée "chaleur latente de vaporisation".

IV-3-L'application :

On utilise le tableau dans l'annexe 1.

Selon les données de l'eau de l'albien (température de sortie 60 °C et le débit 180 l/s). On fixe chaque fois le débit du CO₂ et la température de la sortie de l'évaporateur pour calculer la quantité d'eau chaude nécessaire pour assurer l'évaporation.

1-calculer le débit d'eau nécessaire :Les bilans :

$$\triangleright Q_{CO_2} = \dot{m} \Delta h$$

$$\triangleright Q_{H_2O} = \dot{m} C_p \Delta T \Rightarrow \dot{m} = \frac{Q_{H_2O}}{C_p \Delta T}$$

Selon le diagramme de l'enthalpie et pression CO₂ figure (IV-3) On choisit les températures suivantes de fluide (CO₂) : T_{fluide} = (10, 20, 25, 30) °C.

$$C_{p, H_2O} = 4184 \text{ KJ /Kg} = 4.184 \text{ J /Kg}$$

$$\underline{1^{ere} \text{ CAS: } \eta_e = 100\%} \quad \dot{m}_{CO_2} = (1, 3, 5, 8, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60) \text{ Kg/S}$$

$$\underline{2^{eme} \text{ CAS: } \eta_e = 80\%} \quad \dot{m}_{CO_2} = (1, 3, 5, 8, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60) \text{ Kg/S}$$

On résume les résultats dans les tableaux suivants :

➤ 1^{ère} CAS : $\eta_e = 100\%$:

a)-Température de fluide = 30 °C

| \dot{m}_{CO_2} Kg/S | T_s °C | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
|--------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | \dot{m}_{H_2O} [Kg/S] | 3.011 | 1.505 | 1.003 | 0.752 | 0.602 | 0.501 | 0.430 | 0.376 | 0.334 | 0.301 |
| 3 | | 9.035 | 4.517 | 3.011 | 2.258 | 1.807 | 1.505 | 1.290 | 1.129 | 1.003 | 0.903 |
| 5 | | 15.059 | 7.529 | 5.019 | 3.764 | 3.011 | 2.509 | 2.151 | 1.882 | 1.673 | 1.505 |
| 8 | | 24.095 | 12.047 | 8.031 | 6.023 | 4.819 | 4.015 | 3.442 | 3.011 | 2.677 | 2.409 |
| 10 | | 30.119 | 15.059 | 10.039 | 7.529 | 6.023 | 5.019 | 4.302 | 3.764 | 3.346 | 3.011 |
| 15 | | 45.179 | 22.589 | 15.059 | 11.294 | 9.035 | 7.529 | 6.454 | 5.647 | 5.019 | 4.517 |
| 20 | | 60.239 | 30.119 | 20.079 | 15.059 | 12.047 | 10.039 | 8.605 | 7.529 | 6.693 | 7.529 |
| 30 | | 90.359 | 45.179 | 30.119 | 22.589 | 18.071 | 15.059 | 12.908 | 11.294 | 10.039 | 9.035 |
| 40 | | 120.47 | 60.239 | 40.159 | 30.119 | 24.095 | 20.079 | 17.211 | 15.059 | 13.386 | 12.047 |
| 50 | | 150.59 | 75.299 | 50.199 | 37.649 | 30.119 | 25.099 | 21.514 | 18.824 | 16.733 | 15.059 |
| 60 | | 180.71 | 90.359 | 60.239 | 45.179 | 36.143 | 30.119 | 25.817 | 22.589 | 20.079 | 18.071 |

Tableau (IV-1) : la variation de débit d'eau à partir de la température de sortie de l'eau pour différent débit de CO₂ ($\eta_e = 100\%$)

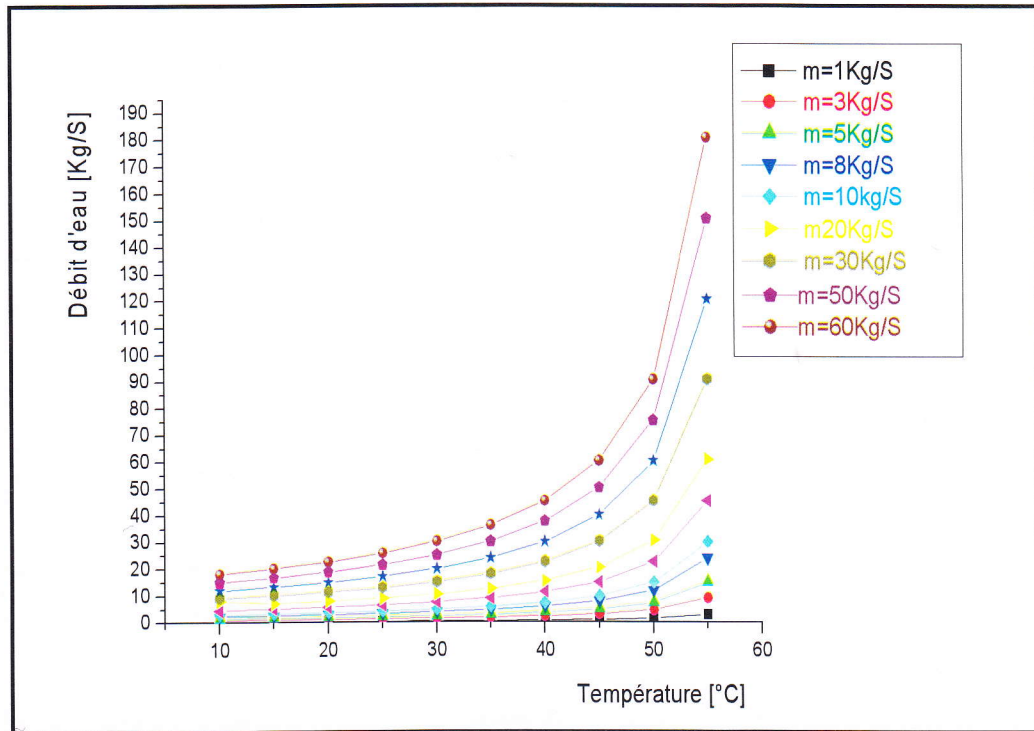


Figure (IV-4) : La variation de débit d'eau en fonction du débit de CO₂ et la température de sortie d'eau pour une température de CO₂ de 30 °C (Pour un rendement d'évaporations 100%)

D'après cette figure nous constatons que le débit d'eau augmente lentement pour des débits de CO₂ inférieure de (10kg/s). Mais pour des débits supérieurs de 15 kg/s en remarque bien l'évolution du débit d'eau en fonction du débit de CO₂ et la température sortie d'eau.

> 2^{ème} CAS : $\eta_e = 80\%$:

b)-Température de fluide = 30 °C :

| \dot{m}_{CO_2} [Kg/S] | T_s [°C] | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
|----------------------------|----------------------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | \dot{m}_{H_2O} [Kg/S] | 2.409 | 1.204 | 0.803 | 0.602 | 0.481 | 0.401 | 0.344 | 0.301 | 0.267 | 0.240 |
| 3 | | 7.228 | 3.614 | 2.409 | 1.807 | 1.445 | 1.204 | 1.032 | 0.903 | 0.803 | 0.722 |
| 5 | | 12.047 | 6.023 | 4.015 | 3.011 | 2.409 | 2.007 | 1.721 | 1.505 | 1.338 | 1.204 |
| 8 | | 19.276 | 9.638 | 6.425 | 4.819 | 3.855 | 3.212 | 2.753 | 2.409 | 2.141 | 1.927 |
| 10 | | 24.095 | 12.047 | 8.031 | 6.023 | 4.819 | 4.015 | 3.442 | 3.011 | 2.677 | 2.409 |
| 15 | | 68.517 | 34.258 | 22.839 | 17.129 | 13.703 | 11.419 | 9.788 | 8.564 | 7.613 | 6.851 |
| 20 | | 91.356 | 45.678 | 30.452 | 22.839 | 18.271 | 15.226 | 13.050 | 11.419 | 10.150 | 9.135 |
| 30 | | 137.035 | 68.517 | 45.678 | 34.258 | 27.407 | 22.839 | 19.576 | 17.129 | 15.226 | 13.703 |
| 40 | | 146.170 | 73.085 | 48.723 | 36.542 | 29.234 | 24.361 | 20.881 | 18.271 | 16.241 | 14.617 |
| 50 | | 228.391 | 114.195 | 76.130 | 57.097 | 45.678 | 38.065 | 32.627 | 28.548 | 25.376 | 22.839 |
| 60 | | 274.070 | 137.03 | 91.356 | 68.517 | 54.814 | 45.69 | 39.152 | 34.258 | 30.452 | 27.407 |

Tableau (IV-2) : la variation de débit d'eau à partir de la température de sortie de l'eau pour différent débit de CO₂ ($\eta_e = 100\%$)

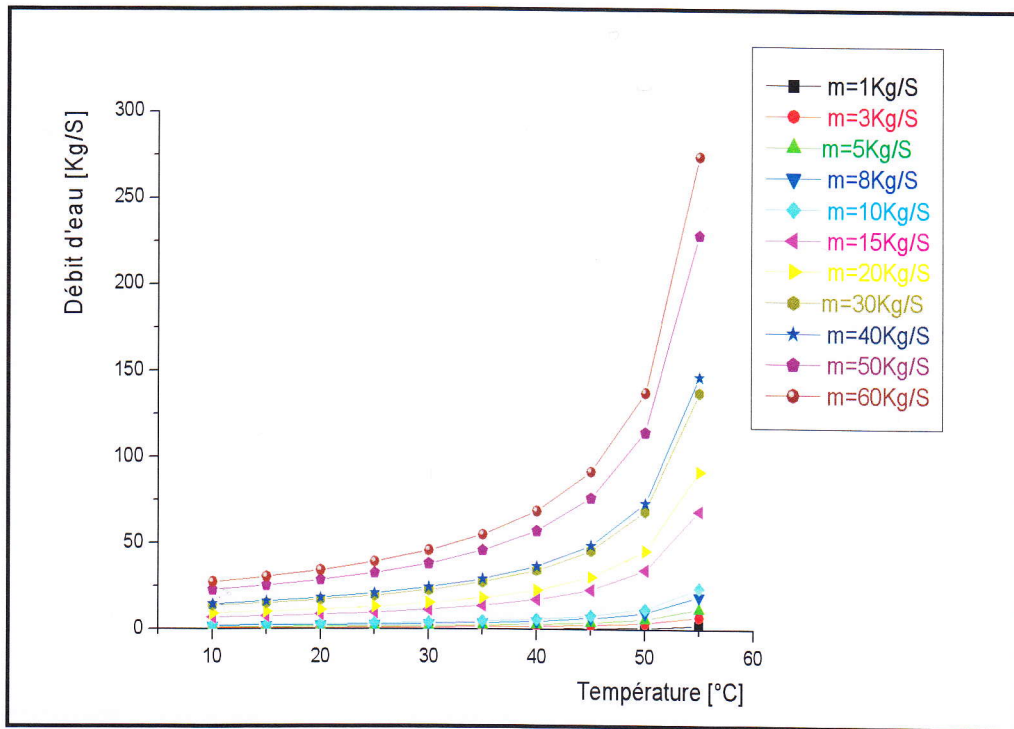


Figure (IV-5) : La variation de débit d'eau en fonction du débit de CO₂ et la température de sortie d'eau pour une température de CO₂ de 30°C (pour un rendement d'évaporations 80%)

D'après cette figure nous constatons que le débit d'eau augmente lentement pour des débits de CO₂ inférieure de (10kg/s). Mais pour des débits supérieurs de 15 kg/s en remarque bien l'évolution du débit d'eau en fonction du débit de CO₂ et la température sortie d'eau.

Pour les cas de T_{CO2} (25°C, 20°C, 10°C) voire annexe (2)

➤ **Interprétation générale sur les courbes :**

On générale le débit d'eau augmente avec l'augmentation de débit de CO₂ et la température de l'eau de sortie, mais à certaine débit CO₂ exige un débit d'eau supérieure de 200 l/s le débit qui existé).

2-Calculer le rendement de la turbine :**CO2 :**

La température de fluide (CO₂) 30 °C pour une détente de la turbine =10 ° C

1- La vaporisation :**➤ Les bilans :**

$$W + Q = \Delta h = h_{\text{sortie}} - h_{\text{entrée}} \quad (P = \text{cts})$$

$$W = W_1 + W_2$$

$$W_1 = \Delta h = h_v - h_L = h_B - h_A = 590.129 - 527.118 = 63.011 \text{ KJ/Kg}$$

$$W_2 = h_C - h_B = 632.625 - 590.129 = 42.496 \text{ KJ/Kg}$$

$$W = 63.011 + 42.496 = 105.507 \text{ KJ/Kg}$$

2- La détente isentropique:**➤ Les bilans :**

$$W + Q = \Delta h = h_{\text{sortie}} - h_{\text{entrée}}$$

$$\text{Isentropique : } \Delta S = 0 \text{ d'où } Q_{BC} = 0 \text{ et } W_{BC} = \Delta h = h_C - h_B$$

➤ En calcule h_C :

$$h_C = X h_v + (1-X) h_L$$

$$\text{On a } S_C = X S_V + (1-X) S_L \Rightarrow X = \frac{S_C + S_L}{S_V + S_L}$$

$$S_C = S_V (30^\circ) \text{ à la température d'entrée de la turbine}$$

$$X = \frac{S_V(30^\circ\text{C}) - S_L(10^\circ\text{C})}{S_V(10^\circ\text{C}) + S_L(10^\circ\text{C})} = \frac{4.7524 - 4.3827}{4.9128 - 4.3827} = 0.69$$

$$X = 0.69$$

$$h_C = [0.69 * 632.625] + [(1 - 0.69) * 477.295] = 584.472 \text{ KJ / Kg}$$

$$h_C = 584.472 \text{ KJ / Kg}$$

$$\Delta h = h_C - h_B = 584.472 - 590.129 = -5.656 \text{ KJ / Kg}$$

4-Le rendement de la turbine :

$$\eta_T = \frac{Q_T}{Q_{evap}} = \frac{|-5.656|}{105.507} * 100 = 5.36 \%$$

En résumé tous les calculent dans les tableaux suivants :

➤ **Température de fluide 30°C :**

| | | | | |
|---------------------|--------|---------|---------|---------|
| Détente [°C] | 5 | 10 | 15 | 20 |
| η_T [%] | 3.15 | 5.36 | 7.30 | 9.44 |
| Δh [kJ/ kg] | 88.712 | 105.507 | 114.174 | 120.119 |

Tableau (IV-3) : le rendement de la turbine à partir la détente et l'énergie échappement de l'évaporateur

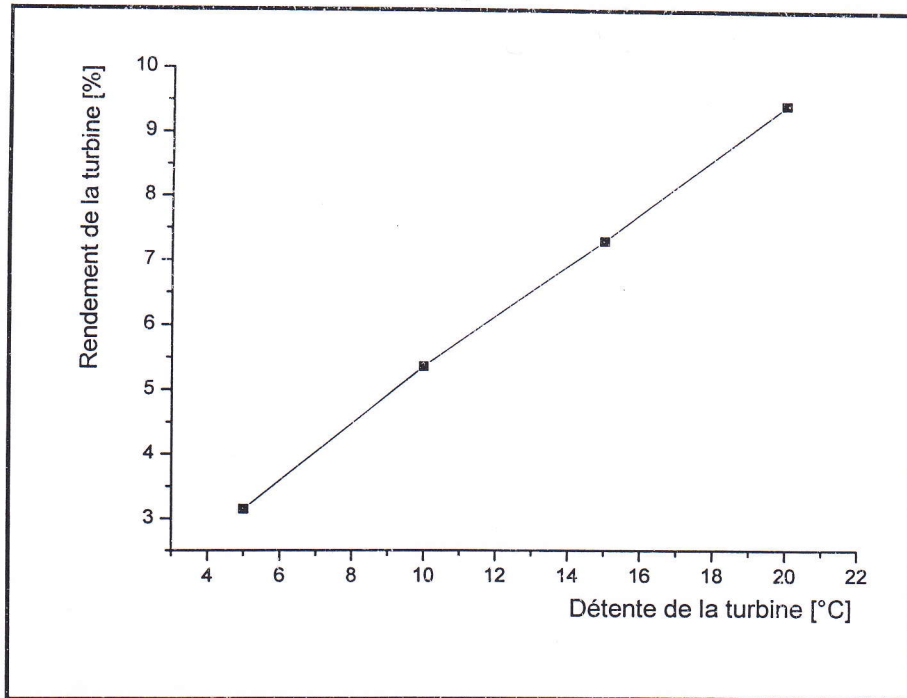


Figure (IV-6) : Le rendement de la turbine en fonction de la détente

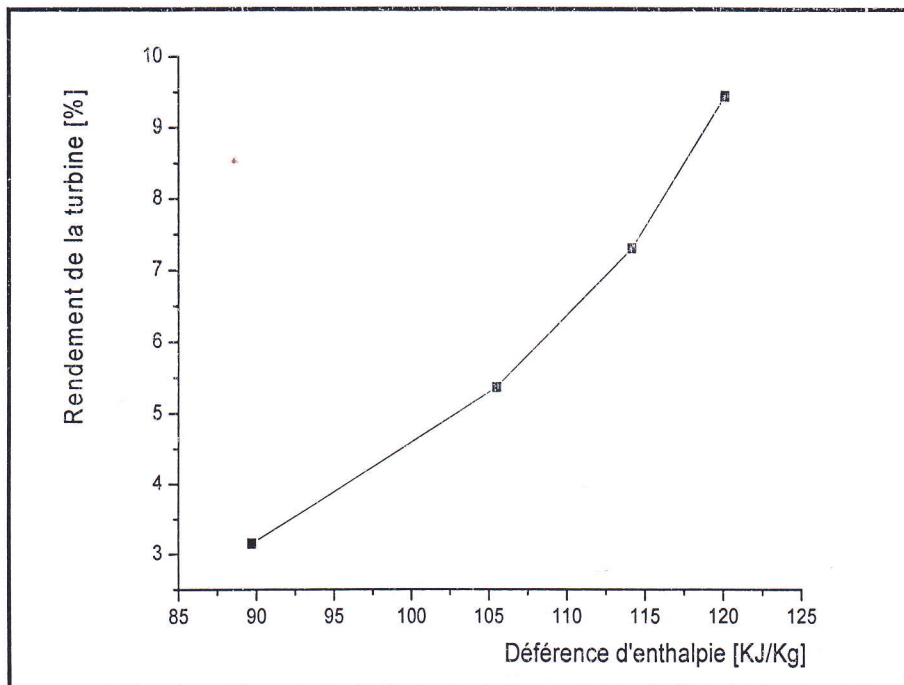


Figure (IV-7) : Le rendement de la turbine en fonction de la chaleur d'évaporateur

➤ Température de fluide 25°C :

| | | | | |
|--------------------|--------|-------|--------|---------|
| détente | 5 | 10 | 15 | 20 |
| η_T [%] | 2.31 | 4.31 | 6.58 | 9.27 |
| Δh (kJ/kg) | 135.23 | 143.9 | 149.84 | 153.446 |

Tableau (IV- 4) : Le rendement de la turbine à partir la détente et l'énergie échappement

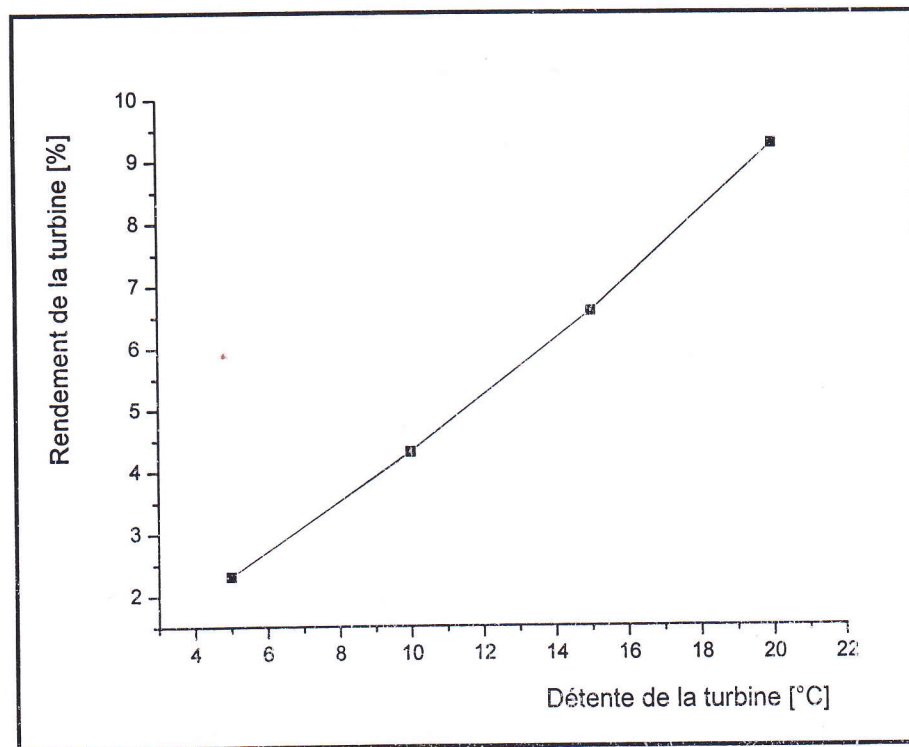


Figure (IV- 8) : Le rendement de la turbine en fonction de la détente

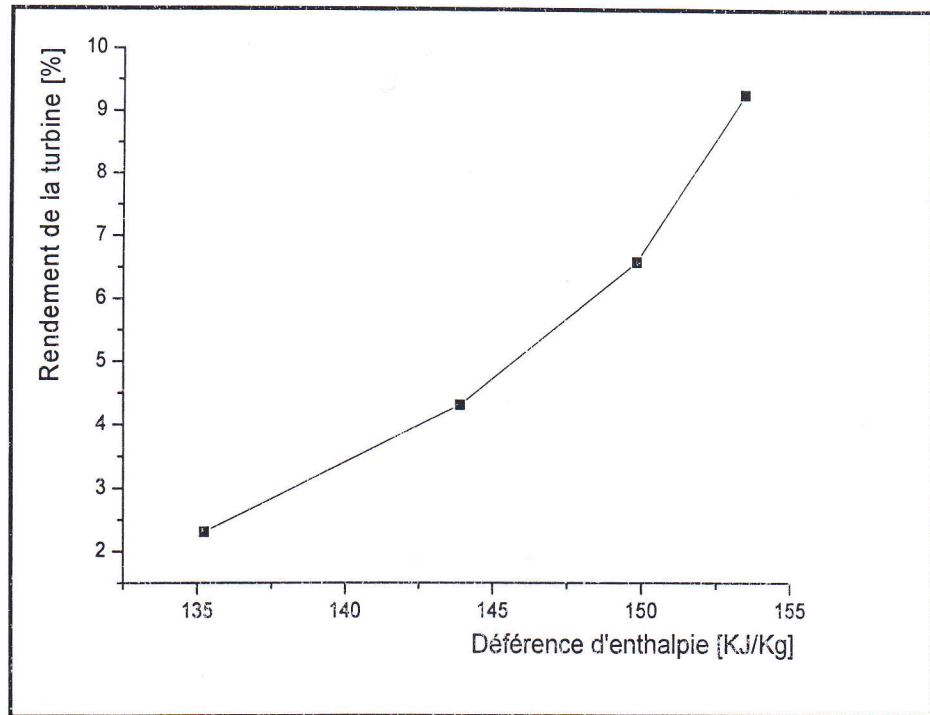


Figure (IV- 9) : Le rendement de la turbine en fonction de la chaleur d'évaporateur

➤ Température de fluide 20°C :

| | | | | |
|---------------------|---------|--------|--------|--------|
| détente | 2.5 | 5 | 10 | 15 |
| η_T [%] | 1.16 | 2.41 | 4.43 | 7.18 |
| Δh (kj/ kg) | 160.229 | 163.99 | 169.94 | 173.54 |

Tableau (IV-5) : Le rendement de la turbine à partir la détente et l'énergie échappement

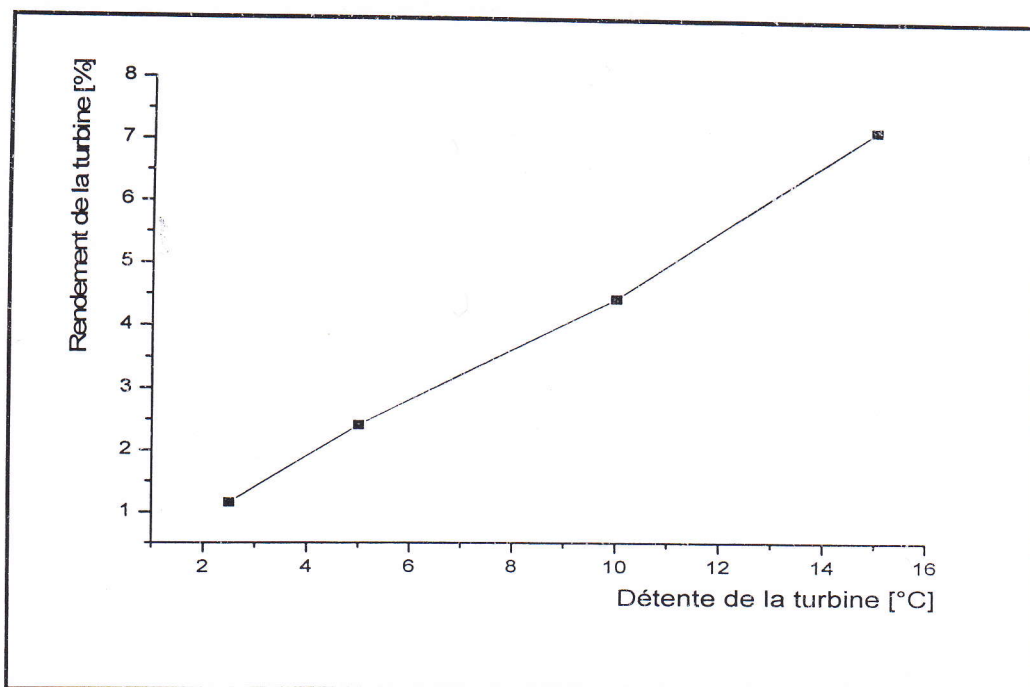


Figure (IV- 10) Le rendement de la turbine en fonction de la détente

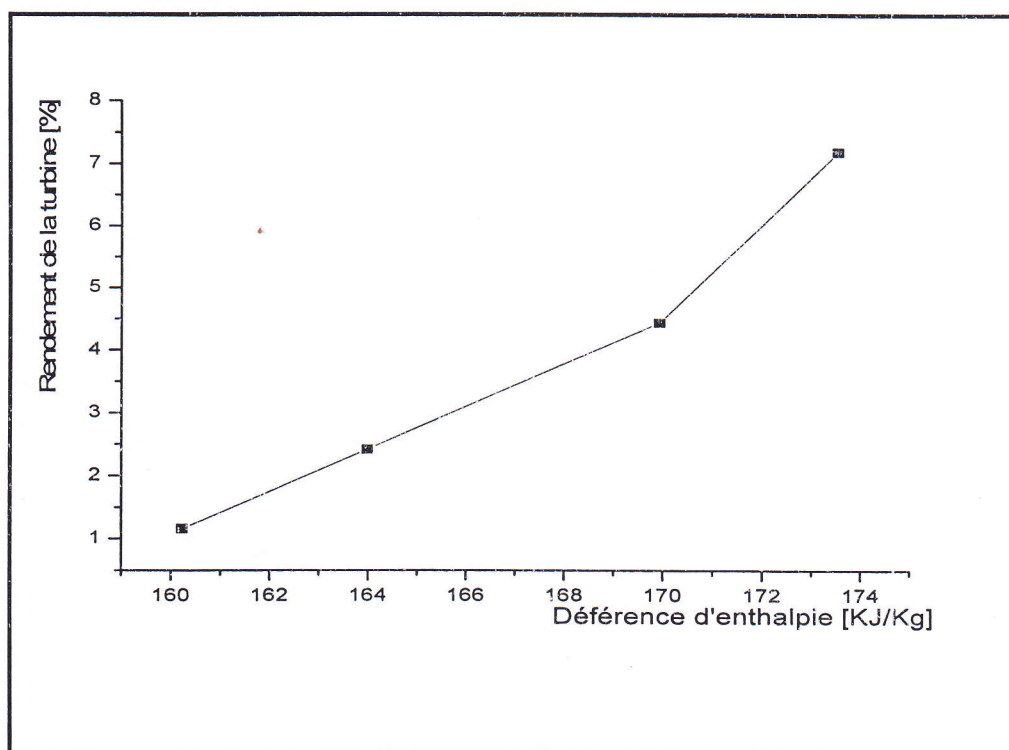


Figure (IV- 11) : Le rendement de la turbine en fonction de la chaleur d'évaporateur

➤ **Interprétation générale des courbes :**

A partir des figures (IV-6), (IV-8), (IV-10) nous observons que le rendement de la turbine dépend de la valeur de la détente de la turbine, mais il est de l'ordre de 10 %. Cette valeur elle est inacceptable pour la production industrielle.

Les figures (IV-7), (IV-9), (IV-11) représentent la variation du rendement de la turbine en fonction de la quantité d'énergie échangé par l'évaporation.

3-Calculer la détente de la turbine :

La deuxième proposition est de proposer un rendement industriellement rentable de l'ordre de : 70%, 60%, 50%.

Les bilans :

$$\text{➤ } \eta = \frac{W}{Q} \Rightarrow W = \eta * Q_{AB} \quad \text{et} \quad W_{BC} = h_C - h_B \Rightarrow h_C = h_B + W_{BC}$$

1^{ère} CAS : $\eta = 70\%$:

| | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T [°C] | 5 | 10 | 12.5 | 15 | 20 | 25 | 27.5 | 30 |
| Q _{CO2} [KJ/Kg] | 219.17 | 201.34 | 191.54 | 180.32 | 155.55 | 119.44 | 94.412 | 63.011 |
| W [KW] | 140.94 | 153.42 | 134.08 | 126.22 | 108.73 | 83.61 | 66.088 | 44.107 |
| h _c [KJ/Kg] | 788.17 | 804.26 | 778.64 | 767.51 | 741.35 | 700.45 | 671.29 | 634.23 |

Tableau (IV- 6) : Les valeurs de l'enthalpie de fluide à la sortie de la turbine en fonction de la température de fluide à l'entrée Pour un rendement fixé = 70%

A partir de le diagramme de l'enthalpie et pression CO₂ on remarque que la valeur de l'enthalpie correspond h_c = 634,23 KJ/Kg c'est la seule qu'on peut la pondre en considération

pour notre cas. Parce que La valeur maximale de l'enthalpie du CO₂ $h_{MAX} = 656,407$. Pour ce la en trouve la valeur nécessaire pour la détente de la turbine 10°C.

2^{ème} CAS : $\eta = 60\%$:

| T [°C] | 5 | 10 | 12.5 | 15 | 20 | 25 | 27,5 | 30 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Q _{CO2} [KJ/Kg] | 219.17 | 201.34 | 191.54 | 180.32 | 155.55 | 119.44 | 94.412 | 63.011 |
| W [KJ/Kg] | 131.50 | 120.80 | 114.92 | 108.19 | 93.198 | 71.669 | 56.647 | 37.806 |
| h _c [KJ/Kg] | 782.34 | 768.04 | 759.48 | 749.48 | 725.82 | 688.51 | 661.84 | 643.00 |

Tableau (IV- 7) : Les valeurs de l'enthalpie de fluide à la sortie de la turbine en fonction de la température de fluide à l'entré Pour un rendement fixé = 60%

A partir du le diagramme de l'enthalpie et pression CO₂ on remarque que la valeur de l'enthalpie correspond $h_c = 643,00$ KJ/Kg c'est la seule qu'on peut la pondre en considération pour notre cas. Parce que La valeur maximale de l'enthalpie du CO₂ $h_{MAX} = 656,407$. Pour ce la en trouve la valeur nécessaire pour la détente de la turbine 9°C

3^{ème} CAS : $\eta = 50\%$:

| T [°C] | 5 | 10 | 12.5 | 15 | 20 | 25 | 27.5 | 30 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Q _{CO2} [KJ/Kg] | 219.17 | 201.34 | 191.54 | 180.32 | 155.55 | 119.44 | 94.412 | 63.011 |
| W [KJ/Kg] | 109.56 | 100.67 | 95.773 | 90.162 | 77.665 | 59.729 | 47.206 | 31.50 |
| h _c [KJ/Kg] | 760.39 | 747.90 | 740.01 | 731.45 | 710.29 | 676.56 | 652.41 | 621.629 |

Tableau (IV-8) : Les valeurs de l'enthalpie de fluide à la sortie de la turbine en fonction de la température de fluide à l'entré Pour un rendement fixé = 50%

A partir du le diagramme de l'enthalpie et pression CO₂ on remarque que la valeur de l'enthalpie correspond $h_c = 621,629$ KJ/Kg et $h_c = 652,41$ KJ/Kg sont les deux valeurs qu'ont

pondre en considération pour notre cas. Parce que La valeur maximale de l'enthalpie du CO₂ $h_{MAX} = 656,407$. Pour ce la en trouve les valeurs nécessaire pour la détente de la turbine sont respectivement 8 °C et 16 °C

4- Calcule le débite d'eau nécessaire :

1^{ère} CAS : $\eta = 70 \%$ et $T_{fluide} = 30 \text{ °C}$:

Les bilans :

$$1- \eta = \frac{W}{Q} \Rightarrow W = \eta * Q = \dot{m}_{CO_2} * \Delta h$$

$$2- Q_{CO_2} = \dot{m}_{CO_2} * \Delta h = W$$

$$3- Q_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} * C_p * \Delta T \Rightarrow \dot{m}_{H_2O} = Q_{H_2O} / C_p * \Delta T$$

$$4- Q_{H_2O} = 0.8 Q_{CO_2}$$

$$\triangleright W = 0.7 * 63.011 = 44.107 \text{ KW} = Q_{CO_2}$$

$$\triangleright Q_{H_2O} = 44.107 * 0.8 = 35.286 \text{ KW}$$

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T_s \text{ [°C]}$ | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
| \dot{m}_{H_2O} [Kg/S] | 1.686 | 0.843 | 0.562 | 0.421 | 0.337 | 0.281 | 0.240 | 0.210 | 0.187 | 0.168 |

Tableau (IV- 9) : La variation de débit d'eau en fonction de la température de sortie d'eau

Pour un rendement fixé = 70%

2^{ème} CAS : $\eta = 60\%$ et $T_{\text{fluide}} = 30\text{ °C}$:

➤ $W = 0.6 * 63.011 = 37.806 \text{ KW} = Q_{\text{co2}}$

➤ $Q_{\text{H2O}} = 37.806 * 0.8 = 30.245 \text{ KW}$

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T_s[\text{° C}]$ | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
| \dot{m}_{H2O} [Kg/S] | 1.445 | 0.722 | 0.481 | 0.361 | 0.289 | 0.240 | 0.206 | 0.180 | 0.160 | 0.144 |

Tableau (IV-10) : La variation de débit d'eau en fonction de la température de sortie d'eau

Pour un rendement fixé = 60%

3^{ème} CAS : $\eta = 50\%$ et $T_{\text{fluide}} = 30\text{ °C}$:

➤ $W = 0.5 * 63.011 = 31.505 \text{ KW} = Q_{\text{co2}}$

➤ $Q_{\text{H2O}} = 31.505 * 0.8 = 25.204 \text{ KW}$

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T_s[\text{° C}]$ | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
| \dot{m}_{H2O} [Kg/S] | 1.204 | 0.602 | 0.401 | 0.301 | 0.240 | 0.200 | 0.172 | 0.150 | 0.133 | 0.120 |

Tableau (IV - 11) : La variation de débit d'eau en fonction de la température de sortie d'eau

Pour un rendement fixé = 50%

5- Calcule de la puissance électrique :

Pour calculer la puissance électrique on utilise les résultats précédant de la détente de la turbine qui sont respectivement 10 °C, 9°C, 8°C, 16°C pour une température d'évaporation de 30 °C et 27.5 °C.

➤ Pour $T_{\text{Fluide}} = 30^{\circ}\text{C}$ et la détente 10°C :

| | | | | | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| \dot{m} [Kg/S] | 1 | 3 | 5 | 8 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| W [KW] | 44.101 | 132.30 | 220.50 | 352.80 | 441.01 | 661.51 | 882.02 | 1323.0 |

Tableau (IV-12) : La variation de la production électrique en fonction de débit CO_2

Pour un rendement fixé = 70%

➤ Pour $T_{\text{Fluide}} = 30^{\circ}\text{C}$ et la détente 9°C :

| | | | | | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| \dot{m} [Kg/S] | 1 | 3 | 5 | 8 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| W [Kw] | 52.871 | 158.61 | 264.35 | 422.96 | 528.71 | 793.05 | 1057.4 | 1586.1 |

Tableau (IV-13) : La variation de la production électrique en fonction de débit CO_2

Pour un rendement fixé = 60%

➤ Pour $T_{\text{Fluide}} = 30^{\circ}\text{C}$ et la détente 8°C :

| | | | | | | | | |
|------------------|------|------|-------|-----|-----|-------|-----|-----|
| \dot{m} [Kg/S] | 1 | 3 | 5 | 8 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| W [Kw] | 31.5 | 94.5 | 157.5 | 252 | 315 | 472.5 | 630 | 945 |

Tableau (IV-14) : La variation de la production électrique en fonction de débit C Pour un rendement fixé = 50%

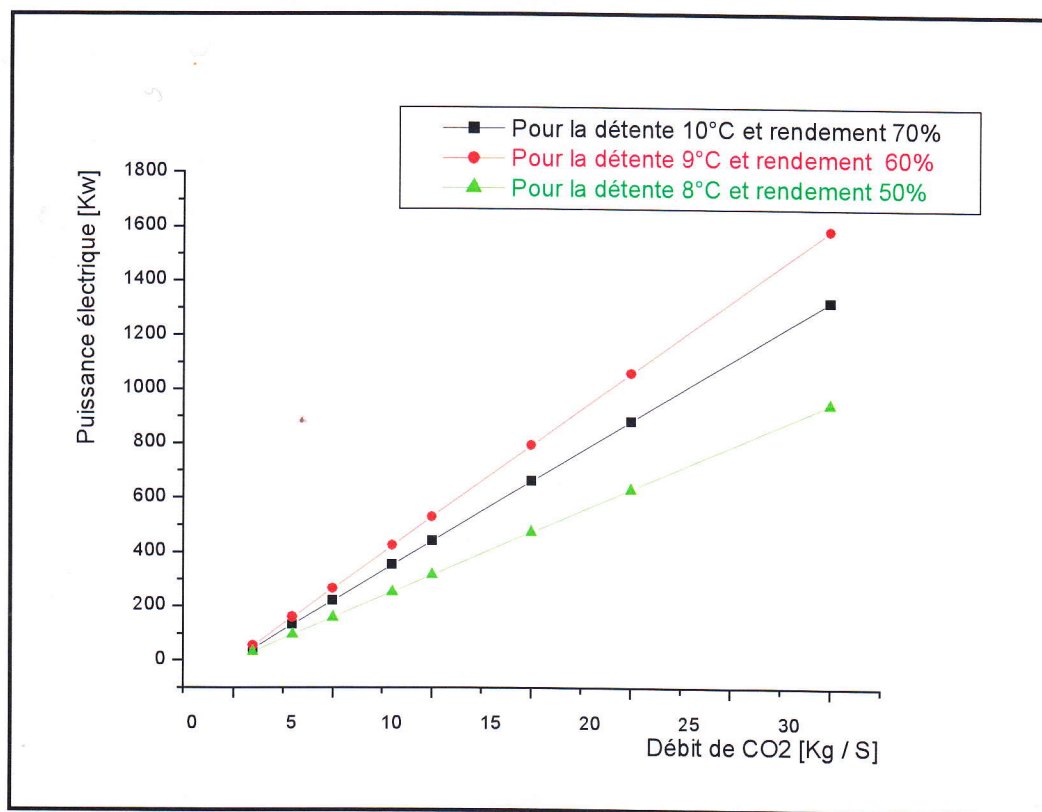


Figure (IV-12-a) La variation de la puissance électrique produit en fonction de débit de CO₂.

➤ Pour $T_{\text{Fluide}} = 27.5^{\circ}\text{C}$ et la détente 16°C :

| | | | | | | | | |
|-----------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| \dot{m} | 1 | 3 | 5 | 8 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| [Kg/S] | | | | | | | | |
| W | 62.281 | 186.843 | 311.405 | 498.248 | 622.81 | 934.215 | 1245.62 | 1868.43 |
| [Kw] | | | | | | | | |

Tableau (IV-15) : La variation de la production électrique en fonction de débit C Pour un rendement fixé = 50%.

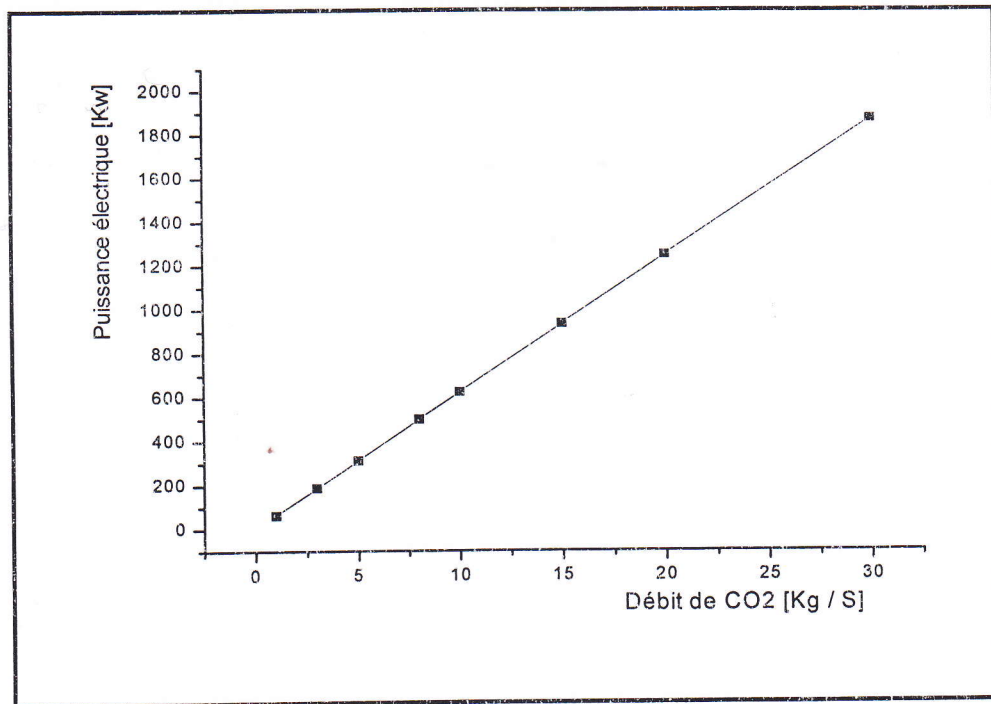
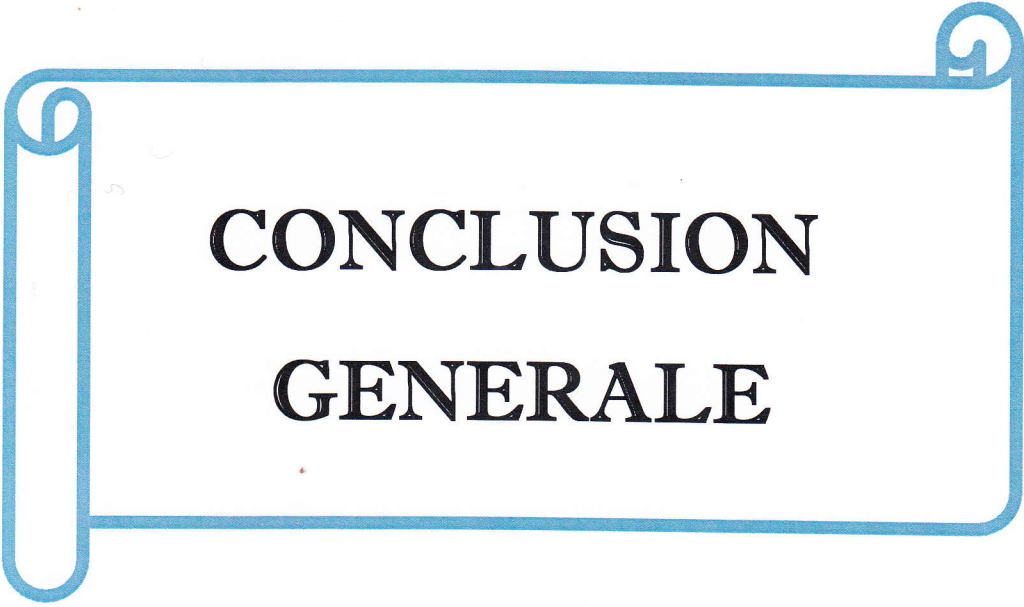


Figure (IV- 12-b) La variation de la puissance électrique produit en fonction de débit de CO₂

D'après la figure (IV-12-a) et (IV-12-b) nous constatons que la production de l'énergie électrique augmente linéairement avec le débit de CO₂. Mais pour des débits supérieurs il faut prendre en considération le risque d'utiliser l'anhydride carbonique le grande obstacle à son utilisation réside dans ses pression élevées de fonctionnement, qui nécessitent de prévoir des éléments de forte résistance mécanique.



**CONCLUSION
GENERALE**

Conclusion générale :

Les ressources géothermiques de l'Algérie sont relativement importantes et diverses. La géothermie est exploitée pour la production de chaleur ou de l'électricité

Dans ce travail l'objectif recherché est de développer un modèle d'utilisation de l'énergie géothermique, à basse température dans la région d'Ouargla pour la production de l'énergie électrique.

Dans un premier temps, il a été nécessaire de décrire l'énergie géothermique, pour ensuite évoquer ses applications et particulièrement l'expérience roumaine de la Centrale Géothermique à Cycle Binaire.

Le modèle adopté pour notre cas est constitué d'un évaporateur, d'un compresseur, un condenseur et une pompe ressemblant à des boîtes noires. Le fluide de fonctionnement est l'anhydride carbonique CO_2 . A l'aide du diagramme d'enthalpie et pression on a fait un balayage pour la température d'évaporation en vue d'obtenir le débit d'eau nécessaire ainsi que le rendement de la turbine.

Les résultats obtenus dans cette hypothèse sont satisfaisants pour le débit d'eau nécessaire, mais avec un rendement insuffisant de 10% de la turbine.

Dans une seconde étape La deuxième étape on a proposé un rendement de la turbine entre 70% et 50% .Les résultats obtenus nous conduisent à travailler avec une température de fonctionnement de 30°C pour une détente de la turbine de 10°C , 09°C , 08°C et 27.5°C pour une détente de la turbine 16°C .

La conclusion générale de ce travail, est qu'on peut produire l'électricité à partir de l'énergie géothermique à basse température ; mais à condition d'exploitez les résultats pour les dimensionnements de l'échangeur de chaleur (évaporateur, condenseur) et de la turbine ainsi qu'il faut une étude économique.

Enfin, nous espérons que ce modeste travail serve de base pour d'autres travaux plus élaborés et constitue d'un apport pédagogique abordable pour les futures promotions.

Référence bibliographies

[1]- K.B.Ogilvie, L'ABC des Technologies de L'Énergie Renouvelable industrie canada septembre 2003.

[2]- Dessus .B. Pharabod. F., Energie solaire PUF Paris 2002.

[3]- BECHKI.D., stockage de l'énergie thermique dans un lit fixe, Mémoire de magister, Centre universitaire d'OUARGLA 1998.

[5]- Christophe RAT, Etude d'opportunité pour une filière de cheminée solaire à la Réunion, Stage Plateforme Recherche et Développement ARER, Ecole Centrale Marseille (ECM) 2006.

[6]- Oussama Yedjour, Belkacem Boussaid "valorisation et étude des formes de conversion de l'énergie géothermique" mémoire de fin d'étude université Kasdi Merbah Ouargla(Algérie), juin 2008.

[7]-Gannon.AJ, Backstrom Solar Chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance ASME, Journal of Solar Energy Engineering 2000.

[8] - Marion Lepage Les maisons vertes à énergie positive en France Mémoire de recherche fin d'études université en France 2009.

[9]- Robert Laffont, Les énergies renouvelables université de France 2007.

[10]- M. M. Drid, "valorisation de l'énergie géothermique et étude des formes de conversion " thèse de magistère université Kasdi Merbah Ouargla (Algérie), 2008.

[11]- ~~Statistique technique~~, Energy information Administration/Annual Energy Review 2008.

[13]- R. Lefebvre, Ecoulement multi phase en milieux poreux Automne ; 2006.

Référence bibliographies

- [14]- Olivier Juan, La géothermie fiche technique énergie N°12, Européen novembre 2007
- [15]- D.Pahud, Geothermal energy and heat storage Laboraorio di Energia, Ecologia ed Economia; 2002.
- [16]-Michaël St-Pierre Assistant de recherche, L'énergie géothermique, université de Moncton
- [18]- Salima Ouali Centrale Géothermique à Cycle Binaire en Roumanie Recherche et Développement Préparer et maîtriser l'avenir énergétique 04/2004.
- [19] – S.Ouali B. Mehmah, A. Malek Étude de faisabilité d'utilisation des eaux thermales de Zelfana, dans la Production d'Hydrogène ,Centre de Développement des Énergies Renouvelables, Ghardaïa – Alegria 27 29 Octobre 2007
- [20]-A. Khedraoui, 'Qualité des eaux et phénomène de leurs dégradation dans les oasis algériens 2003.
- [21]- Djidel M, Kherici H,Kherici N and Nezli Imed-Eddine , Alteration of the Aquifer Water in Hyperarid Climate, by Wastewater: Cases of Groundwater from Ouargla (Northern Sahara, Algeria) Department of Hydrocarbon and Geology, University Kasdi Merbah, Ouargla 2008
- [22] - Ouled Cheikh, Contribution à l'étude et établissement du bilan hydrologique de la cuvette de Ouargla (Sahara nord est septentrional), thèse de magister université Saad Dahleb Blida (Algérie) ; 2005.
- [23]- B Bouchkima L'eau de la nappe albienne du sud algérien, Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud, Volume III el- Oued (Algérie) ; mai 2003.
- [24] - F-Z. Kedaid, Les perspectives d'utilisation de l'énergie géothermique au sud de l'Algérie, Recherche et Développement, Juin 2004.
- [25] A. Khedraoui, 2003, 'Qualité des eaux et phénomène de leurs dégradation dans les oasis algériens «étude de cas »', Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du Sud – El Oued, 2003.
- [26]-M : Ghrairi Rachid résumé théorique condenseur et évaporateur guide de travaux pratique module n° : 11 office de la formation professionnelle Maroc mai 2003
- [27] - Seddiki Belkire, dimensionnement d'une turbine à vapeur de puissance 30 M w mémoire de fin d'étude génie mécanique option énergétique université kasdi Marbach Ouargla (Algérie) 2003 2004.

Référence bibliographies

[28] -S. Bentebba A. Ferhi, étude technico-économique de système de cogénération type cycle combine gaz-vapeur dans station de compression Hassi R'mel, mémoire de fin d'étude génie mécanique, université Kasdi Merbah Ouargla (Algérie) 2008-2009.

[29] - Meunier F., « Aide-mémoire, Thermodynamique de l'ingénieur », Cours IV Liquides et vapeurs 2004.

Site d'internet :

[4]- <http://www.energienouvelable.org> 01/ 01/ 2010 10:30

[12]- <http://www.drire.gouv.fr/ile-de-france/ssol/geothermie/geohist.htm#top> 05/02/2010 21:15

[17]- <http://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9oothermie> 05/04/2010 17: 55

| Température [°C] | Pression [atm] | Masse volumique [Kg/m ³] | | Enthalpie spécifique [KJ/Kg] | | Entropie spécifique [KJ/Kg. °K] | |
|---------------------|-------------------|---|--------|------------------------------------|---------|------------------------------------|--------|
| | | Liquide | vapeur | Liquide | Vapeur | Liquide | Vapeur |
| -56.6 | 5.28 | 1178.0 | 13.9 | 301.450 | 649.373 | 3.7200 | 5.3273 |
| -50 | 6.97 | 1153.5 | 18.1 | 314.02 | 651.340 | 3.7765 | 5.2883 |
| -40 | 10.25 | 1115.0 | 26.2 | 333.227 | 653.853 | 3.8594 | 5.2348 |
| -30 | 14.55 | 1074.2 | 37.0 | 352.487 | 655.485 | 3.9389 | 5.1854 |
| -20 | 20.06 | 1029.9 | 51.4 | 372.322 | 656.407 | 4.0168 | 5.1380 |
| -10 | 26.99 | 980.8 | 70.5 | 393.936 | 655.653 | 4.0976 | 5.0924 |
| -5 | 31.05 | 953.8 | 82.4 | 405.743 | 654.857 | 4.1407 | 5.0698 |
| 0 | 35.54 | 924.8 | 96.3 | 418.680 | 653.685 | 4.1868 | 5.0472 |
| 2.5 | 37.95 | 910.0 | 104.3 | 426.384 | 652.387 | 4.2077 | 5.334 |
| 5 | 40.50 | 893.1 | 113.0 | 431.659 | 650.838 | 4.2299 | 5.0179 |
| 7.5 | 43.20 | 876.0 | 122.3 | 438.693 | 649.289 | 4.2517 | 5.0041 |
| 10 | 45.95 | 858.0 | 133.0 | 445.894 | 647.237 | 4.2781 | 4.9894 |
| 12.5 | 48.83 | 838.5 | 144.7 | 453.012 | 644.558 | 4.3015 | 4.9718 |
| 15 | 51.93 | 817.9 | 158.0 | 460.967 | 641.292 | 4.3292 | 4.9551 |
| 17.5 | 55.10 | 795.5 | 173.2 | 468.503 | 637.524 | 4.3543 | 4.9362 |
| 20 | 58.46 | 771.1 | 189.8 | 477.295 | 632.62 | 4.3827 | 4.9128 |
| 22.5 | 61.85 | 742.9 | 210.4 | 486.506 | 625.927 | 4.4141 | 4.8843 |
| 25 | 65.59 | 709.5 | 236.3 | 497.392 | 616.841 | 4.4497 | 4.8504 |
| 27.5 | 69.35 | 666.4 | 271.8 | 510.790 | 605.202 | 4.4924 | 4.8094 |
| 30 | 73.34 | 595.1 | 335.7 | 527.118 | 528.129 | 4.5444 | 4.7524 |
| 31 | 74.96 | 463.9 | 463.9 | 558.938 | 558.938 | 4.6465 | 4.6465 |

Tableau : Vapeur saturée d'anhydride carbonique (CO₂)

1-calculer le débit d'eau nécessaire :

➤ 1^{ère} CAS : $\eta_e = 100\%$:

a) Température de fluide 10°C :

| \dot{m}_{CO_2} [Kg/S] | T_s [°C] | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
|----------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | \dot{m}_{H_2O} [Kg / S] | 9.624 | 4.812 | 3.208 | 2.406 | 1.920 | 1.604 | 1.374 | 1.203 | 1.069 | 0.36 |
| 3 | | 28.87 | 14.43 | 9.624 | 7.218 | 5.774 | 4.812 | 4.124 | 3.609 | 3.208 | 2.887 |
| 5 | | 48.122 | 24.061 | 16.040 | 12.030 | 9.624 | 8.020 | 6.874 | 6.015 | 5.346 | 4.812 |
| 8 | | 76.995 | 38.497 | 25.665 | 19.248 | 15.399 | 12.832 | 10.999 | 9.624 | 8.555 | 7.699 |
| 10 | | 96.244 | 48.122 | 32.081 | 24.061 | 19.248 | 16.040 | 13.749 | 12.030 | 10.693 | 9.624 |
| 15 | | 144.36 | 72.183 | 48.122 | 36.091 | 28.873 | 24.061 | 20.623 | 18.045 | 16.040 | 14.436 |
| 20 | | 192.48 | 96.244 | 64.162 | 48.122 | 38.122 | 32.081 | 27.498 | 24.061 | 21.387 | 19.248 |
| 30 | | 288.73 | 144.36 | 96.244 | 72.180 | 57.746 | 48.122 | 41.247 | 36.091 | 32.081 | 28.873 |
| 40 | | 384.97 | 192.48 | 128.48 | 96.244 | 76.995 | 64.162 | 54.996 | 48.122 | 42.775 | 38.497 |
| 50 | | 481.22 | 240.06 | 160.40 | 120.30 | 96.244 | 80.203 | 68.745 | 60.152 | 53.460 | 48.122 |
| 60 | | 577.46 | 288.73 | 192.48 | 144.36 | 115.49 | 96.244 | 82.495 | 72.183 | 64.162 | 57.746 |

Tableau (1) : la variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à déferant débit CO₂

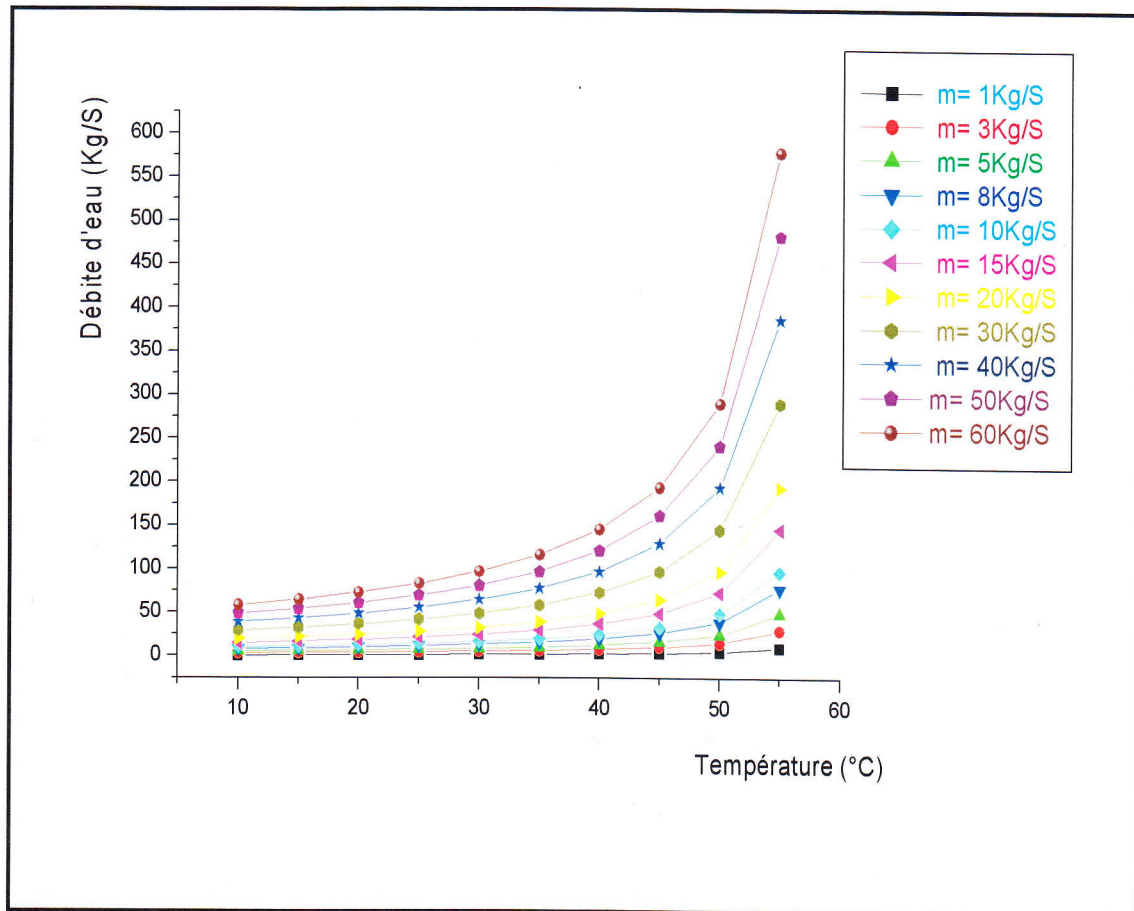


Figure (1) : La variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à température de fluide 10°C

b)-Température de fluide 20°C :

| \dot{m}_{CO_2} [Kg/S] | T_s [°C] | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
|----------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | \dot{m}_{H_2O} [Kg/S] | 7.424 | 3.712 | 2.474 | 1.856 | 1.484 | 1.237 | 1.060 | 0.928 | 0.824 | 0.742 |
| 3 | | 19.406 | 9.703 | 6.468 | 4.851 | 3.881 | 3.234 | 2.772 | 2.425 | 2.15 | 1.940 |
| 5 | | 37.124 | 18.562 | 12.374 | 9.218 | 7.424 | 6.187 | 5.303 | 4.640 | 4.124 | 3.712 |
| 8 | | 59.399 | 29.699 | 19.799 | 14.849 | 11.879 | 9.899 | 8.485 | 7.424 | 6.599 | 5.939 |
| 10 | | 74.249 | 37.124 | 24.749 | 18.562 | 14.849 | 12.374 | 10.607 | 9.281 | 8.249 | 7.420 |
| 15 | | 111.37 | 55.687 | 37.124 | 27.843 | 22.274 | 18.562 | 15.910 | 13.921 | 12.374 | 11.137 |
| 20 | | 148.49 | 74.249 | 49.499 | 37.124 | 29.699 | 24.749 | 21.214 | 18.562 | 16.499 | 14.849 |
| 30 | | 222.74 | 111.37 | 74.249 | 55.687 | 44.549 | 37.124 | 31.821 | 27.843 | 24.749 | 22.274 |
| 40 | | 296.99 | 148.49 | 98.999 | 74.249 | 59.399 | 49.499 | 42.428 | 37.124 | 32.999 | 29.699 |
| 50 | | 371.24 | 185.62 | 123.74 | 92.811 | 74.249 | 61.874 | 53.035 | 46.405 | 41.249 | 37.124 |
| 60 | | 445.49 | 222.74 | 148.49 | 111.37 | 89.099 | 74.249 | 63.642 | 55.687 | 49.499 | 44.540 |

Tableau (2) : la variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à déferant
débit CO₂

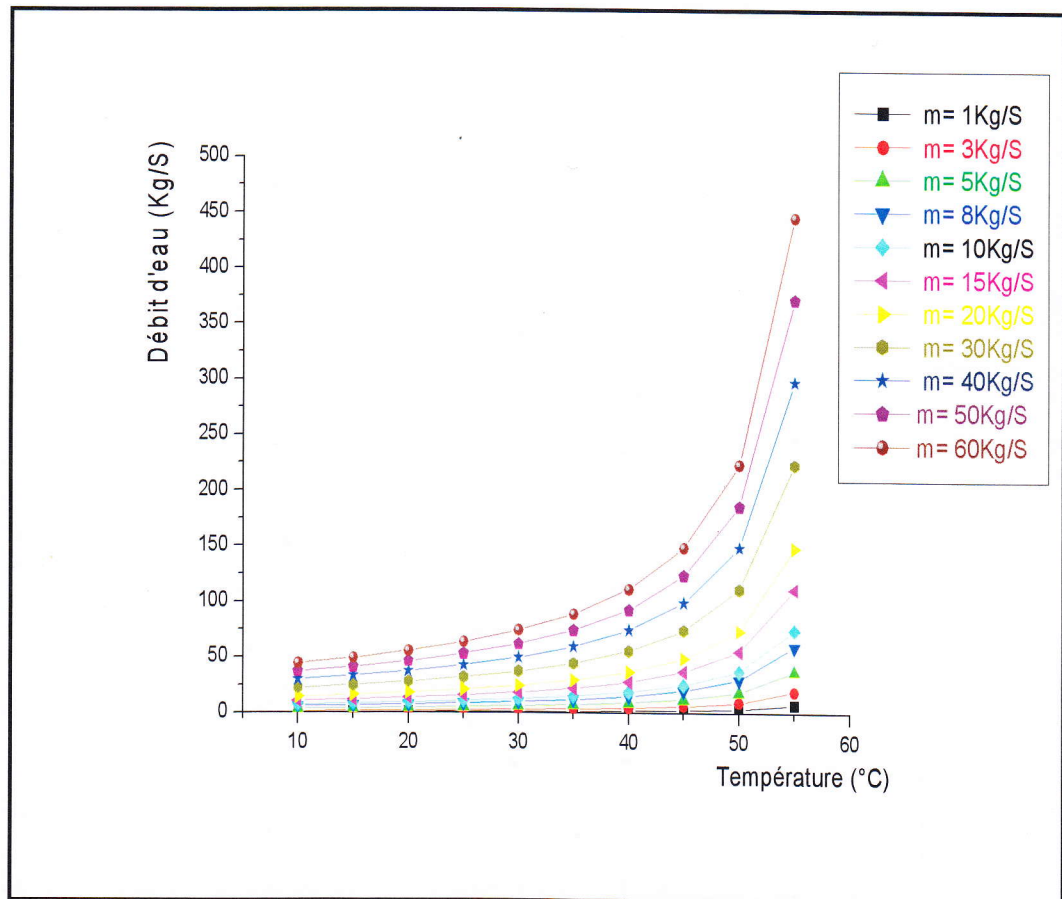


Figure (2) : La variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à température de fluide 20°C

c)-Température de fluide 25°C :

| m_{CO_2} Kg/s | T_s [°C] | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
|--------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | m_{H_2O} [Kg/S] | 5.70 | 2.854 | 1.903 | 1.427 | 1.141 | 0.951 | 0.815 | 0.713 | 0.634 | 0.570 |
| 3 | | 17.129 | 8.564 | 5.709 | 4.282 | 3.425 | 2.854 | 2.447 | 2.141 | 1.903 | 1.712 |
| 5 | | 28.548 | 14.27 | 9.516 | 7.137 | 5.709 | 4.758 | 4.078 | 3.568 | 3.172 | 2.854 |
| 8 | | 45.678 | 22.839 | 15.226 | 11.419 | 9.136 | 7.613 | 6.525 | 5.709 | 5.076 | 4.567 |
| 10 | | 57.097 | 28.548 | 19.032 | 14.274 | 11.419 | 9.516 | 8.156 | 7.137 | 6.344 | 5.709 |
| 15 | | 85.64 | 42.823 | 28.548 | 21.41 | 17.129 | 14.274 | 12.235 | 10.705 | 9.516 | 8.564 |
| 20 | | 114.19 | 57.097 | 38.065 | 28.54 | 22.839 | 19.032 | 16.313 | 14.274 | 12.688 | 11.419 |
| 30 | | 171.29 | 85.646 | 57.097 | 42.823 | 34.258 | 28.548 | 24.470 | 21.411 | 19.032 | 17.129 |
| 40 | | 228.39 | 114.19 | 76.130 | 57.097 | 45.678 | 38.065 | 32.627 | 28.548 | 25.376 | 22.839 |
| 50 | | 285.48 | 142.74 | 95.163 | 71.372 | 57.097 | 47.581 | 40.784 | 35.686 | 31.721 | 28.548 |
| 60 | | 342.58 | 171.29 | 114.19 | 85.268 | 68.517 | 57.097 | 48.941 | 42.823 | 38.065 | 34.258 |

Tableau (3) : la variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à déférant
débit CO₂

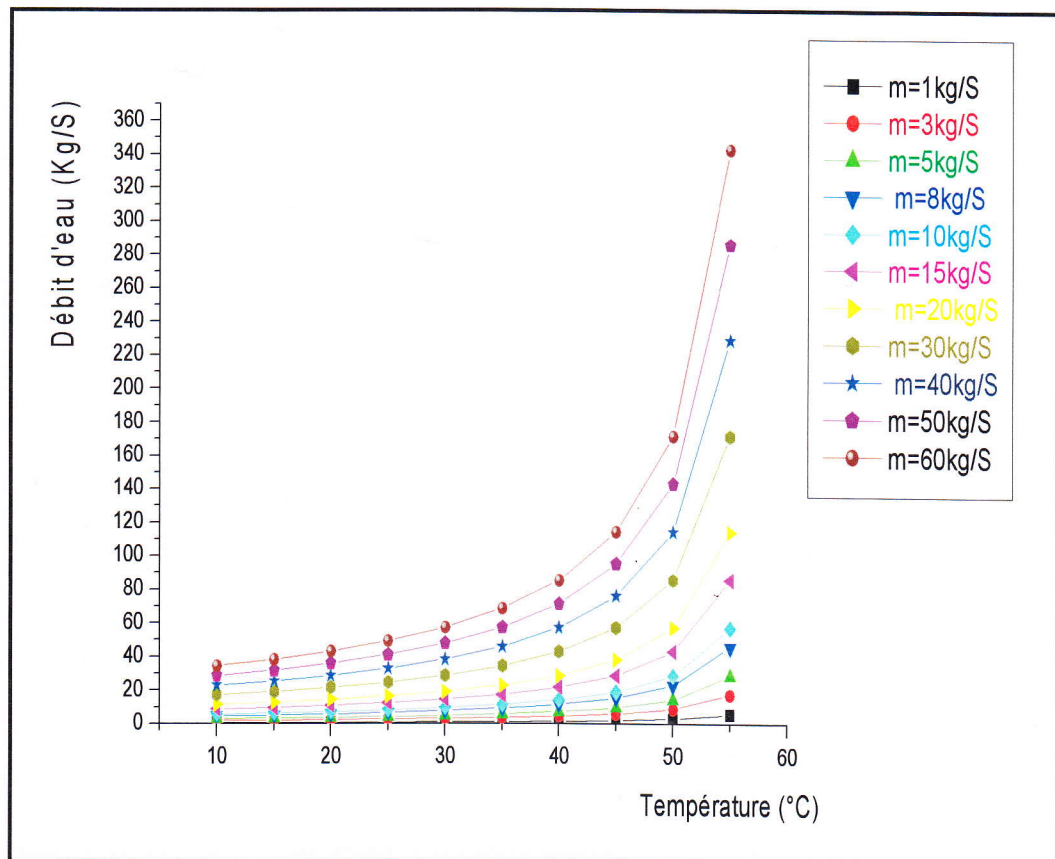


Figure (3) : La variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à température de fluide 25°C

➤ 2^{ème} CAS : $\eta_e = 80\%$:

a)-Température de fluide =10 °C :

| \dot{m}_{CO_2} [Kg/S] | T_s [°C] | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
|----------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | \dot{m}_{H_2O} [Kg/S] | 7.699 | 3.849 | 2.566 | 1.924 | 1.53 | 1.283 | 1.099 | 0.962 | 0.855 | 0.769 |
| 3 | | 32.098 | 11.549 | 7.699 | 5.774 | 4.619 | 3.849 | 3.229 | 2.887 | 2.566 | 2.309 |
| 5 | | 38.497 | 19.248 | 12.832 | 9.624 | 7.699 | 6.416 | 5.499 | 4.812 | 4.227 | 3.849 |
| 8 | | 61.596 | 30.798 | 20.532 | 15.399 | 12.319 | 10.266 | 8.799 | 7.699 | 6.844 | 6.159 |
| 10 | | 76.99 | 38.497 | 25.665 | 19.248 | 15.399 | 12.832 | 10.999 | 9.624 | 8.555 | 7.699 |
| 15 | | 115.49 | 57.074 | 38.497 | 28.873 | 23.098 | 19.248 | 16.499 | 14.436 | 12.832 | 11.549 |
| 20 | | 153.99 | 76.995 | 51.330 | 38.497 | 30.798 | 25.665 | 21.998 | 19.248 | 17.110 | 15.399 |
| 30 | | 230.98 | 115.49 | 76.995 | 57.746 | 46.197 | 38.497 | 32.998 | 28.873 | 25.665 | 23.098 |
| 40 | | 307.98 | 153.99 | 102.66 | 76.995 | 61.596 | 51.330 | 43.997 | 38.497 | 34.220 | 30.798 |
| 50 | | 384.97 | 192.48 | 128.32 | 96.244 | 76.995 | 64.162 | 54.996 | 48.128 | 42.775 | 38.497 |
| 60 | | 461.97 | 230.98 | 153.99 | 115.493 | 92.394 | 76.995 | 65.996 | 57.746 | 51.330 | 46.197 |

Tableau (4) : la variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à déferant débit CO₂

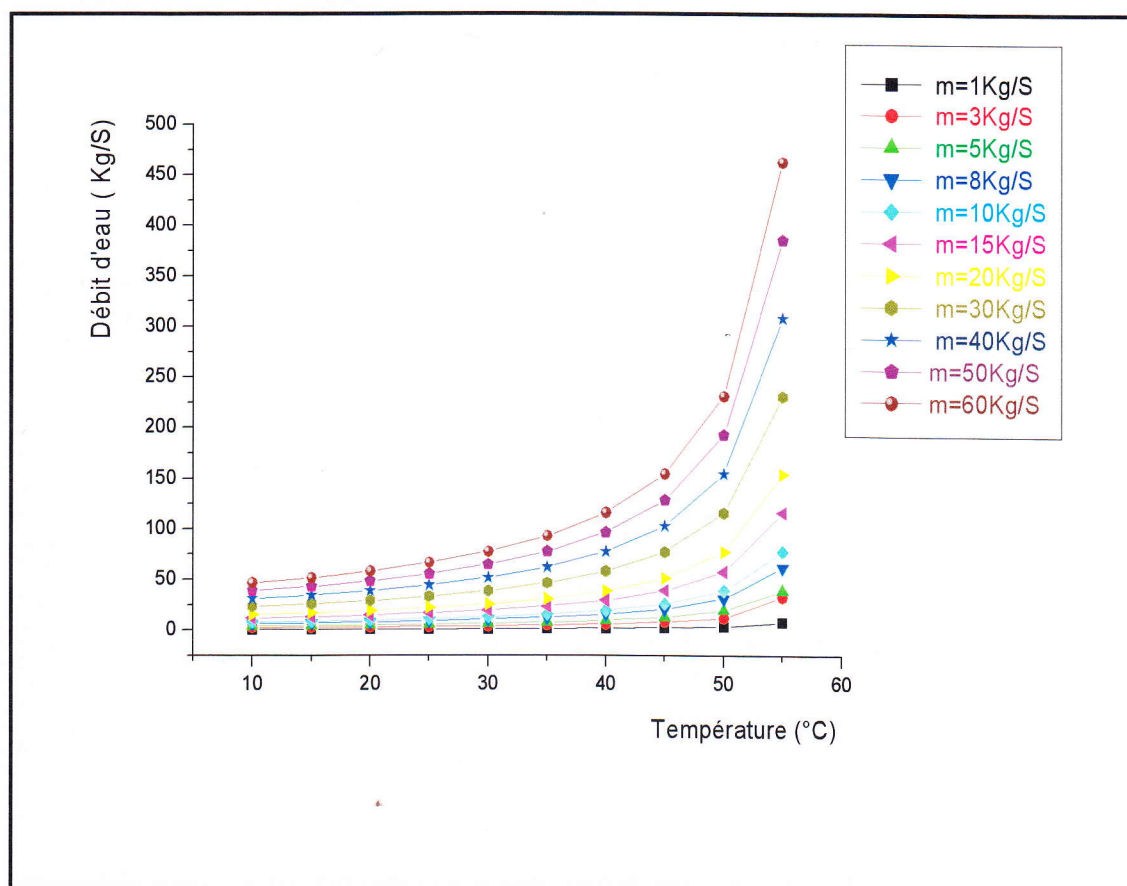


Figure (4) : La variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à température de fluide 10°C

b)-Température de fluide =20 °C :

| \dot{m}_{CO_2} [Kg/S] | T_s [°C] | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
|----------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | \dot{m}_{H_2O} [Kg/S] | 5.939 | 2.968 | 1.979 | 1.484 | 1.187 | 0.989 | 0.848 | 0.742 | 0.659 | 0.593 |
| 3 | | 17.819 | 8.909 | 5.939 | 4.454 | 3.563 | 2.969 | 2.545 | 2.227 | 1.979 | 1.781 |
| 5 | | 29.699 | 14.849 | 9.899 | 7.424 | 5.939 | 4.949 | 4.242 | 3.712 | 3.299 | 2.969 |
| 8 | | 47.519 | 23.759 | 15.839 | 11.879 | 9.503 | 7.919 | 6.788 | 5.939 | 5.279 | 4.751 |
| 10 | | 59.339 | 29.699 | 19.799 | 14.849 | 11.879 | 9.899 | 8.485 | 7.424 | 6.599 | 5.939 |
| 15 | | 89.099 | 44.549 | 29.699 | 22.274 | 17.819 | 14.849 | 12.728 | 11.137 | 9.899 | 8.909 |
| 20 | | 118.79 | 59.399 | 39.599 | 29.699 | 23.759 | 19.799 | 16.971 | 14.849 | 13.119 | 11.879 |
| 30 | | 178.19 | 89.099 | 59.399 | 44.549 | 35.639 | 29.699 | 25.456 | 22.274 | 19.799 | 17.819 |
| 40 | | 237.59 | 118.79 | 79.199 | 59.399 | 47.519 | 39.599 | 33.942 | 29.699 | 26.399 | 23.759 |
| 50 | | 279.99 | 148.49 | 98.999 | 74.249 | 59.399 | 49.499 | 42.428 | 37.124 | 32.999 | 29.699 |
| 60 | 356.39 | 178.19 | 118.19 | 89.099 | 71.279 | 59.399 | 50.913 | 44.549 | 39.599 | 35.639 | |

Tableau (5) : la variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à déferant
débit CO₂

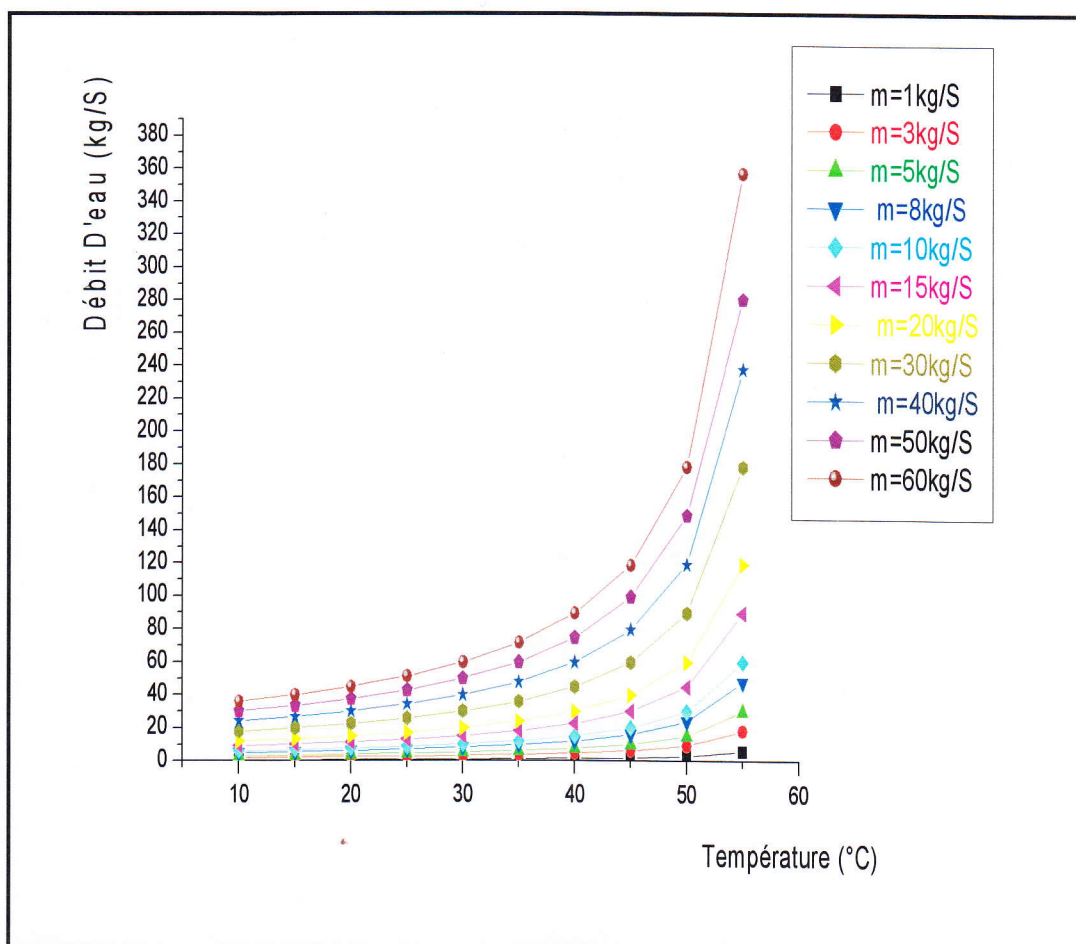


Figure (5) : La variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à température de fluide 20°C

c)-Température de fluide =25 °C :

| \dot{m}_{CO_2} [Kg/S] | T_s [°C] | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
|----------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | \dot{m}_{H_2O} [Kg/S] | 4.567 | 2.283 | 1.522 | 1.141 | 0.913 | 0.761 | 0.652 | 0.570 | 0.507 | 0.45 |
| 3 | | 13.703 | 6.851 | 4.567 | 3.425 | 2.740 | 2.283 | 1.957 | 1.712 | 1.522 | 1.370 |
| 5 | | 22.839 | 11.419 | 7.613 | 5.709 | 4.567 | 3.806 | 3.262 | 2.854 | 2.537 | 2.283 |
| 8 | | 36.542 | 18.271 | 12.180 | 9.135 | 7.308 | 6.090 | 5.220 | 4.567 | 4.060 | 3.654 |
| 10 | | 45.678 | 22.839 | 15.226 | 11.419 | 9.135 | 7.613 | 6.525 | 5.709 | 5.075 | 4.567 |
| 15 | | 68.517 | 34.258 | 22.839 | 17.129 | 13.703 | 11.419 | 9.788 | 8.564 | 7.613 | 6.850 |
| 20 | | 91.356 | 45.678 | 30.452 | 22.839 | 18.271 | 15.226 | 13.050 | 11.419 | 10.150 | 9.135 |
| 30 | | 137.03 | 68.517 | 45.678 | 34.258 | 27.407 | 22.839 | 19.576 | 17.129 | 15.226 | 13.703 |
| 40 | | 182.71 | 91.356 | 60.904 | 45.678 | 36.542 | 30.452 | 26.101 | 22.839 | 20.301 | 18.271 |
| 50 | | 228.39 | 114.19 | 76.130 | 57.097 | 45.678 | 38.065 | 32.627 | 28.548 | 25.376 | 22.839 |
| 60 | | 274.07 | 137.03 | 91.356 | 68.517 | 54.814 | 45.678 | 39.152 | 34.258 | 30.452 | 27.407 |

Tableau (6) : la variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à déferant débit CO₂

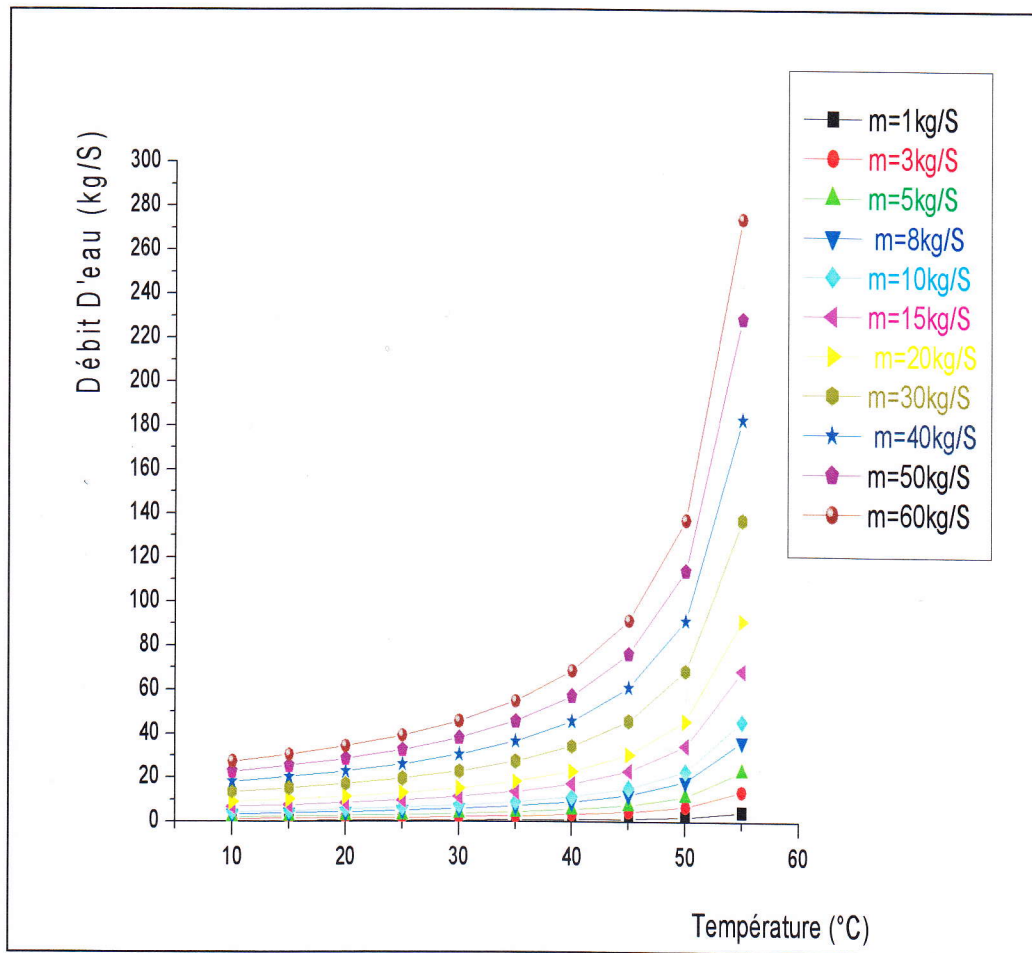


Figure (6) : La variation de débit d'eau à partir la température sortie d'eau à température de fluide 25°C

Résumé:

Dans ce travail nous nous intéressons à l'étude d'un système de production de l'énergie électrique, à partir de l'énergie géothermique à basse température dans la région d'Ouargla. Le modèle adopté dans ce mémoire (le cycle binaire) nous a donné des résultats intéressants avec une température de fonctionnement de 30 °C, et un rendement de la turbine de 70%, mais une étude économique pour la réalisation d'une centrale géothermique à cycle binaire reste à faire.

Mots clés : énergie renouvelable, énergie géothermique, cycle binaire, énergie électrique.

المخلص:

في هذا العمل نحن مهتمون بدراسة نظام لتوليد الكهرباء من الطاقة الحرارية الأرضية في درجات الحرارة المنخفضة في منطقة ورقلة. وأعطى النموذج المعتمد في هذه الدراسة (دورة ثنائية) لنا بعض النتائج المثيرة للاهتمام مع درجة حرارة التشغيل 30 درجة مئوية وكفاءة التوربينات 70 % ، ولكن دراسة اقتصادية لتحقيق محطة للطاقة الحرارية في دورة ثنائي لا يزال يتعين القيام به.

مفاتيح البحث: الطاقة المتجددة، الطاقة الحرارية الأرضية، دورة الثنائية، الطاقة الكهربائية.