

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energies Renouvelables en Mécanique

Par : BNADJEM Abdelkhalak & IZNASNI Reda

Sujet

Etude d'un système intégré basé sur la géothermie

Soutenu publiquement, le 23 /09/2024, devant le jury composé de :

Mme. H. SARI HASSOUN

Mme. OURRAD Soumia

M. ALIANE Abdenour

M. ABDESLAM Bilal

MAA

MCB

MCB

Doctorant

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Présidente

Examinatrice

Encadreur

Co-Encadreur

Année universitaire : 2023 /2024

Remerciements

*Nous exprimons notre gratitude à Allah qui nous a donné la force
pour terminer ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier vivement notre encadrant M. ALIANE
Abdennour pour ses conseils, son orientation et sa disponibilité.*

*Nous tenons aussi à remercier les membres de jury d'avoir accepté de
juger notre travail.*

*Nous remercions également toute personne ayant contribué de près ou
de loin à la réalisation de ce travail.*

Dédicaces

Nous dédions ce projet à nos chers parents pour leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours académique.

À nos amis pour leur présence et leur encouragement.

À nos professeurs pour leur enseignement précieux et leurs conseils avisés.

Ce travail est le fruit de vos efforts combinés.

ملخص

تتكون هذه الأطروحة من ثلاثة فصول، يستكشف كل منها جوانب مختلفة من الطاقة الحرارية يعرض الفصل الأول عموميات الطاقة الحرارية. الأرضية والأنظمة الديناميكية الحرارية المرتبطة بها الأرضية بالإضافة إلى الأنظمة المتكاملة، ويتناول أساسيات استغلال حرارة الأرض والتقنيات المختلفة ويسلط الضوء على الفوائد البيئية والتحديات التقنية المتعلقة. المتاحة لإنتاج الطاقة المتجددة ويركز الفصل الثاني على الديناميكا الحرارية للأنظمة الحرارية. باستخدام مصدر الطاقة المستدام هذا الأرضية، مع تحليل متعمق للدورات الديناميكية الحرارية المستخدمة لتحويل الحرارة الأرضية إلى على وجه الخصوص، يستكشف الدورات الديناميكية الحرارية المختلفة المناسبة لموارد. كهرباء الطاقة الحرارية الأرضية، مع التركيز على دورة رانكين ومتغيراتها، التي تعمل على تحسين تحويل الطاقة وأخيراً، يقترح الفصل الثالث دراسة دورة رانكين العضوية ذات أربع مراحل، حيث. الحرارة الأرضية. يتم استخدام أربعة موائع مختلفة لنقل الحرارة (البنزين، السيكلوبنتان، السيكلوهكسان، والهيبنتان) وبالإضافة إلى ذلك،. يفحص هذا القسم أداء كل سائل داخل الدورة وكفاءته من حيث توليد الطاقة يتم إجراء تحليل للتكاليف والفوائد لمدة عشر سنوات لتقييم الجدوى الاقتصادية للنظام المقترح، مع الأخذ في الاعتبار تكاليف الاستثمار، وتكاليف التشغيل، وعوائد الاستثمار على أساس إنتاج الطاقة وتوفيرها.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الحرارية الأرضية، الديناميكا الحرارية، دورة رانكين العضوية، دراسة

اقتصادية، EES

Abstract

This dissertation is structured in three chapters, each exploring different aspects of geothermal energy and associated thermodynamic systems. The first chapter presents the generalities of geothermal energy as well as integrated systems, addressing the fundamentals of exploiting the earth's heat and the different technologies available for the production of renewable energy. It highlights the environmental benefits and technical challenges related to the use of this sustainable energy source.

The second chapter focuses on the thermodynamics of geothermal systems, with an in-depth analysis of the thermodynamic cycles used to convert geothermal heat into electricity. In particular, it explores the different thermodynamic cycles suitable for geothermal resources, with an emphasis on the Rankine cycle and its variants, which optimize the conversion of geothermal energy.

Finally, the third chapter proposes a study of a four-stage organic Rankine cycle, in which four different heat transfer fluids (Benzene, Cyclopentane, Cyclohexane and n-Heptane) are used. This section examines the performance of each fluid within the cycle and their efficiency in terms of power generation. In addition, a ten-year cost-benefit analysis is conducted to assess the economic viability of the proposed system, taking into account investment costs, operating costs, and returns on investment based on energy production and savings.

Keywords: Geothermal energy, Thermodynamics, Organic Rankine Cycle, Economic study, EES..

Résumé

Ce mémoire est structuré en trois chapitres, chacun explorant différents aspects de l'énergie géothermique et des systèmes thermodynamiques associés. Le premier chapitre présente les généralités sur la géothermie ainsi que les systèmes intégrés, en abordant les principes fondamentaux de l'exploitation de la chaleur terrestre et les différentes technologies disponibles pour la production d'énergie renouvelable. Il met en lumière les avantages environnementaux et les défis techniques liés à l'utilisation de cette source d'énergie durable.

Le deuxième chapitre se concentre sur la thermodynamique des systèmes géothermiques, avec une analyse approfondie des cycles thermodynamiques utilisés pour convertir la chaleur géothermique en électricité. En particulier, il explore les différents cycles thermodynamiques adaptés aux ressources géothermiques, en mettant l'accent sur le cycle de Rankine et ses variantes, qui optimisent la conversion de l'énergie géothermique.

Enfin, le troisième chapitre propose une étude d'un cycle organique de Rankine à quatre étages, dans lequel quatre fluides de transfert de chaleur différents (Benzène, Cyclopentane, Cyclohexane et n-Heptane) sont utilisés. Cette section examine la performance de chaque fluide dans le cadre du cycle et leur efficacité en termes de génération de puissance. De plus, une analyse de rentabilité sur dix ans est réalisée pour évaluer la viabilité économique du système proposé, en prenant en compte les coûts d'investissement, d'exploitation, et les retours sur investissement en fonction de la production d'énergie et des économies réalisées.

Mots-clés : Géothermie, Thermodynamique, Cycle Organique de Rankine, Etude économique, EES.

Table des Matières

ملخص.....	2
Abstract	3
Résumé	4
LISTE DES FIGURES	8
LISTE DES TABLEAUX.....	9
I. Introduction générale	10
Chapitre I : Généralités sur la géothermie.....	12
I.1 Principe et classification	12
I.1.1 Géothermie à Haute Température	13
I.1.2 Géothermie à Basse Température	14
I.2 Différents types de captage et source d'énergie	15
I.2.1 Capteur horizontal.....	15
I.2.2 Capteur vertical, sonde géothermique.....	16
I.2.3 Captage par nappe phréatique	16
I.3 Avantages et Inconvénients de la Géothermie.....	17
I.3.1 Avantages de la Géothermie	17
I.3.2 Inconvénients de la Géothermie.....	18
I.4 Tendances actuelles	19
I.4.1 Tendances de l'énergie géothermique dans la technologie des centrales électriques	19
I.4.2 Tendances sur les systèmes géothermiques améliorés (EGS) :	20
I.5 Exemples de projets réussis	21
I.6 Etat de l'art des systèmes intégrés géothermiques.....	23
I.6.1 Revue de la littérature sur les systèmes intégrés géothermiques	23

I.7 Évolution et Histoire	24
I.7.1 Exemples de projets accomplis.....	25
I.6.3 Avancées technologiques récentes :.....	30
Chapitre II : Thermodynamique des systèmes géothermiques.....	31
II.1 Introduction	31
II.2 Types de systèmes géothermiques intégrés	31
II.2.1 Systèmes de Pompe à Chaleur Géothermique (GHP, Geothermal Heat Pumps)...	31
II.2.2 Systèmes de Production d'Électricité Géothermique.....	33
II.2.3 Systèmes Combinés de Chaleur et d'Électricité (CHP).....	33
II.2.4 Systèmes Hybrides	36
II.2.5 Systèmes de Stockage d'Énergie Thermique	37
II.3 Thermodynamique d'un système géothermique basé sur un cycle organique de Rankine (ORC cycle).....	37
II.3.1 Principe de Fonctionnement	38
II.4 Cycle Organique de Rankine (ORC).....	38
IV. Conclusion	41
Chapitre III Etude d'une installation thermique étagée basée sur le cycle organique de Rankine	43
III.1 Introduction	43
III.2 Description du système	44
III.3 Modélisation thermodynamique.....	45
III.3.1 Efficacité du cycle et revenu de l'exploitation.....	48
III.3.2 Taille et coût du bouilleur et du condenseur	49
III.3.3 Revenu et gain.....	51
III.4 Fluides de transfert de chaleur	51
III.5 Résultats et discussion.....	53

III.5.1 Conditions d'opération.....	53
III.5.2 Performances du cycle	54
III.5.2.1 Cycle thermodynamique	54
III.5.3 Etude paramétrique	58
III.5.3.2 Influence de la température d'approche du bouilleur	59
III.5.3.3 Influence de la température d'approche du condenseur	62
III.6 Conclusions	63
IV. Conclusion générale.....	64

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I. 2 : Centrale géothermique	13
Figure I. 3 : Classes de la géothermie	14
Figure I. 4 : Captage horizontal.....	16
Figure I. 5 : Captage vertical.....	16
Figure I. 6 : Processus d'évaluation du potentiel technique	28
Figure I. 7 : Pompe à chaleur	29

Chapitre II

Figure II. 1 : Types géothermiques	32
Figure II. 2 : Pompe à Chaleur Géothermique	32
Figure II. 3 :Systèmes de Production d'Électricité Géothermique	33
Figure II. 4 : Systèmes Combinés de Chaleur et d'Électricité géothermique.....	34
Figure II. 5 :Systèmes Hybride Solaire-Géothermique.....	37
Figure II. 6 :Système et cycle de Rankine.....	39

Chapitre III

Figure III. 1: Cycle Organique de Rankine multi-étagé alimenté par une source géothermique	44
Figure III. 2: Procédures Turbine et Pompe.....	46
Figure III. 3 : Cycle thermodynamique.....	54
Figure III. 4 :Coût du bouilleur et profit vs température \square Tb	58
Figure III. 5 :Coût du bouilleur et profit vs température \square Tb	60
Figure III. 6 :Sensibilité du coût du bouilleur et du profit à l'efficacité du bouilleur.....	61
Figure III. 7 : Sensibilité du coût du condenseur et du gain à la température d'approche du condenseur.....	61
Figure III. 8: Sensibilité du coût du condenseur et du gain à l'efficacité du condenseur	62

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I. 1 : Classes de la géothermie	14
Tableau I. 2 : Caractéristiques des systèmes géothermiques	20
Tableau I. 3 : Paramètres pour certaines des centrales installées dans le monde.....	21

Chapitre III

Tableau III. 1 Propriétés des fluides de transfert de chaleur.....	52
Tableau III. 2 : Propriétés des fluides de transfert de chaleur.....	53
Tableau III. 3 :Paramètres thermodynamiques du cycle (Benzène).....	54
Tableau III. 4 :Performances du cycle (Benzène).....	55
Tableau III. 5 :Paramètres thermodynamiques du cycle (Cyclohexane).....	55
Tableau III. 6 : Performances du cycle (Cyclohexane).....	56
Tableau III. 7 :Paramètres thermodynamiques du cycle (Cyclopentane)	56
Tableau III. 8 : Performances du cycle (Cyclopentane).....	56
Tableau III. 9 : Paramètres thermodynamiques du cycle (n-heptane).....	57
Tableau III. 10 :Performances du cycle (n-heptane).....	57

I. Introduction générale

Le besoin croissant de solutions énergétiques durables, propres et efficaces est devenu une priorité mondiale face aux défis posés par le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources fossiles. Les énergies renouvelables, en particulier la géothermie, se sont imposées comme des alternatives viables pour répondre à la demande croissante d'énergie tout en minimisant l'impact environnemental. La géothermie, qui exploite la chaleur contenue sous la surface terrestre, représente une source d'énergie inépuisable, disponible en continu et largement sous-utilisée malgré son potentiel. Son exploitation, bien que complexe sur le plan technologique et économique, offre des avantages considérables en matière de stabilité énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre [1].

La géothermie repose sur des principes thermodynamiques simples : la chaleur emmagasinée dans le sous-sol terrestre est extraite pour être convertie en électricité ou utilisée pour chauffer des infrastructures. Cette source de chaleur naturelle, qui peut être exploitée dans diverses configurations techniques, présente des avantages spécifiques par rapport aux autres sources renouvelables comme l'énergie solaire ou éolienne, notamment par sa constance et son indépendance des conditions météorologiques [1]. Dans le premier chapitre de cette dissertation, nous présenterons les généralités sur la géothermie, en exposant ses origines, ses applications et ses différents modes d'exploitation à travers le monde. Cette partie fournira un cadre théorique essentiel pour comprendre les enjeux technologiques et scientifiques associés à cette source d'énergie.

Au cœur des systèmes géothermiques modernes, la thermodynamique joue un rôle central. En effet, la conversion efficace de la chaleur géothermique en électricité repose sur l'optimisation des cycles thermodynamiques, notamment par l'utilisation de cycles spécifiques adaptés aux conditions géologiques rencontrées. Le cycle de Rankine constitue une base théorique fréquemment utilisée dans les centrales géothermiques, avec des variantes comme le cycle organique de Rankine (ORC) qui offrent de meilleures performances dans des contextes de basse température [2]. Le deuxième chapitre se concentrera donc sur les systèmes thermodynamiques géothermiques de génération de puissance, en analysant en détail les différents cycles et leurs performances, ainsi que les avancées technologiques permettant d'améliorer l'efficacité des centrales géothermiques.

Enfin, la dernière partie de cette dissertation portera sur l'étude d'une installation thermique étagée basée sur le cycle organique de Rankine, qui sera abordée à travers une étude de cas concrète. Nous nous pencherons sur l'intégration de plusieurs étages thermiques pour maximiser l'efficacité énergétique d'une centrale géothermique donnée. Cette étude s'accompagnera d'une analyse économique s'étalant sur une période de dix ans, qui évaluera la rentabilité du projet en prenant en compte les investissements initiaux, les coûts d'entretien et les bénéfices potentiels en matière de production énergétique et de réduction des émissions de carbone [3]. Cette dernière partie permettra de mettre en lumière non seulement les aspects techniques mais aussi les dimensions économiques et environnementales de la géothermie à long terme.

Dans un contexte où l'avenir énergétique mondial dépend de plus en plus de solutions renouvelables et durables, il est essentiel d'examiner l'impact des technologies géothermiques sur les systèmes énergétiques actuels. Cette dissertation propose donc d'explorer en profondeur les fondements théoriques, techniques et économiques des systèmes géothermiques, et d'évaluer leur potentiel pour répondre aux besoins énergétiques des prochaines décennies.

Chapitre I : Généralités sur la géothermie

Malgré l'importance accordée au photovoltaïque sur la scène médiatique, les énergies renouvelables ne se restreignent pas à cette technologie. Le renouvelable peut être classé en différentes catégories, en fonction de la source d'énergie : éolien, solaire, hydraulique, marémotrice, géothermie et biomasse. Quant à la cogénération, bien qu'elle ne soit pas une énergie renouvelable, car elle n'est pas directement issue d'une source d'énergie renouvelable, elle est tout de même une source d'énergie verte, car elle repose sur une meilleure utilisation des sources d'énergie primaires et contribue ainsi à la diminution des émissions de dioxyde de carbone. Ces sources d'énergie renouvelable permettent de générer de l'électricité, de la chaleur ou du carburant.

Le défaut des énergies renouvelables réside dans le fait que leur mise en place et leur expansion sont coûteuses, en particulier par rapport au parc nucléaire, qui a été amorti depuis de nombreuses années mais qui vieillit également. Bien que les progrès technologiques aient été réalisés ces dernières années, en particulier dans la conception des panneaux solaires, ce qui a entraîné une baisse significative du prix, les énergies renouvelables demeurent encore considérées comme coûteuses et nécessitent toujours l'existence de régimes de soutien public pour attirer les investissements.

Les énergies renouvelables désignent les différentes formes d'énergie finale (électricité, chaleur ou carburant) qui sont issues de sources d'énergie renouvelables. Les énergies primaires diffèrent des sources d'énergie traditionnelles, qu'elles soient fossiles ou nucléaires.

Les ressources renouvelables ne peuvent être épuisées à long terme, car elles proviennent directement des phénomènes naturels tels que le soleil, le vent, les flux hydrauliques, la chaleur naturelle de la terre, et bien d'autres. Leur utilisation actuelle ne restreint pas leur utilisation à venir. Autrement dit, elles se reconstituent plus vite qu'elles ne sont employées. Les énergies écologiques sont basées sur des flux, contrairement aux énergies traditionnelles qui se basent sur des réserves provenant de gisements restreints de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz) ou fissiles.

I.1 Principe et classification

La géothermie, une source d'énergie renouvelable et durable, tire parti de la chaleur interne de la Terre pour produire de l'électricité et fournir du chauffage. Exploitée depuis des siècles sous diverses formes, la géothermie joue un rôle crucial dans la transition énergétique actuelle. Cet

article explore le principe de la géothermie, sa classification technologique, et son intégration dans le mix énergétique moderne [6].

Le principe de la géothermie repose sur l'utilisation de la chaleur stockée sous la surface terrestre. Cette chaleur provient principalement de la désintégration radioactive des éléments dans le noyau terrestre et de la chaleur résiduelle de la formation de la planète. Elle est transférée vers la surface par conduction et convection, réchauffant les roches et les eaux souterraines [7].

Les systèmes géothermiques exploitent cette chaleur via des puits forés dans des réservoirs souterrains contenant de l'eau chaude ou de la vapeur. Cette énergie thermique est ensuite convertie en électricité ou utilisée directement pour des applications de chauffage.

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. Par exemple 10 °C par 100 mètres en Alsace et même exceptionnellement 100 °C par 100 mètres à Larderello, Italie, et seulement 1 °C par 100 mètres près de Padoue (Ville italienne de la région de la plaine du Pô) [8].



Figure I. 1 : Centrale géothermique

La géothermie peut être classée en différentes catégories technologiques selon la température des ressources géothermiques et leur utilisation :

I.1.1 Géothermie à Haute Température

- Centrales à Vapeur Sèche : Utilisent la vapeur d'eau extraite directement du sol pour actionner les turbines et produire de l'électricité.

- Centrales à Vapeur Flash : Extraient de l'eau chaude à haute pression, qui est ensuite dépressurisée (flashée) pour produire de la vapeur secondaire utilisée pour générer de l'électricité.
- Centrales à Cycle Binaire : Utilisent une source géothermique modérément chaude pour chauffer un fluide secondaire avec un point d'ébullition plus bas, permettant la génération de vapeur pour faire tourner une turbine.

Tableau I. 1 : Classes de la géothermie [9]

	Caractéristiques	Utilisations
Très basse énergie	10°C et 15°C	Chauffage et rafraîchissement de locaux avec pompe chaleur par capteur de surface ou forage dans le sol
Basse énergie	30°C < T° < 100°C	Chauffage urbain, utilisations industrielles, Thermalisme, balnéothérapie (nappe phréatique)
Moyenne et Haute énergie	100°C < T° < 180°C 180°C < T° < 380°C	Production d'électricité (eau sous forme de vapeur)

I.1.2 Géothermie à Basse Température

Pompes à Chaleur Géothermiques (PCG) : Utilisent la chaleur de la Terre pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. Elles sont efficaces pour des températures allant de 5 à 30°C.

Systèmes de Chauffage Direct : Utilisent directement l'eau chaude des réservoirs pour des applications telles que le chauffage de bâtiments, de serres, et d'installations aquacoles.

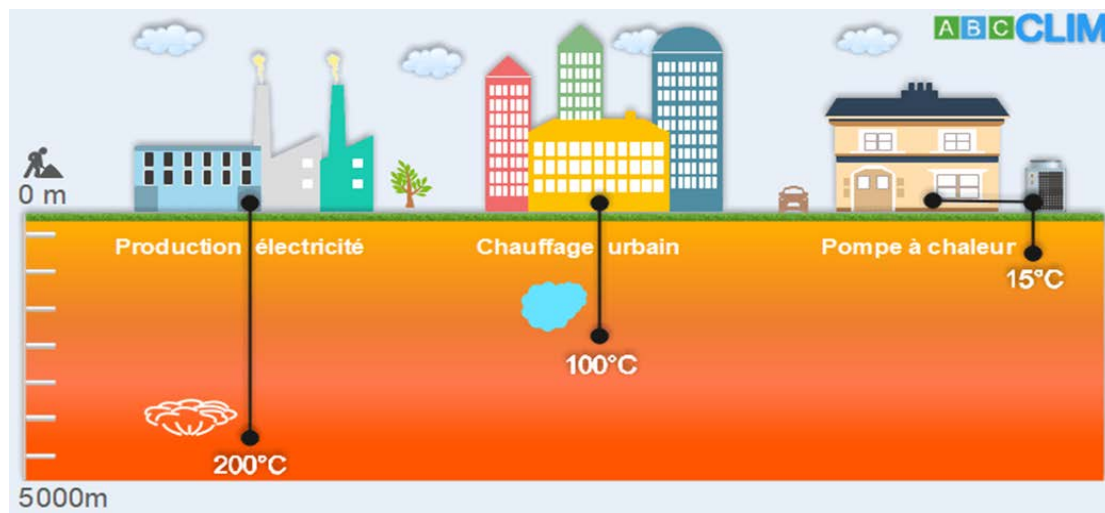


Figure I. 2 : Classes de la géothermie

L'intégration de la géothermie dans le mix énergétique actuel présente plusieurs avantages :

- **Énergie Bas Carbone** : La géothermie produit très peu de gaz à effet de serre comparé aux combustibles fossiles, contribuant ainsi à la réduction des émissions de CO₂.
- **Fiabilité et Disponibilité** : Contrairement aux énergies solaire et éolienne, la géothermie peut fournir une énergie de base stable et continue, indépendante des conditions météorologiques.
- **Efficacité Énergétique** : Les systèmes géothermiques sont hautement efficaces, particulièrement les pompes à chaleur géothermiques, qui peuvent fournir plusieurs unités de chauffage par unité d'électricité consommée.
- **Utilisation Locale et Décentralisée** : Les projets géothermiques peuvent être développés localement, réduisant ainsi les pertes de transmission et augmentant la résilience énergétique des communautés.

Malgré ces avantages, la géothermie fait face à des défis, notamment le coût élevé initial des forages et de l'exploration, ainsi que les risques associés à la sismicité induite. Néanmoins, avec l'innovation technologique et les incitations politiques, la géothermie peut jouer un rôle significatif dans un avenir énergétique plus propre et plus durable [10].

I.2 Différents types de captage et source d'énergie

I.2.1 Capteur horizontal

L'intérêt réside dans la conductivité et l'inertie thermique du sol, qui restent constantes tout au long de l'hiver, que ce soit de jour ou de nuit. Les minéraux et les substances organiques sont des conducteurs thermiques exceptionnels [11].

Il sera nécessaire d'avoir un terrain d'une superficie de 1,5 à 2 fois la surface chauffée. Les tuyaux souples (PEHD ou PER) seront disposés en serpentins enterrés de 80 cm à 1 mètre. De l'eau glycolée circulera dans cet échangeur et facilitera le transfert d'énergie. Les tubes du capteur peuvent avoir une longueur totale de plusieurs centaines de mètres, avec des spires espacées de plusieurs dizaines de centimètres. Il est crucial de faire cet écartement afin d'éviter la gelée du sol et de faciliter sa régénérescence [12].

Il est essentiel que le sol soit naturellement perméable afin de favoriser les échanges thermiques. Dans les sols argileux, il est nécessaire de placer les capteurs sur un lit de sable.

Les capteurs peuvent être entourés d'une pelouse ou d'un jardin, mais il est préférable d'éviter tout arbre à proximité, car les racines pourraient causer des dommages aux tubes.

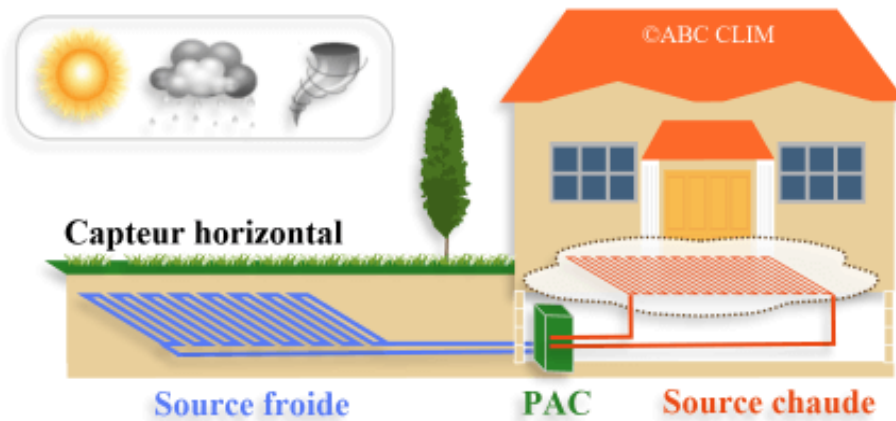


Figure I. 3 : Captage horizontal

I.2.2 Capteur vertical, sonde géothermique

Pour améliorer la conductivité, les sondes verticales en tubes PHED sont placées dans un forage rempli de bétonite, qui peut atteindre une profondeur allant jusqu'à 100 mètres. La sonde en circuit fermé permet la circulation d'eau glycolée dans des tubes de polyéthylène de 25 à 40 mm de diamètre. Si plusieurs capteurs verticaux sont présents sur un même terrain, il est nécessaire de les séparer par une distance de 10 mètres.

En raison de sa taille réduite, ce dispositif est plus coûteux qu'un captage horizontal et nécessite une autorisation (DRIRE). Il est recommandé de solliciter l'assistance d'un géologue, qui possède les connaissances et certains logiciels nécessaires pour optimiser la mise en place des capteurs.

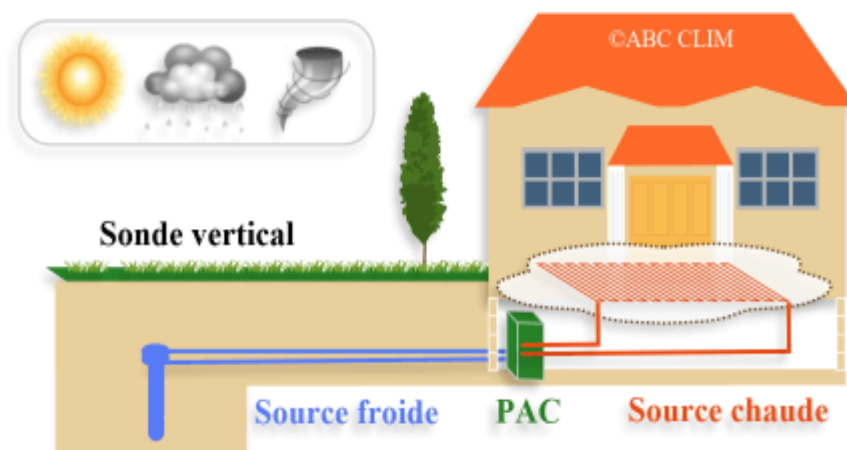


Figure I. 4 : Captage vertical

I.2.3 Captage par nappe phréatique

Il existe deux méthodes pour capturer l'eau : soit on la puise dans un seul puits, puis on la rejette dans une rivière ou un lac, soit on utilise le principe des deux forages.

Ce genre de collecte implique un forage afin de récupérer les calories présentes dans l'eau, tandis que l'autre permet de rejeter l'eau une fois que l'énergie est extraite. Étant donné la stabilité élevée de la température de l'eau (7 et 12 °C), ce type de captage présente un intérêt élevé sur le plan énergétique. Il est nécessaire de tenir compte des caractéristiques physiques (dureté, acidité) de l'eau, ainsi que de la disponibilité de la source de captage en quantité adéquate. Il est également nécessaire de mener une étude avant toute réalisation.

I.3 Avantages et Inconvénients de la Géothermie

I.3.1 Avantages de la Géothermie

1. Source d'Énergie Renouvelable et Durable

- La géothermie utilise la chaleur naturelle de la Terre, une source inépuisable à l'échelle humaine.

2. Faibles Émissions de Gaz à Effet de Serre

- Les centrales géothermiques émettent très peu de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre comparé aux combustibles fossiles.

3. Disponibilité Continue

- Contrairement aux énergies solaire et éolienne, la géothermie fournit une énergie de base stable et continue, 24 heures sur 24, indépendamment des conditions météorologiques.

4. Réduction des Coûts d'Importation d'Énergie

- En utilisant des ressources locales, les pays peuvent réduire leur dépendance aux importations de combustibles fossiles.

5. Utilisation Directe

- La géothermie peut être utilisée directement pour le chauffage de bâtiments, de serres, et pour des applications industrielles, ce qui améliore l'efficacité énergétique globale.

6. Faible Empreinte au Sol

- Les installations géothermiques occupent relativement peu d'espace comparé à d'autres installations de production d'énergie, telles que les barrages hydroélectriques ou les fermes solaires.

7. Longévité des Installations

- Les centrales géothermiques peuvent fonctionner pendant des décennies avec un entretien approprié, offrant une source d'énergie à long terme.

I.3.2 Inconvénients de la Géothermie

1. Coût Initial Élevé

- Les coûts de forage et de construction des infrastructures géothermiques peuvent être très élevés, nécessitant des investissements importants au départ.

2. Risque de Sismicité Induite

- Les activités de forage et d'injection peuvent provoquer des séismes induits, posant des risques potentiels pour la sécurité et les infrastructures locales.

3. Disponibilité Géographique Limitée

- Les ressources géothermiques de haute température sont limitées à certaines régions du monde, ce qui peut restreindre leur utilisation à grande échelle.

4. Problèmes de Gestion des Fluides

- L'extraction de fluides géothermiques peut entraîner des problèmes de corrosion, de dépôt de minéraux, et de gestion des déchets liquides, nécessitant des systèmes de traitement spécifiques.

5. Impact Environnemental Localisé

- Bien que généralement faibles, les centrales géothermiques peuvent avoir des impacts environnementaux locaux, tels que le dégagement de gaz sulfurés et le risque de contamination des eaux souterraines.

6. Déclin des Réservoirs

- Sans gestion appropriée, les réservoirs géothermiques peuvent se refroidir ou se dépressuriser avec le temps, diminuant leur efficacité et leur capacité de production.

7. Complexité Technologique

- La conception, la construction et l'exploitation des systèmes géothermiques nécessitent des connaissances spécialisées et une technologie avancée, ce qui peut être une barrière pour certains pays en développement.

I.4 Tendances actuelles

I.4.1 Tendances de l'énergie géothermique dans la technologie des centrales électriques

Entre 10% et 17% de l'électricité est produite à partir de la vapeur géothermique, qui est environ trois fois moins efficace que les centrales nucléaires ou à combustibles fossiles. Étant donné que la vapeur produite par les installations géothermiques est souvent inférieure à 250 °C, elles ont les valeurs d'efficacité les plus faibles. La capacité électrique géothermique installée totale est de 7974 MW, soit 3 % de la demande mondiale [13]. Depuis 1965, la capacité de production d'énergie géothermique a augmenté à un rythme annuel moyen d'environ 250 MW. La capacité de transformer la chaleur géothermique en électricité est nécessaire pour la production d'énergie géothermique. Le transfert de la chaleur vers un système de production d'énergie de surface efficace pour convertir l'énergie thermique en énergie électrique est nécessaire pour atteindre cette demande [13].

Les chercheurs sont généralement d'accord pour dire que cinq arrangements en matière d'énergie géothermique ont été créés. La division peut également se faire en deux groupes distincts, à savoir, les cycles de vapeur pour une magnitude plus élevée des enthalpies de puits et les cycles binaires pour une magnitude plus faible des enthalpies. Il y a aussi de la vapeur sèche, un seul flash, un double flash, un système avancé de conversion d'énergie géothermique. La quantité minimale d'énergie géothermique pour la production d'électricité devrait être de 1 TW dans le monde entier, mais seulement 32% des ressources géothermiques dans le monde sont adaptées à la production d'énergie. L'énergie géothermique peut être extraite à l'aide de diverses technologies, selon l'état de la ressource. Les systèmes de vapeur sèche sont utilisés à des températures plus élevées où le géofluide est une vapeur surchauffée. Environ 23 % de la capacité géothermique mondiale est constituée de centrales à vapeur sèche, 63 centrales fonctionnant actuellement et produisant au total 2863 MW. La centrale géothermique à vapeur sèche est la moins chère et la plus efficace de toutes les centrales géothermiques. Environ 42 % de la capacité de production d'énergie géothermique déployée dans le monde est constituée d'un seul flash et 19 % d'un double flash. Ainsi, la majorité des centrales géothermiques dans

le monde sont des centrales à vapeur flash. De plus, 14 % de la capacité géothermique totale provient actuellement des centrales à cycle binaire, avec 286 centrales en exploitation produisant 1790 MW d'énergie. Cependant, la deuxième règle de la thermodynamique fixe un plafond sur la quantité d'énergie qui peut être transformée en électricité. Cela dépend également de la façon dont l'usine est conçue et de l'efficacité de ses différentes pièces. L'efficacité dépend à la fois de la meilleure conception de l'usine et de l'efficacité des divers composants.

I.4.2 Tendances sur les systèmes géothermiques améliorés (EGS) :

Le système géothermique amélioré est une technologie qui exploite l'énergie de roche sèche chaude. L'utilisation de la roche sèche chaude (RDH) comme source d'énergie renouvelable et acceptable pour l'environnement pour produire de l'énergie est plutôt un concept nouveau. À l'exception des systèmes hydro-géothermiques, cette technologie peut capter l'énergie des roches sèches avec peu ou pas d'eau, comme le montre le tableau 1. En augmentant artificiellement la capacité hydraulique d'un réservoir géothermique, un fluide de travail est introduit et acheminé vers une centrale électrique ou une centrale thermique combinée.

Tableau I. 2 : Caractéristiques des systèmes géothermiques [14]

Types de systèmes géothermiques	Gamme de profondeurs	Caractéristiques	Attributs comparatifs
Systèmes hydrothermaux	0.1-4.5 Km	Extrait la chaleur des roches à haute perméabilité avec présence d'eau souterraine	Les applications conventionnelles sont un peu rares car la plupart de l'énergie géothermique est stockée dans les HDR. Concentré autour des zones volcaniques actives.
Systèmes géothermiques améliorés	2-10 Km	Extrait la chaleur de la roche sèche chaude (HDR) avec une faible perméabilité avec une absence d'eau souterraine.	Peut atteindre une plus grande quantité de chaleur dans les fractures artificielles. Peut extraire une grande quantité d'énergie des roches sèches par fracturation hydraulique.

Les centrales basées sur EGS sont plus efficaces que tout autre système géothermique pour produire de l'électricité et peuvent fournir une partie importante de l'énergie thermique à basse température requise.

Le tableau 2 présente plusieurs paramètres pour certaines des centrales BSE installées dans le monde. Bien qu'ils soient minoritaires par rapport à d'autres systèmes géothermiques plus répandus et dispersés dans le monde, ils ont un plus grand potentiel.

Tableau I. 3 : Paramètres pour certaines des centrales installées dans le monde [15]

Sites de projet	Capacité		Durée du projet	Température (°C)	Fluide actif
Hijiori (Japan)	130 KW	Granodiorite	1985-2002	190	L'eau
Soultz-sous-Forêts (France)	1 MW	Granite	1984-present	200	Saumure
Fenton Hill (USA)	60 KW	Granite	1974-1995	192	L'eau
Basel (Switzerland)	3 MW	Granite	2002-2009	200	L'eau
Habanero EGS Project (Australia)	1.7 MW	Granite	2003-2013	263	Saumure
Groß Schönebeck (Germany)	1 MW	Sandstone, andesite (Rotliegend formation)	2000-present	145	L'eau

I.5 Exemples de projets réussis

Les systèmes de chauffage et de climatisation que l'on au Centre intégré de mécanique industrielle de la chaudière distinguent par leur design tout-à-fait innovateur. L'utilisation du sol en tant que principale source d'énergie le traitement d'air a été choyé, vu le caractère du projet de construction. Le rapport présente dans un premier temps une description des systèmes mécaniques installés et leurs modes d'opérations. Ensuite, l'élaboration des algorithmes qui ont servi à la sur le logiciel Matlab des outils de calculs précède des résultats

Avancement technologique :

Au cours des quatre dernières décennies, l'utilisation de l'énergie a considérablement augmenté, tant pour la production d'électricité que l'utilisation directe.

Aujourd'hui, l'énergie géothermique est une source d'électricité importante dans de nombreux pays.

La capacité totale installée des centrales géothermiques dans le monde en 2018 a atteint 15 GWhs, et cette capacité atteint 17 GWh en 2021.

Plusieurs études ont été développées pour utiliser l'énergie géothermique dans diverses applications énergétiques.

Autosuffisance énergétique

Le prix des énergies renouvelables, contrairement aux combustibles fossiles, ne fluctue pas car les coûts de production sont prévisibles et peuvent être planifiés. Ce point est extrêmement important car, selon les contextes, l'énergie conventionnelle est très volatile et doit donc être très coûteuse à petite comme à grande échelle. Mais s'il y a une chose qui fait la différence pour les économies locales, c'est que l'énergie peut être produite dans le monde entier, ce qui garantit l'indépendance de toutes les régions du monde. L'énergie, qui ne peut être obtenue avec des combustibles fossiles, doit être importée dans les régions défavorisées.

Avantages pour l'économie du pays

Les énergies renouvelables sont bénéfiques non seulement pour les petites économies, mais aussi pour les économies nationales. Selon l'Agence internationale de l'énergie, doubler la part des énergies renouvelables pour atteindre 36 % de la consommation entraînerait une augmentation significative de l'emploi dans le secteur, avec une estimation de 9,2 millions d'emplois supplémentaires, et une augmentation de 1,1 % de l'économie mondiale. En bref, l'adoption des énergies renouvelables favorise la création de nouvelles entreprises, réduit la dépendance énergétique envers des tiers et stimule l'emploi, avec jusqu'à cinq emplois de plus créés pour chaque emploi dans le secteur de l'énergie conventionnelle.

Énergies sûres

L'utilisation des énergies renouvelables offre un avantage crucial en termes de sécurité, car elles ne présentent pratiquement aucun risque pour notre santé, ce qui constitue un avantage indéniable par rapport aux énergies non renouvelables.

Energies compétitives et adaptées

Les avancées technologiques récentes permettent d'exploiter les énergies renouvelables de manière durable et respectueuse de l'environnement, tout en améliorant leur efficacité. Ainsi, l'énergie solaire et l'énergie éolienne deviennent des sources sûres, compétitives et adaptées à une utilisation à grande échelle.

Des plateformes spécialisées proposent des conseils sur les prix de l'électricité et du gaz proposés par différentes entreprises utilisant les énergies renouvelables, permettant ainsi de choisir une offre qui correspond aux besoins individuels et aux exigences de performance globales.

I.6 Etat de l'art des systèmes intégrés géothermiques

I.6.1 Revue de la littérature sur les systèmes intégrés géothermiques

Les pompes à chaleur géothermiques, réduisent considérablement la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ dans les bâtiments tout en répondant aux besoins de chauffage, de refroidissement des locaux et de chauffage de l'eau domestique.

Dans une pompe à chaleur géothermique intégrée (GSHP), les divers éléments sont méticuleusement intégrés afin d'améliorer les performances globales du système. Voici la façon dont ces éléments sont associés afin de créer un système intégré dans cette application.

Eléments de Géothermie :

- On installe des boucles géothermiques dans le sol ou dans l'eau de surface afin de capter la chaleur pendant l'hiver et de la renvoyer pendant l'été.
- Le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur circulant dans les boucles géothermiques et le fluide frigorigène à l'intérieur de la pompe à chaleur est facilité par les échangeurs de chaleur, qu'ils soient à plaques ou à coque et tube.

Eléments de la Pompe à Chaleur :

- Le compresseur, le condenseur, l'évaporateur et le détendeur constituent la pompe à chaleur elle-même. Ces éléments collaborent afin d'extraire la chaleur du sol pendant l'hiver et de rejeter la chaleur excessive dans le sol pendant l'été.
- Les capteurs de température du fluide et du sol sont fréquemment installés dans la pompe à chaleur, tandis que les éléments de commande permettent de réguler le fonctionnement du système en fonction des conditions extérieures.

Composants Électroniques et Informatiques :

- Les systèmes électroniques assurent la surveillance et la régulation en temps réel du fonctionnement de la pompe à chaleur et des boucles géothermiques. Il est possible que ces systèmes comprennent des unités de contrôle programmables, des capteurs de température, des thermostats intelligents, et bien d'autres encore.
- Il est possible d'intégrer les logiciels de gestion de l'énergie et de contrôle du système afin d'améliorer les performances du système en adaptant les paramètres de fonctionnement en fonction des conditions météorologiques, des préférences des utilisateurs et des tarifs d'électricité.

Communication et intégration

- Le système est intégré par des réseaux de communication, comme des réseaux de bus de terrain (comme BACnet, Modbus) ou des protocoles de communication sans fil.
- La coordination efficace entre les différents éléments du système est facilitée grâce à cette intégration, ce qui facilite le contrôle centralisé, le diagnostic des problèmes et la mise à jour des logiciels.

En associant ces divers éléments de manière synergique, un système intégré de pompe à chaleur géothermique peut offrir un chauffage et un refroidissement performants tout en réduisant l'impact sur l'environnement et en optimisant la consommation d'énergie.

I.7 Évolution et Histoire

Au fil du temps, plusieurs avancées technologiques et développements ont marqué l'évolution des systèmes intégrés dans le domaine de la géothermie. Voici une vision globale de cette transformation :

1) Les premières utilisations de la géothermie ont commencé à être utilisées pour chauffer les bâtiments et produire de l'eau chaude dès le XIXe siècle.

Les systèmes les plus anciens utilisaient fréquemment des sources d'eau chaude naturelles issues de réservoirs souterrains peu profonds.

2) Développement des pompes à chaleur géothermiques (GHP) : Au cours des années 1940 et 1950, les pompes à chaleur géothermiques ont gagné en popularité pour réchauffer et refroidir les bâtiments.

Les premières GHP étaient basées sur des systèmes à boucle ouverte, où l'eau provenait d'un puits géothermique, était utilisée pour le chauffage ou le refroidissement, puis était rejetée dans un autre puits ou dans une source d'eau naturelle.

3) Les GHP ont connu des avancées technologiques au fil des décennies, notamment l'introduction de systèmes à boucle fermée qui utilisent un fluide caloporteur circulant dans des tubes enterrés pour échanger la chaleur avec le sol.

En raison de leur efficacité accrue et de leur impact environnemental réduit, les systèmes à boucle fermée sont devenus de plus en plus répandus.

4) Les applications de la géothermie ont évolué ces dernières décennies, s'étendant à des systèmes de chauffage et de refroidissement pour des bâtiments de toutes tailles, allant des maisons individuelles aux grands complexes commerciaux et industriels.

5) Aujourd'hui, il est courant d'intégrer les systèmes de géothermie avec d'autres technologies afin de maximiser leur efficacité, tels que l'intégration avec des systèmes solaires pour générer de l'électricité ou de l'eau chaude supplémentaire.

Grâce aux progrès réalisés dans les contrôles intelligents et la gestion de l'énergie, les systèmes de géothermie ont pu être utilisés différemment.

En bref, l'évolution des systèmes intégrés dans le secteur de la géothermie a été marquée par des avancées technologiques continues, une augmentation des applications et une intégration croissante avec d'autres technologies afin de répondre de manière plus durable et efficace aux besoins en chauffage, refroidissement et production d'électricité.

I.7.1 Exemples de projets accomplis.

Le Bureau des technologies géothermiques du Département américain de l'énergie élabore actuellement une étude de vision géothermique pour éclairer les stratégies d'investissement du **GTO**, discuter des scénarios de croissance géothermique pour l'avenir ; et s'adresse à tous les segments de marché de l'industrie.

Le **GHP** est l'une des applications thermiques des ressources à basse température introduites dans la recherche en vision.

Dans les 50 États et le District de Columbia aux États-Unis, les GHP ont été employées [16]. La Floride, l'Illinois, l'Indiana, le Michigan, le Minnesota, le Missouri, l'État de New York, l'Ohio, la Pennsylvanie et le Texas comptaient pour 52 % des expéditions nationales de GHP.

Les GHP sont principalement utilisés dans les régions à climat froid et à forte densité de population.

Selon un récent rapport, les États-Unis étaient responsables de 29% des installations mondiales de GHP en termes de capacité, avec 13 564 MWt (3,9 millions de tonnes, soit 1,1 million d'unités GHP étant donné la taille typique d'une unité GHP d'environ 12 kWt) installées d'ici 2012 [17]. Environ 199 millions de mètres carrés (2,14 milliards de pieds carrés) de bâtiments résidentiels et commerciaux aux États-Unis sont conditionnés par ces systèmes GHP. Les GHP ont actuellement une part de marché d'environ 1% sur le marché américain du chauffage, de la ventilation et de la climatisation (CVC) [18]. Selon un rapport de Priority Metrics Group [19] le marché des GHP aux États-Unis était estimé à environ 3,7 milliards de dollars comprenant la conception, l'équipement et l'installation. Les revenus totaux provenant des ventes nationales de GHP ont été estimés à environ 319,5 millions de dollars en 2009.

Le prix de mise en place des GHP fluctue grandement en fonction des conditions géologiques, des dépenses de construction, des systèmes de conception et de l'équipement de pompe à chaleur. Quelques études ont été réalisées aux États-Unis afin de recueillir des données sur les dépenses des GHP. D'après ces études, le prix moyen d'un système GHP commercial était de 20,75 dollars par pied carré en 2012 [20]. Selon [21], le coût habituel d'un système GHP installé dans une nouvelle maison oscillait entre 3 000 et 5 000 dollars par tonne de refroidissement.

Les principaux obstacles à l'adoption rapide des GHP aux États-Unis sont le coût initial élevé et le manque de sensibilisation du public et de soutien gouvernemental important. La diminution récente des prix du pétrole et du gaz naturel diminue la valeur monétaire des économies d'énergie, ce qui diminue la motivation des consommateurs à investir dans les groupes hydrocarbures. Finalement, les crédits d'impôt pour les installations de GHP seront épuisés à la fin de 2016 à moins que l'industrie ne parvienne à persuader le Congrès de procéder à une prolongation des crédits. Il est possible de surmonter la difficulté du coût initial élevé pour le déploiement des GHP grâce à des avancées dans les domaines suivants :

- Échangeurs de chaleur géothermique abordables et équipements de forage sur mesure pour les GHP.
- Une conception améliorée des GHP grâce à une meilleure compréhension de la formation géologique.
- Production en grande quantité d'équipements GHP.

- Encouragements financiers ou financement externe.
- L'incorporation des GHP dans l'infrastructure de services publics dans de nouvelles initiatives.

Le potentiel technique du GHP est évalué en se basant sur les données de consommation d'énergie recueillies lors de la dernière enquête sur la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels et commerciaux, réalisée par l'Energy Information Administration (EIA) et les données de réduction d'énergie pour les GHPs comparées aux systèmes d'aération conventionnels existants, calculées à partir de résultats de simulations informatiques. Les simulations informatiques prennent en compte de nombreux éléments qui influencent la réduction de l'énergie, tels que les charges thermiques (déterminées par la localisation, l'enveloppe de construction et l'activité de l'édifice), les performances des systèmes de climatisation existants, les conditions géologiques locales (comme une température de sol ininterrompue et une conductivité thermique du sol) et les performances des générateurs de chaleur [22].

La Figure 1.6 illustre la procédure d'évaluation du potentiel technique des pompes à chaleur géothermiques (GHP) et est expliquée dans les sections suivantes. Le Livre de données sur l'énergie des bâtiments de 2009 (DOE 2009) présente les intensités énergétiques moyennes par site, selon l'activité principale des bâtiments et la zone climatique.

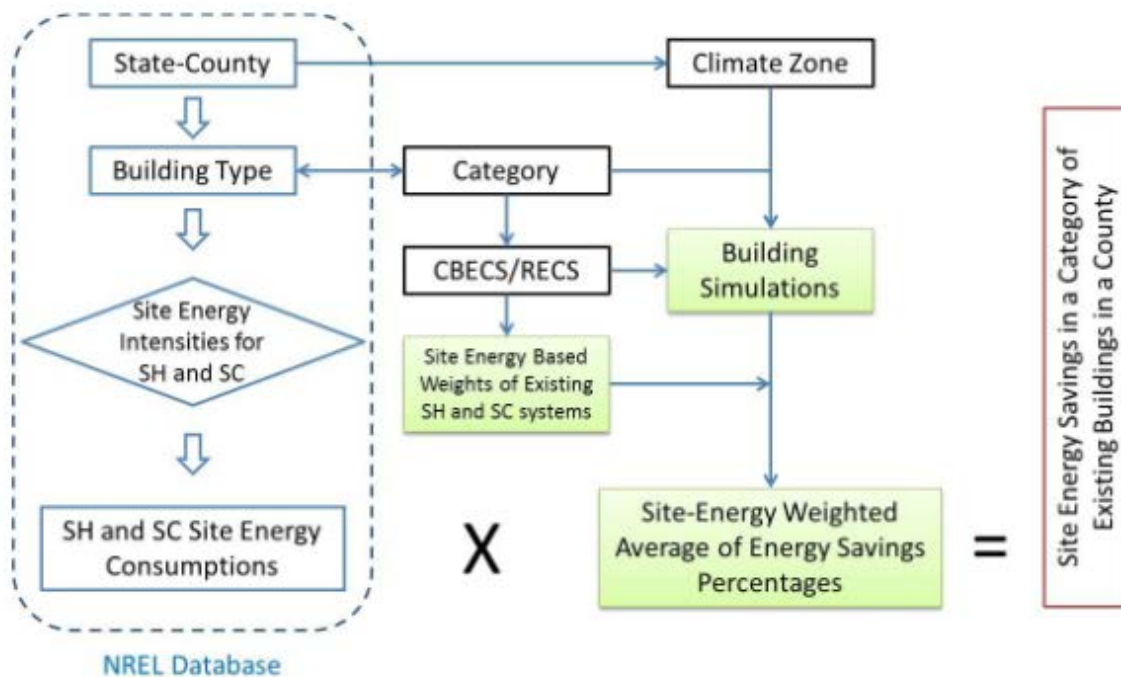


Figure I. 5 : Processus d'évaluation du potentiel technique

En résumé, Le modèle représentatif des maisons typiques aux États-Unis avec chauffage est une maison standard d'un étage, de 1 644 pieds carrés, utilisée dans l'étude. Dans le cas des bâtiments commerciaux, 18 types de bâtiments sont répartis en cinq groupes selon leurs activités similaires, et chaque groupe est représenté par l'un des modèles de bâtiments de référence commerciale du Département de l'Énergie des États-Unis (DOE).

Aux États-Unis, treize sites ont été choisis pour représenter les principales zones climatiques. Ces bâtiments de référence ont été soumis à des simulations afin d'évaluer les disparités de consommation d'énergie entre les systèmes de CVC classiques et les systèmes GSHP, en ce qui concerne le pourcentage d'économie d'énergie. Les conclusions ont démontré que la dimension particulière d'un bâtiment n'a pas une influence significative sur les économies d'énergie, mais les caractéristiques des systèmes de chauffage et de climatisation existants, telles que l'efficacité de l'équipement de refroidissement ou la source d'énergie pour le chauffage, ont un effet significatif sur les économies d'énergie.

Analyses du système de pompe à chaleur géothermique (GHP) et des systèmes de chauffage à air conditionné de référence (CVC)

Le système de pompe à chaleur géothermique (GHP) résidentiel simulé dans cette étude comprend une unité de pompe à chaleur eau-air (WAHP) équipée d'un compresseur scroll à deux étages et d'un moteur de ventilateur à vitesse variable à commutation électronique, un circulateur de fluide de boucle de taille adéquate et très économe en énergie, ainsi qu'un forage vertical de chaleur terrestre correctement conçu et installé.

L'unité de pompe à chaleur géothermique (GHP) à deux étages présente une efficacité nominale de refroidissement avec un coefficient de performance énergétique (EER) de 18,2 à pleine capacité et un EER de 27 à 76% de la capacité totale. Le COP de l'unité de GHP à deux étages est de 4 à pleine capacité et de 4,5 à 76% de la capacité totale, ce qui correspond à l'efficacité nominale de chauffage. La conception de l'échangeur de chaleur du sol vise à maintenir la température du fluide du circuit géothermique (la température du fluide entrant dans l'unité GHP) dans une plage de 30 à 95°F (de -1 à 35°C) en fonction des charges de bâtiment, des caractéristiques thermiques du sol et des températures du sol non perturbées.

Le système de GHP distribué, qui est le système de GHP le plus répandu aux États-Unis, est utilisé dans cette étude pour simuler le commerce de GHP. Les unités WAHP à deux étages du

système commercial simulé de GHP sont reliées par une boucle d'eau commune, chacune desservant une zone spécifique dans le bâtiment. Même si une GHP peut également fournir de l'ECS en partie ou entièrement (par exemple, avec un désurchauffeur ou une pompe à chaleur intégrée plus sophistiquée).

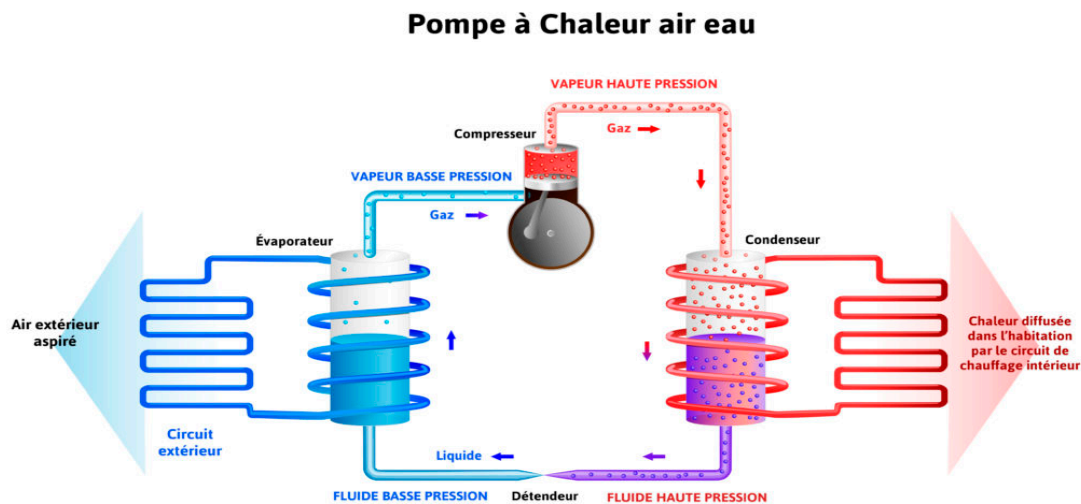


Figure I. 6 : Pompe à chaleur

L'étude examine les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) dans les édifices résidentiels et commerciaux aux États-Unis, en mettant l'accent sur l'emploi des pompes à chaleur géothermiques (GHP) comme alternative aux systèmes traditionnels. Dans les bâtiments commerciaux, les résultats indiquent que l'électricité est la principale source d'énergie pour la climatisation, tandis que le gaz naturel, le fioul de chauffage et le propane sont les principaux fournisseurs de chauffage.

Selon les simulations, les GHP ont des performances élevées, avec un coefficient de performance (COP) de 4 à pleine capacité et de 4,5 à 76% de la capacité totale pour le chauffage, tandis que le coefficient de performance énergétique (EER) est de 18,2 à pleine capacité et de 27 à 76% de la capacité totale pour la climatisation.

Selon l'étude, il est également observé que la taille du bâtiment n'a pas un impact significatif sur les économies d'énergie des GHP, mais que les caractéristiques des systèmes de CVC classiques, comme l'efficacité de l'équipement de refroidissement, ont un impact sur les économies d'énergie. Finalement, les simulations laissent entendre que l'intégration des GHP dans les édifices commerciaux pourrait conduire à des économies d'énergie considérables par rapport aux systèmes de CVC classiques.

I.6.3 Avancées technologiques récentes :

Certains progrès technologiques récents dans le domaine des pompes à chaleur géothermiques sont les suivants :

- 1) La conception et les matériaux des échangeurs de chaleur sont améliorées, ce qui permet d'améliorer l'efficacité du transfert de chaleur entre le fluide géothermique et le fluide de travail dans la pompe à chaleur.
- 2) Les systèmes de pompes à chaleur géothermiques à deux étages gagnent en popularité en offrant une meilleure efficacité énergétique en ajustant automatiquement la capacité de chauffage ou de refroidissement en fonction des besoins.
- 3) Gérer les pompes à chaleur géothermiques de manière plus intelligente grâce aux progrès dans les systèmes de contrôle, avec des fonctionnalités telles que l'optimisation en temps réel, la prévision de la demande et l'intégration dans les réseaux électriques intelligents.
- 4) Des méthodes de modélisation et de simulation avancées permettent d'améliorer la conception des boucles géothermiques en prenant en considération des éléments tels que la géologie locale, la conductivité thermique du sol et les fluctuations saisonnières de température.
- 5) L'intégration des systèmes de pompes à chaleur géothermiques avec d'autres sources d'énergie renouvelable, telles que les panneaux solaires photovoltaïques et les systèmes de stockage d'énergie, permet de créer des systèmes hybrides offrant une plus grande souplesse et une plus grande efficacité.
- 6) La recherche se focalise sur la création de fluides frigorigènes écologiques : L'objectif de cette étude est de développer des fluides frigorigènes à faible potentiel de réchauffement planétaire (PRP) afin de substituer les réfrigérants à fort PRP traditionnellement employés dans les pompes à chaleur géothermiques, ce qui contribue à diminuer l'impact environnemental.

Les progrès réalisés démontrent l'engagement constant envers l'amélioration des performances, de l'efficacité et de la durabilité des systèmes de pompes à chaleur géothermiques, les positionnant ainsi comme une solution de plus en plus séduisante pour le chauffage et le refroidissement des structures.

Chapitre II : Thermodynamique des systèmes géothermiques

II.1 Introduction

Les systèmes géothermiques intégrés exploitent la chaleur naturelle de la Terre pour diverses applications, notamment le chauffage, le refroidissement et la production d'électricité. Ces systèmes fonctionnent sur la base de principes thermodynamiques fondamentaux, convertissant l'énergie thermique de la Terre en formes d'énergie utilisables.

Les systèmes géothermiques reposent sur le transfert de chaleur du noyau terrestre vers la surface. La chaleur est transférée par conduction, convection et radiation à l'intérieur de la Terre, pour finalement atteindre les réservoirs géothermiques.

La Première loi de la thermodynamique, également connue sous le nom de loi de conservation de l'énergie, stipule que l'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais seulement transférée ou convertie. Dans les systèmes géothermiques, l'énergie thermique est convertie en énergie mécanique ou électrique.

La Deuxième loi de la thermodynamique introduit le concept d'entropie et stipule que les conversions d'énergie ne sont jamais efficaces à 100 %. Une partie de l'énergie est toujours perdue sous forme de chaleur résiduelle, ce qui affecte l'efficacité globale des systèmes géothermiques.

L'efficacité d'un système géothermique est déterminée par l'efficacité avec laquelle il convertit la chaleur géothermique en énergie utile. Cette efficacité est influencée par la différence de température entre le réservoir géothermique et le fluide de travail.

II.2 Types de systèmes géothermiques intégrés

Les systèmes géothermiques intégrés sont des solutions avancées qui combinent différentes technologies pour maximiser l'utilisation de l'énergie géothermique. Ils peuvent être classés en plusieurs types selon leur application, leur configuration et leur technologie utilisée.

II.2.1 Systèmes de Pompe à Chaleur Géothermique (GHP, Geothermal Heat Pumps)

Ces systèmes utilisent la chaleur de la terre pour chauffer et refroidir les bâtiments. Ils sont composés principalement de trois éléments : les boucles souterraines, les pompes à chaleur et les systèmes de distribution d'air ou d'eau.

II.2.1.1 Boucles Fermées

Horizontales : Des tuyaux sont enterrés horizontalement à une profondeur peu profonde.

Verticales : Des forages verticaux plus profonds sont réalisés lorsque l'espace est limité.

Pond/Lake Systems : Utilisation de plans d'eau comme source de chaleur.

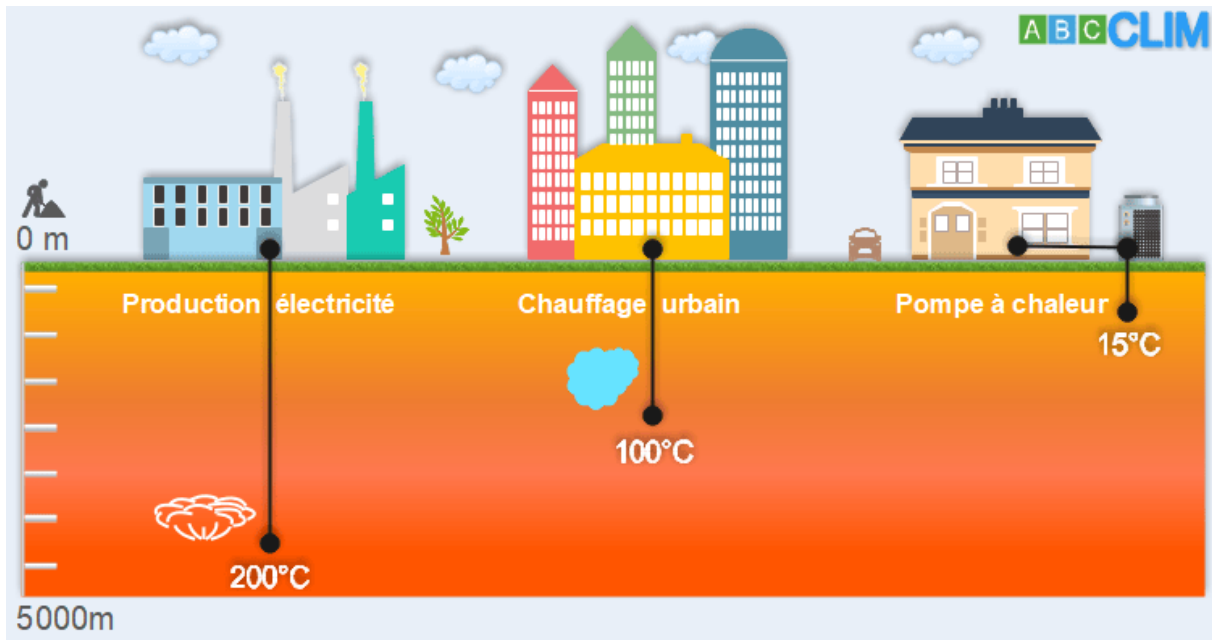


Figure II. 1 : Types géothermiques

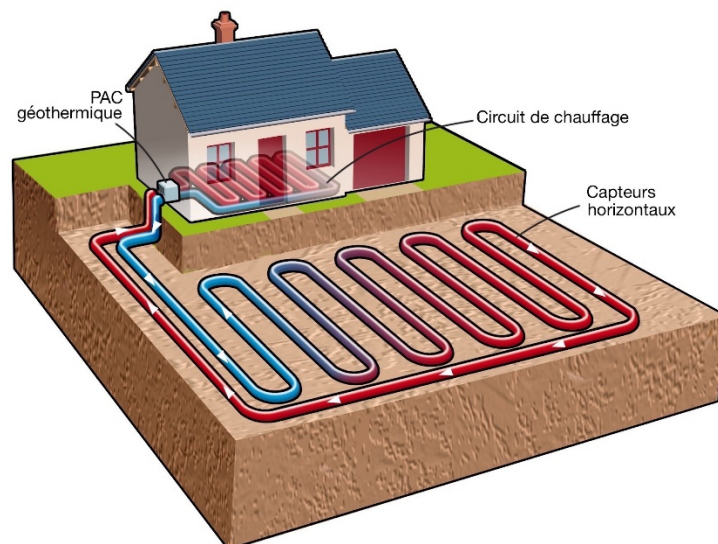


Figure II. 2 : Pompe à Chaleur Géothermique

Les systèmes combinés de chaleur et d'électricité (CHP), également appelés cogénération, sont des technologies avancées qui produisent simultanément de l'électricité et de la chaleur utilisable à partir d'une seule source d'énergie. Lorsqu'ils utilisent l'énergie géothermique, ces systèmes exploitent la chaleur naturelle de la Terre pour fournir des solutions énergétiques efficaces et durables.

II.2.3.1 Principe de Fonctionnement des Systèmes CHP Géothermiques

Extraction de la Chaleur Géothermique

L'énergie thermique est extraite de réservoirs géothermiques situés sous la surface terrestre. Cette chaleur peut provenir de sources de haute température (vapeur sèche ou vapeur flash) ou de sources de température modérée à basse (cycles binaires).

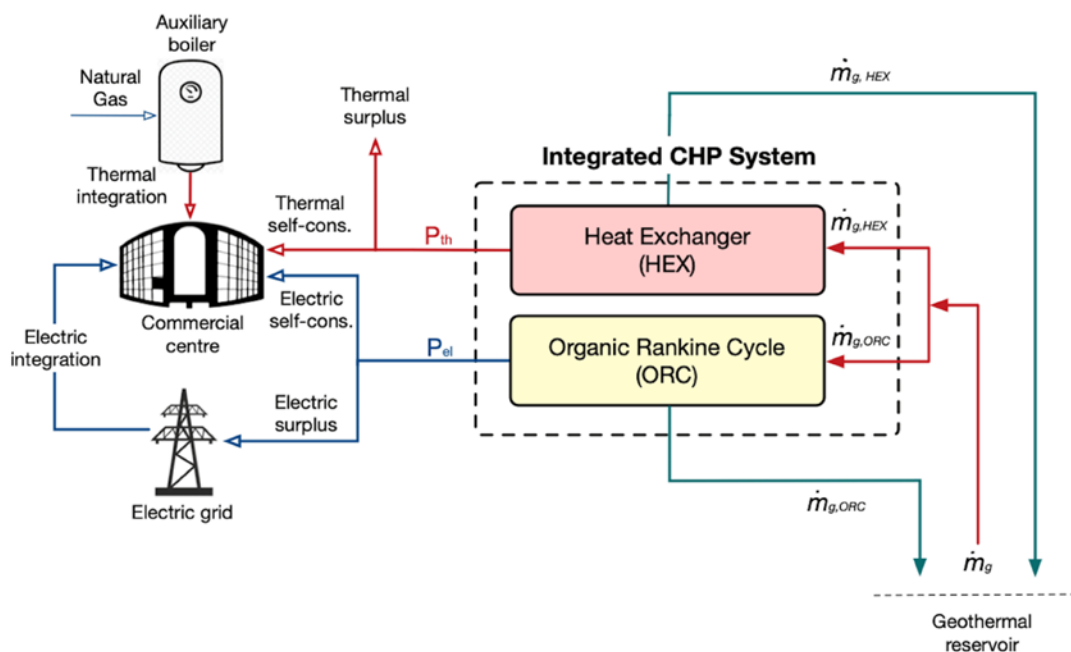


Figure II. 4 : Systèmes Combinés de Chaleur et d'Électricité géothermique

Production d'Électricité

La chaleur extraite est utilisée pour produire de la vapeur qui fait tourner une turbine connectée à un générateur électrique. Dans les systèmes de cycle binaire, un fluide à bas point d'ébullition est chauffé par la chaleur géothermique pour créer la vapeur nécessaire.

Récupération de Chaleur

La chaleur résiduelle après la production d'électricité, qui serait autrement perdue, est récupérée pour des applications de chauffage. Cela peut inclure le chauffage de bâtiments, l'alimentation de réseaux de chauffage urbain, ou des processus industriels nécessitant de la chaleur.

II.2.3.2 Avantages des Systèmes CHP Géothermiques

Efficacité Énergétique Améliorée

En utilisant la même source d'énergie pour produire de l'électricité et de la chaleur, les systèmes CHP géothermiques atteignent des niveaux d'efficacité beaucoup plus élevés que les systèmes séparés. Ils peuvent atteindre des efficacités globales de 80% et plus.

Réduction des Émissions de Gaz à Effet de Serre

En maximisant l'utilisation de l'énergie géothermique, ces systèmes contribuent à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et, par conséquent, diminuent les émissions de CO₂.

Stabilité et Fiabilité

La géothermie fournit une source de chaleur constante et fiable, contrairement aux énergies renouvelables intermittentes comme le solaire et l'éolien. Cela assure une production continue d'électricité et de chaleur.

Utilisation Optimale des Ressources Locales

Les systèmes CHP peuvent être installés localement, réduisant ainsi les pertes de transmission d'énergie et utilisant les ressources géothermiques locales.

II.2.3.3 Applications des Systèmes CHP Géothermiques

Chauffage Urbain

Utilisation de la chaleur pour alimenter des réseaux de chauffage urbain, fournissant de la chaleur à de nombreux bâtiments à partir d'une source centrale.

Industrie

Applications dans des processus industriels nécessitant à la fois de la chaleur et de l'électricité, comme les usines de fabrication, les raffineries, et les installations agroalimentaires.

Bâtiments Commerciaux et Résidentiels

Chauffage et climatisation de grands complexes résidentiels ou commerciaux, offrant des solutions de confort thermique avec une empreinte carbone réduite.

II.2.3.4 Défis et Considérations

Investissement Initial Élevé

Les coûts initiaux pour le forage, l'installation des infrastructures géothermiques et les équipements CHP peuvent être élevés.

Géologie Locale

La disponibilité et la qualité des ressources géothermiques dépendent fortement de la géologie locale. Une étude approfondie du site est nécessaire pour évaluer le potentiel géothermique.

Gestion de la Chaleur Excédentaire

La gestion efficace de la chaleur excédentaire, particulièrement en été lorsque la demande de chauffage est faible, est essentielle pour maintenir l'efficacité du système.

II.2.4 Systèmes Hybrides

Combinaison de l'énergie géothermique avec d'autres sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien, biomasse) pour améliorer la fiabilité et l'efficacité énergétique globale.

II.2.4.1 Systèmes Géothermiques-Solaires

Utilisent l'énergie solaire pour compléter la chaleur géothermique, surtout utile pour les applications de chauffage ou pour augmenter la température des fluides géothermiques.

II.2.4.2 Systèmes Géothermiques-Biomasse

Combinent la chaleur géothermique avec la combustion de la biomasse pour produire de l'électricité et de la chaleur.

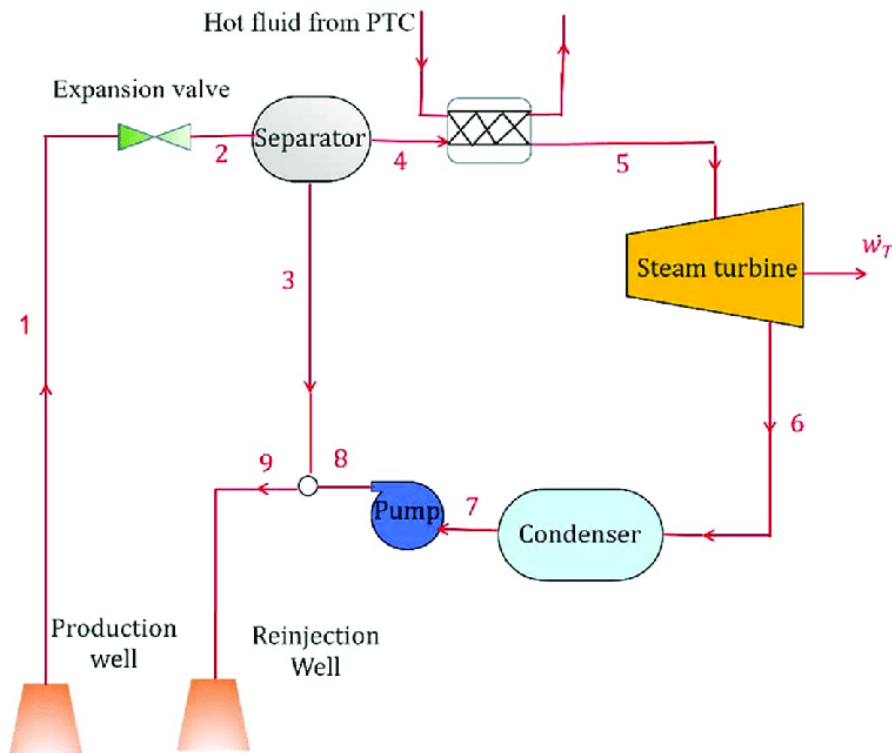


Figure II. 5 : Systèmes Hybride Solaire-Géothermique

II.2.5 Systèmes de Stockage d'Énergie Thermique

Utilisent des matériaux capables de stocker la chaleur pour compenser les fluctuations de la demande énergétique.

II.2.5.1 Stockage de Chaleur Sensible

Stocke la chaleur en augmentant la température d'un matériau (par exemple, réservoirs d'eau).

II.2.5.2 Stockage de Chaleur Latente

Utilise les changements de phase des matériaux (par exemple, fusion/solidification de sels fondus) pour stocker et libérer de la chaleur.

II.3 Thermodynamique d'un système géothermique basé sur un cycle organique de Rankine (ORC cycle)

Les systèmes intégrés géothermiques qui combinent un cycle d'absorption et un cycle Organique de Rankine (ORC) représentent une approche avancée pour maximiser l'utilisation de la chaleur géothermique. Ce type de système permet de produire à la fois de la réfrigération, de la chaleur et de l'électricité, améliorant ainsi l'efficacité globale de l'utilisation de l'énergie géothermique.

II.3.1 Principe de Fonctionnement

Extraction de la Chaleur Géothermique

La chaleur est extraite de réservoirs géothermiques situés à plusieurs centaines de mètres sous la surface terrestre. La température de cette chaleur peut varier entre 80°C et 150°C, voire plus élevée.

Cycle Organique de Rankine (ORC)

La chaleur géothermique est utilisée pour vaporiser un fluide de travail à bas point d'ébullition dans l'évaporateur du cycle ORC.

La vapeur de ce fluide entraîne une turbine qui produit de l'électricité via un générateur.

La vapeur est ensuite condensée dans un condenseur et renvoyée vers l'évaporateur pour recommencer le cycle.

Cycle a absorption

La chaleur résiduelle (ou l'excédent de chaleur) du condenseur ORC est utilisée pour alimenter un cycle de réfrigération par absorption.

Ce cycle utilise une solution absorbante (généralement eau-bromure de lithium, H₂O-LiBr) où la chaleur résiduelle provoque la désorption du réfrigérant (eau) de la solution absorbante.

Le réfrigérant est condensé et évaporé à basse pression pour produire de l'effet frigorifique (réfrigération). Le réfrigérant évaporé est ensuite absorbé par la solution, complétant ainsi le cycle.

II.4 Cycle Organique de Rankine (ORC)

Contrairement au cycle de Rankine à vapeur traditionnel, le cycle organique de Rankine (ORC) utilise un fluide organique de masse moléculaire élevée. Il permet de récupérer la chaleur de sources à basse température telles que les déchets industriels, la chaleur géothermique, les bassins solaires, etc. La chaleur à basse température est convertie en travail utile, qui peut lui-même être converti en électricité.

Le principe de fonctionnement du cycle organique de Rankine est le même que celui du cycle de Rankine : le fluide de travail est pompé vers une chaudière où il est évaporé, passe à travers une turbine et est finalement recondensé.

Dans le cycle idéal, quatre processus peuvent être identifiés :

Le cycle de Rankine est un cycle fermé, à flux constant, chauffé par l'extérieur, dans lequel le fluide de travail change d'état lorsqu'il circule à travers divers équipements. La figure II.5 illustre le schéma d'un cycle de Rankine simple qui reçoit de la chaleur d'un réservoir à haute température (T_H) et rejette de la chaleur dans un réservoir à basse température (T_C).

Le liquide qui quitte le condenseur est comprimé à une pression élevée dans la pompe. Le fluide passe par la chaudière/le surchauffeur, les échangeurs de chaleur où de la chaleur est ajoutée afin de Le fluide est alors évaporé (ébullition), puis chauffé, de sorte qu'il sort sous forme de vapeur surchauffée. La vapeur surchauffée à haute pression est détendue dans une turbine afin de produire de l'énergie. La vapeur est condensée en rejetant de la chaleur dans le condenseur (un autre échangeur de chaleur) de sorte qu'elle entre dans la pompe sous forme de liquide et recommence ce cycle de flux continu.

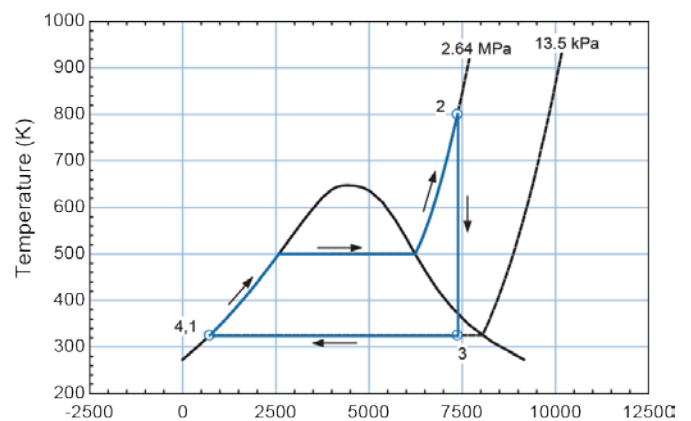
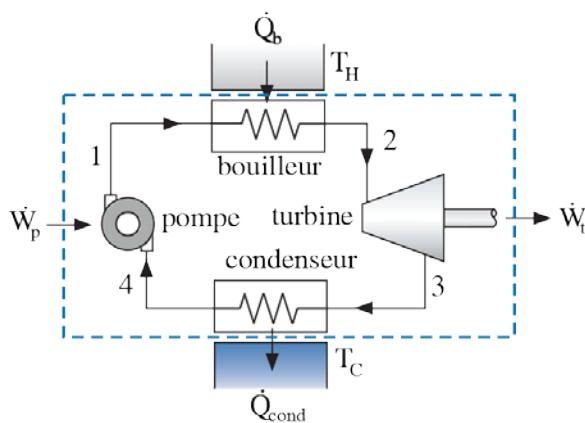


Figure II. 6 :Système et cycle de Rankine

Après avoir déterminé chacun des états du cycle, il est commode d'analyser les composants sur la base d'un débit massique unitaire. Cette méthode est typique de l'analyse des cycles ; les états associés aux interfaces entre les différents équipements peuvent être spécifiés indépendamment de la taille globale du système. Le débit massique peut alors être sélectionné pour obtenir le résultat souhaité.

Un bilan énergétique de la pompe fournit :

$$\dot{m}h_4 + \dot{W}_p = \dot{m}h_1 \quad \text{II.1}$$

Qui peut être réarrangée :

$$\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \quad \text{II.2}$$

Les bilans de la chaudière, la turbine et le condenseur sont comme suit :

$$\frac{\dot{Q}_b}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \quad \text{II.3}$$

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \quad \text{II.4}$$

$$\frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}} = h_3 - h_4 \quad \text{II.5}$$

C'est une bonne idée de vérifier votre travail sur un problème de cycle en effectuant une analyse globale du bilan énergétique du système. Un bilan énergétique global pour un système composé de l'ensemble des composants qui sont indiqués par la ligne pointillée dans la figure II.5.

$$\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} + \frac{\dot{Q}_b}{\dot{m}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} + \frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}} \quad \text{II.6}$$

La puissance nette fournie par le cycle de Rankine est la puissance de la turbine moins celle de la pompe :

$$\dot{W}_{net} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} \quad \text{II.7}$$

Le rapport de travail de retour (back work ration, bwr) est défini comme la puissance consommée par le cycle par rapport à la puissance brute (plutôt que nette) produite par le cycle. Pour un cycle de Rankine, le rapport de travail de retour est le rapport entre la puissance de la pompe et la puissance de la turbine :

$$bwr = \frac{\dot{W}_p}{\dot{W}_t} \quad \text{II.8}$$

L'efficacité de tout cycle d'alimentation est le rapport du travail net fourni par le cycle à l'apport de chaleur dans le cycle. Pour le cycle de Rankine, l'efficacité est :

$$\eta_{Rankine} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_b} \quad \text{II.9}$$

Les performances d'un cycle sont parfois caractérisées par le taux de chaleur. La chaleur le taux est défini comme l'inverse du rendement :

$$\text{Taux de chaleur} = \frac{\dot{Q}_b}{\dot{W}_{net}} \quad \text{II.10}$$

Souvent exprimé en btu/kWh.

L'efficacité du cycle de Rankine est inférieure à l'efficacité du cycle de Carnot :

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad \text{II.11}$$

IV. Conclusion

Les systèmes géothermiques intégrés exploitent de manière innovante et efficace la chaleur naturelle de la Terre pour diverses applications énergétiques, allant de la production d'électricité et de chaleur à la réfrigération. En utilisant des cycles thermodynamiques avancés comme le cycle Organique de Rankine (ORC) et en combinant des technologies telles que le stockage de chaleur sensible et latente, ces systèmes maximisent l'efficacité énergétique et réduisent l'empreinte carbone. Les solutions comme les systèmes de cogénération (CHP) et les configurations hybrides, associées à une gestion optimale de la chaleur résiduelle, offrent des performances élevées tout en contribuant à la durabilité énergétique. Malgré les défis liés aux coûts initiaux et à la gestion des ressources, l'intégration de la géothermie dans les systèmes énergétiques représente un pas significatif vers un avenir plus durable et résilient.

En conclusion, l'optimisation du cycle de Rankine organique (ORC) repose sur une gestion fine des paramètres thermodynamiques et des composants du système, tels que l'expandeur, la pompe et les échangeurs de chaleur. L'efficacité des processus d'expansion et de compression, influencée par les irréversibilités et les pertes thermiques, est cruciale pour maximiser la récupération de travail. L'utilisation d'un régénérateur permet d'améliorer la performance en recyclant la chaleur, tandis que la gestion du point de pincement dans les échangeurs de chaleur contribue à l'équilibre entre efficacité thermique et coûts d'installation.

L'ensemble de ces éléments montre qu'une conception bien pensée du cycle, prenant en compte les particularités des fluides de travail et des machines utilisées (pompe volumétrique, expandeur), permet d'améliorer la performance énergétique tout en réduisant les pertes.

L'intégration de ces optimisations, en particulier à travers le contrôle des températures et des pressions, permet d'atteindre un rendement énergétique maximal dans les applications ORC, notamment pour la production d'énergie à partir de sources de chaleur de basse température.

Chapitre III Etude d'une installation thermique étagée basée sur le cycle organique de Rankine

III.1 Introduction

L'énergie géothermique est une source d'énergie abondante, renouvelable et durable, caractérisée par son faible impact environnemental et sa capacité à fournir une production d'électricité de base. Contrairement à l'énergie solaire ou éolienne, l'énergie géothermique ne dépend pas des conditions météorologiques, ce qui en fait une alternative fiable pour répondre à la demande énergétique. L'un des moyens les plus efficaces d'exploiter l'énergie géothermique est le cycle organique de Rankine (ORC), qui est particulièrement adapté à la conversion des ressources géothermiques à basse et moyenne température en électricité.

Le cycle organique de Rankine est un processus thermodynamique qui convertit l'énergie thermique en travail mécanique, puis en électricité. Contrairement aux cycles de Rankine traditionnels qui utilisent l'eau comme fluide de travail, les systèmes ORC utilisent des fluides organiques, qui ont des propriétés thermodynamiques favorables à des températures plus basses.

Dans les systèmes ORC à plusieurs étages, plusieurs étages sont utilisés pour optimiser le processus thermodynamique et augmenter l'efficacité globale. En utilisant une série de turbines fonctionnant à différents niveaux de pression, le système ORC à plusieurs étages maximise l'extraction d'énergie thermique du fluide géothermique. Cette approche minimise les pertes d'énergie et améliore la puissance de sortie de l'usine.

La sélection d'un fluide de travail approprié est cruciale pour l'efficacité et la viabilité économique d'un système ORC. Différents fluides de travail présentent des propriétés thermodynamiques variables, telles que le point d'ébullition, la chaleur spécifique et la conductivité thermique, qui influencent les performances du système. Les fluides de travail couramment utilisés dans les systèmes ORC comprennent les hydrocarbures (par exemple, le pentane, le butane), les réfrigérants (par exemple, le R134a, le R245fa) et les siloxanes. Le choix du fluide dépend de facteurs tels que l'impact environnemental, la sécurité, la stabilité thermique et la compatibilité avec les composants du système. Cette étude examine l'utilisation de divers fluides de travail dans les systèmes ORC à plusieurs étages afin d'identifier le fluide optimal pour des conditions géothermiques spécifiques.

La faisabilité économique d'une centrale géothermique dépend non seulement de ses performances techniques, mais aussi de ses paramètres financiers. Les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et de maintenance et la durée de vie prévue de la centrale sont des facteurs critiques qui influencent le coût global de la production d'électricité. Une analyse économique sera menée pour évaluer les coûts d'investissement, l'efficacité opérationnelle et la rentabilité de différents fluides de travail et configurations de système.

III.2 Description du système

Dans un système géothermique, l'eau est pompée dans le sol (à plusieurs kilomètres de profondeur) où elle est chauffée par l'énergie géothermique, puis renvoyée à la surface pour fournir de l'énergie à une centrale électrique. Ce problème examine l'utilisation de l'énergie géothermique pour la production d'électricité avec le cycle de Rankine illustré. Le cycle utilise à la fois le réchauffage et la régénération avec deux réchauffeurs d'eau d'alimentation ouverts.

Le cycle de Rankine utilise le toluène comme fluide de travail en raison de la basse température de la source géothermique. La pression de la chaudière est P_b . L'eau du puits géothermique est à T_g . L'usine rejette la chaleur vers un réservoir de température à T_C . Le fluide est extrait à l'état 3 de la turbine 1 à P_1 et une fraction du débit f_1 est envoyée au mélangeur 2. Le fluide est ensuite extrait à l'état 4 de la turbine 2 kPa et réchauffé.

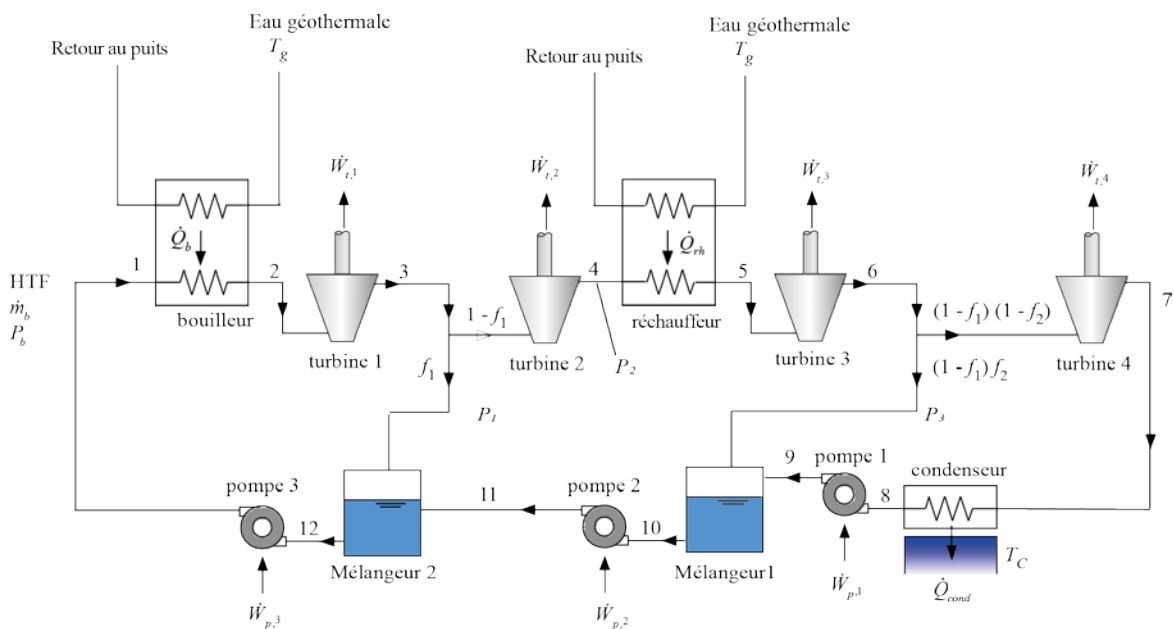


Figure III. 1: Cycle Organique de Rankine multi-étagé alimenté par une source géothermique

Le fluide est finalement extrait à l'état 6 de la turbine 3 à P_3 et la fraction du débit f_2 est envoyée au mélangeur 1. Le reste du débit passe par la turbine 4 vers le condenseur. Les rendements des quatre turbines sont η_{t1} , η_{t2} , η_{t3} et η_{t4} . Le débit quittant le condenseur est pompé vers P_3 avec la pompe 1 ayant un rendement η_{p1} . Le liquide saturé est extrait du mélangeur 1 et pompé jusqu'à la première pression d'extraction, P_1 , avec la pompe 2 ayant un rendement η_{p2} . Le liquide saturé est extrait de l'échangeur à contact direct 2 et pompé jusqu'à la pression de la chaudière avec la pompe 3 ayant un rendement η_{p3} . Les différences de température d'approche associées à la chaudière et au réchauffeur sont respectivement T_b et T_r . Les points de pincement pour ces deux échangeurs de chaleur se produisent à leur extrémité chaude. Par conséquent, l'eau quitte le bouilleur à $T_2 = T_g - \Delta T_b$ et quitte le réchauffeur à $T_5 = T_g - \Delta T_r$. La différence de température d'approche associée au condenseur est ΔT_{cond} .

L'idée consiste à :

- élaborer deux modèles d'analyse. Un modèle doit être capable d'analyser n'importe laquelle des quatre turbines du système et l'autre doit être applicable à n'importe laquelle des trois pompes du système.
- déterminer chacun des états associés au cycle, renseigner un tableau qui comprend l'entropie, l'enthalpie, la température et la pression pour chaque état et représenter les états sur un diagramme T-s pour le fluide transfert de chaleur, HTF.
- déterminer l'efficacité du cycle.
- la puissance de la source géothermique est \dot{Q}_g . (Il s'agit de la somme du transfert de chaleur vers la chaudière et le réchauffeur.).
- déterminer le débit massique du HTF traversant la chaudière et la puissance nette produite par cette centrale électrique
- déterminer la valeur de l'électricité produite par la centrale sur une période de temps en appliquant les prix en vigueur.
- déterminer l'efficacité de la chaudière et du condenseur.
- mener une étude économique

III.3 Modélisation thermodynamique

Il y a quatre turbines et trois pompes dans le système. Afin de faciliter l'analyse du cycle, les calculs de turbine et de pompe sont placés dans une procédure qui peut être appelée depuis la section principale du programme EES.

La procédure Turbine est placée en haut de la fenêtre d'équations et effectue une analyse générique de turbine qui peut être appliquée à n'importe laquelle des quatre turbines du système. La procédure prend comme entrées l'enthalpie et la pression d'entrée (h_{in} et P_{in}), la pression de sortie (P_{out}), le nom du fluide (dans la chaîne F\$) et le rendement de la turbine (η_t). Les sorties renvoyées par la procédure incluent l'enthalpie de sortie (h_{out}), la température (T_{out}) et l'entropie (s_{out})

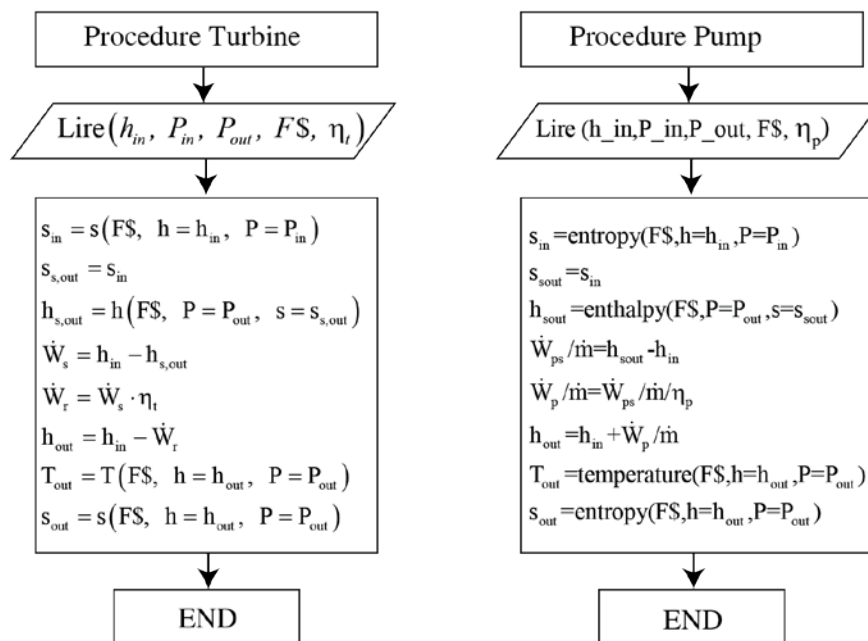


Figure III. 2: Procédures Turbine et Pompe

Il faut ensuite déterminer les paramètres de chacun des états associés au cycle, en l'occurrence l'entropie, l'enthalpie, la température et la pression pour chaque état.

L'analyse du cycle procède en spécifiant autant d'états que possible compte tenu des conditions d'entrée. L'état du fluide en sortie de chaudière, état 2, est précisé par la pression, $P_2 = P_b$, et la température :

$$T_2 = T_g - \Delta T_b \quad \text{III.1}$$

L'état du fluide en sortie du réchauffeur, état 5, est précisé par la pression, $P_5 = P_2$, et la température :

$$T_5 = T_g - \Delta T_r \quad \text{III.2}$$

L'état du fluide a la sortie du condenseur, état 8, est précisé par le titre, $x_8 = 0$, et la température :

$$T_8 = T_C - \Delta T_{cond} \quad \text{III.3}$$

La pression, l'enthalpie et l'entropie (P_8 , h_8 et s_8) sont déterminées.

L'état du fluide sortant du mélangeur 1, état 10, est spécifié par le titre, $x_{10} = 0$, et la pression, $P_{10} = P_3$. La température, l'enthalpie et l'entropie (T_{10} , h_{10} et s_{10}) sont déterminés.

L'état du fluide extrait sortant de la chaudière 1, état 12, est spécifié par la qualité, $x_{12} = 0$, et la pression, $P_{12} = P_1$. La température, l'enthalpie et l'entropie (T_{12} , h_{12} et s_{12}) sont déterminées.

L'analyse se déroule en travaillant sur chacune des quatre turbines en utilisant la procédure Turbine. La pression de sortie de la turbine 1 est donnée, $P_3 = P_1$. L'enthalpie de sortie, la température et l'entropie de la turbine 1 (h_3 , T_3 et s_3) sont obtenues.

La pression de sortie de la turbine 2 est donnée, $P_4 = P_2$. L'enthalpie de sortie, la température et l'entropie de la turbine 2 (h_4 , T_4 et s_4) sont obtenues.

La pression de sortie de la turbine 3 est donnée, $P_6 = P_3$. L'enthalpie de sortie, la température et l'entropie de la turbine 3 (h_6 , T_6 et s_6) sont obtenues.

La pression de sortie de la turbine 4 est égale à la pression du condenseur, $P_7 = P_8$. L'enthalpie de sortie, la température et l'entropie de la turbine 4 (h_7 , T_7 et s_7) sont obtenues.

L'analyse se poursuit en travaillant sur chacune des trois pompes à l'aide de la procédure Pump. La pression de sortie de la pompe 1 est donnée, $P_9 = P_3$. L'enthalpie de sortie, la température et l'entropie de la pompe 1 (h_9 , T_9 et s_9) sont obtenues.

La pression de sortie de la pompe 2 est donnée, $P_{11} = P_1$. L'enthalpie de sortie, la température et l'entropie de la pompe 2 (h_{11} , T_{11} et s_{11}) sont obtenues.

La pression de sortie de la pompe 3 est donnée, $P_1 = P_b$. L'enthalpie de sortie, la température et l'entropie de la pompe 3 (h_1 , T_1 et s_1) sont obtenues.

La deuxième fraction d'extraction, f_2 , peut être déterminée à partir d'un bilan énergétique de la chaudière 1 :

$$(1 - f_1) f_2 \dot{m}_b h_6 + (1 - f_1)(1 - f_2) \dot{m}_b h_9 = (1 - f_1) \dot{m}_b h_{10} \quad \text{III.4}$$

où \dot{m}_b est le débit massique traversant la chaudière (le débit massique maximum dans le cycle).

L'équation III.4 peut être simplifiée en divisant par le facteur commun $(1 - f_1) \dot{m}_b$:

$$f_2 h_6 + (1 - f_2) h_9 = h_{10} \quad \text{III.5}$$

La première fraction d'extraction, f_1 , peut être déterminée à partir d'un bilan énergétique de la chaudière 2 :

$$f_1 \dot{m}_b h_3 + (1 - f_1) \dot{m}_b h_{11} = \dot{m}_b h_{12} \quad \text{III.6}$$

L'équation peut être simplifiée en divisant par le facteur commun \dot{m}_b :

$$f_1 h_3 + (1 - f_1) h_{11} = h_{12} \quad \text{III.7}$$

III.3.1 Efficacité du cycle et revenu de l'exploitation

Un bilan énergétique côté eau de la chaudière conduit à :

$$\dot{m}_b h_1 + \dot{Q}_b = \dot{m}_b h_2 \quad \text{III.8}$$

ou

$$\frac{\dot{Q}_b}{\dot{m}_b} = h_2 - h_1 \quad \text{III.9}$$

Un bilan de la turbine 1 donne :

$$\frac{\dot{W}_{t1}}{\dot{m}_b} = h_2 - h_3 \quad \text{III.10}$$

De même pour la turbine 2 :

$$(1 - f_1) \dot{m}_b h_3 = \dot{W}_{t2} + (1 - f_1) \dot{m}_b h_4 \quad \text{III.11}$$

ou

$$\frac{\dot{W}_{t2}}{\dot{m}_b} = (1 - f_1)(h_3 - h_4) \quad \text{III.12}$$

Un bilan énergétique côté eau du réchauffeur conduit à :

$$\frac{\dot{Q}_r}{\dot{m}_b} = (1 - f_1)(h_5 - h_4) \quad \text{III.13}$$

Pour la turbine 3 :

$$\frac{\dot{W}_{t3}}{\dot{m}_b} = (1 - f_1)(h_5 - h_6) \quad \text{III.14}$$

Pour la turbine 4 :

$$\frac{\dot{W}_{t4}}{\dot{m}_b} = (1 - f_1)(1 - f_2)(h_6 - h_7) \quad \text{III.15}$$

Le bilan du condenseur mène à :

$$\frac{\dot{Q}_{cond}}{\dot{m}_b} = (1 - f_1)(1 - f_2)(h_7 - h_8) \quad \text{III.16}$$

Les travaux consommés par les trois pompes sont comme suit :

$$\frac{\dot{W}_{P1}}{\dot{m}_b} = (1 - f_1)(1 - f_2)(h_9 - h_8) \quad \text{III.17}$$

$$\frac{\dot{W}_{P2}}{\dot{m}_b} = (1 - f_1)(h_{11} - h_{10}) \quad \text{III.18}$$

$$\frac{\dot{W}_{P3}}{\dot{m}_b} = f_1(h_1 - h_{12}) \quad \text{III.19}$$

Ainsi, le rendement du cycle peut être évalué par :

$$\eta = \frac{\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_b}}{\frac{\dot{Q}_b}{\dot{m}_b} + \frac{\dot{Q}_r}{\dot{m}_b}} \quad \text{III.20}$$

ou :

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_b} = \frac{\dot{W}_{t1}}{\dot{m}_b} + \frac{\dot{W}_{t2}}{\dot{m}_b} + \frac{\dot{W}_{t3}}{\dot{m}_b} + \frac{\dot{W}_{t4}}{\dot{m}_b} - \frac{\dot{W}_{P1}}{\dot{m}_b} - \frac{\dot{W}_{P2}}{\dot{m}_b} - \frac{\dot{W}_{P3}}{\dot{m}_b} \quad \text{III.21}$$

III.3.2 Taille et coût du bouilleur et du condenseur

Les surfaces nécessaires à la chaudière (bouilleur et réchauffeur) et au condenseur est directement liée à leurs efficacités. La corrélation empirique suivante pour la surface A en fonction de l'efficacité ε de l'échangeur et du débit massique du HTF est utilisée [23].

$$A = K_{ec} \dot{m} \left[-\ln(1 - \varepsilon) \right] \quad \text{III.23}$$

K_{ec} est une constante représentative du bouilleur ou du condenseur exprimé en unité de surface par unité de débit [$\text{m}^2 / (\text{kg/s})$]. Une valeur de $K_{ec} = 170 \text{ m}^2 / (\text{kg/s})$ a été adoptée dans les calculs [23].

Le prix de ces échangeurs de chaleur varie linéairement avec la surface :

$$\text{Coût} = C_{ec} A \quad \text{III.24}$$

C_{ec} est un coefficient de prix du bouilleur ou du condenseur, une valeur de $C_{ec} = 50 \text{ \$/m}^2$ a été adoptée.

En appliquant ces équations au bouilleur et au condenseur :

$$A_b = K_{ec} \dot{m}_b \left[-\ln(1 - \varepsilon_b) \right] \quad \text{III.25}$$

$$\text{Coût}_b = C_{ec} A_b \quad \text{III.26}$$

$$A_{cond} = K_{ec} (1 - f_1)(1 - f_2) \dot{m}_b \left[-\ln(1 - \varepsilon_{cond}) \right] \quad \text{III.27}$$

$$\text{Coût}_{cond} = C_{ec} A_{cond} \quad \text{III.28}$$

Sachant que les efficacités du bouilleur et du condenseur sont déterminées par :

$$\varepsilon_b = \frac{\dot{Q}_b}{\dot{Q}_{b_{max}}} \quad \text{III.29}$$

$$\varepsilon_{cond} = \frac{\dot{Q}_{cond}}{\dot{Q}_{cond_{max}}} \quad \text{III.30}$$

Tels que $\dot{Q}_{b_{max}}$ et $\dot{Q}_{cond_{max}}$ représentent le taux maximal de transfert de chaleur au niveau du bouilleur et du condenseur en prenant respectivement $T_{2max} = T_g$ et $T_{8min} = T_c$.

$$\dot{Q}_{b_{max}} = \dot{m}_b (h_{2max} - h_1) \quad \text{III.31}$$

$$\dot{Q}_{condmax} = \dot{m}_b (1 - f_1)(1 - f_2)(h_7 - h_{8min}) \quad \text{III.32}$$

III.3.3 Revenu et gain

Pour un fonctionnement stationnaire pendant une durée de 20 ans, les recettes réalisées à partir d'un Cycle Organique de Rankine ou le revenu est déterminé par :

$$Revenu = Coût_e \times \dot{W}_{net} \times temps \quad \text{III.33}$$

Où $Coût_e$ représente le prix du kWh en vigueur. Une valeur de 0.0465 \$/kWh reflétant le prix unitaire de l'électricité en Algérie. En Europe, ce prix varie entre va de 0.15 \$/kWh au Portugal jusqu'à 0.546 \$/kWh en Allemagne.

Le profit ou le gain réalisé peut être défini par :

$$Gain = Revenu - Dépense \quad \text{III.34}$$

La dépense concerne le prix du bouilleur, $Coût_b$, du condenseur, $Coût_{cond}$ et les frais de maintenance et de fonctionnement $Coût_{m+f}$ qui peuvent être estimés.

$$Dépense = Coût_b + Coût_{cond} + Coût_{m+f} \quad \text{III.35}$$

III.4 Fluides de transfert de chaleur

Le choix d'un fluide de transfert de chaleur pour un cycle organique de Rankine dépend des conditions spécifiques de fonctionnement du cycle, des propriétés souhaitées, ainsi que des considérations de sécurité et environnementales. Il est souvent nécessaire de réaliser une analyse approfondie et des simulations pour sélectionner le fluide le plus adapté à chaque application particulière.

Le choix d'un fluide de travail est un élément fondamental du processus d'analyse du cycle, car le fluide de travail approprié peut entraîner une augmentation de la productivité et fournir des résultats précieux. Au contraire, si le fluide de travail approprié pour le système approprié n'est pas choisi, cela entraînerait des impacts dévastateurs, notamment environnementaux et économiques.

L'étude menée est basée sur un choix délibéré de certains fluides de transfert de chaleur en dépit de ce certaines qualités médiocres vis-à-vis de la sécurité et de l'environnement. Les

fluides concernés par cette étude sont respectivement le benzène, le cyclohexane, le cyclopentane et le n-heptane tous inclus dans la base de données du EES.

Les fluides tels que le benzène, le cyclohexane, le cyclopentane et le n-heptane peuvent être utilisés dans les cycles organiques de Rankine (ORC). Chaque fluide présente des caractéristiques distinctes qui influencent son adéquation pour des applications spécifiques. Voici une analyse de chacun dans le contexte des cycles ORC, tableau III.1.

Tableau III. 1 Propriétés des fluides de transfert de chaleur [24]

HTF	Température de Fonctionnement	Propriétés Thermodynamiques	Compatibilité Matérielle	Impact Environnemental
Benzène	Température d'ébullition de 80.1°C à pression atmosphérique,	Chaleur latente élevée, ce qui peut être bénéfique pour l'efficacité du cycle.	Corrosif vis-à-vis de certains matériaux. Toxique et cancérigène	Nocif pour la santé humaine et l'environnement,
Cyclohexane	Température d'ébullition de 80.7°C à pression atmosphérique,	Chaleur latente élevée, ce qui peut être bénéfique pour l'efficacité du cycle.	Plus sûr que le benzène mais il est toujours important de vérifier la corrosion	Moins toxique que le benzène, mais il peut encore avoir un impact environnemental.
Cyclopentane	Température d'ébullition de 49.2°C	Chaleur latente d'évaporation modérée et une bonne capacité de transfert de chaleur à basse température.	Moins corrosif que le benzène, mais inflammable	PRP faible, ce qui en fait un choix plus écologique par rapport à certains autres fluides organiques.
n-Heptane	Température d'ébullition de 98.4°C, ce qui est compatible avec les cycles ORC fonctionnant à des températures moyennes à élevées.	Chaleur latente d'évaporation relativement élevée, et son efficacité thermique est généralement bonne.	Moins corrosif que le benzène et présente moins de problèmes de toxicité, mais il est hautement inflammable.	Hydrocarbure, donc ses émissions doivent être gérées pour minimiser les impacts environnementaux. Son PRP est plus élevé que celui de certains autres fluides, ce qui doit être pris en compte.

- **Benzène** : Bien que ses propriétés thermodynamiques puissent être avantageuses, les problèmes de toxicité et de sécurité limitent son utilisation.

- **Cyclohexane** : Bon pour des applications à basse température avec des propriétés thermodynamiques acceptables, mais il faut gérer les aspects de sécurité.
- **Cyclopentane** : Adapté pour des températures basses avec un faible impact environnemental, mais inflammable.
- **n-Heptane** : Bon pour des températures moyennes à élevées, avec une bonne performance thermique, mais inflammable et avec un impact environnemental à considérer.

III.5 Résultats et discussion

Le modèle exposé dans la section III.3 est transcrit sous environnement EES. Les données thermophysiques des quatre fluides sont contenues dans la base de données du logiciel.

III.5.1 Conditions d'opération

Les conditions de fonctionnement identiques pour tous les fluides considérés ont résumées sur le tableau, Tableau III.2.

Tableau III. 2 : Propriétés des fluides de transfert de chaleur

Pression du bouilleur, P_b		280 kPa
Température de la source, T_b		200 °C
Température de condensation, T_c		30°C
Pressions de soutirage [kPa]		150, 80, 40
Température d'approche	Bouilleur	15 °C
	Réchauffeur	10 °C
	Condenseur	5 °C
Rendements	Turbine1	0.85
	Turbine2	0.86
	Turbine3	0.88
	Turbine4	0.89
	Pompe1	0.65
	Pompe2	0.67
	Pompe3	0.69

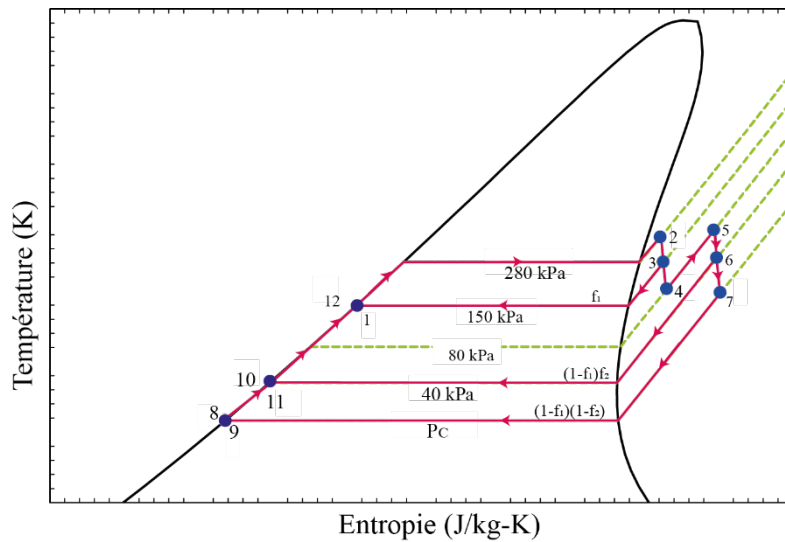


Figure III. 3 : Cycle thermodynamique

III.5.2 Performances du cycle

III.5.2.1 Cycle thermodynamique

Les paramètres thermodynamiques du cycle représentatif, figure III.3 sont déterminés en chaque point.

a. Benzène

Les propriétés thermodynamiques aux points cardinaux sont résumées sur les tableaux, III.3 alors que les performances sont récapitulées dans le tableau III.4

Tableau III. 3 : Paramètres thermodynamiques du cycle (Benzène)

Point	Enthalpie [J/kg]	Pression [Pa]	Entropie [J/(kg K)]	Température [K]	Qualité [-]
1	25917	280000	71,4	366,6	
2	545651	280000	1385	458,2	
3	521121	150000	1395	441,4	
4	496736	80000	1404	424,9	
5	558630	80000	1543	463,2	
6	529474	40000	1552	444,9	
7	500637	19786	1561	426,4	
8	-82609	19786	-249,7	308,2	0
9	-82576	40000	-249,7	308,2	

10	-51032	40000	-150,1	325,8	0
11	-50837	150000	-149,9	325,9	
12	25681	150000	71,2	366,5	0

Tableau III. 4 : Performances du cycle (Benzène)

Paramètre	Valeur
Rendement du cycle	$\eta = 0.1642$
Débit	$\dot{m}_b = 3.488 \text{ kg} / \text{s}$
Puissance nette	$\dot{W}_{net} = 325485 \text{ W}$
Coût et efficacité bouilleur	$Coût_b = 90606 \$, Eff_b = 0.9529$
Coût et efficacité condenseur	$Coût_{cond} = 102577 \$, Eff_{cond} = 0.9852$
Revenu	$1.338 \cdot 10^6 \$$
Profit	$644869 \$$

b. Cyclohexane

Les propriétés thermodynamiques aux points cardinaux sont résumées sur les tableaux, III.5 alors que les performances sont récapitulées dans le tableau III.6

Tableau III. 5 : Tableau III. 5 Paramètres thermodynamiques du cycle (Cyclohexane)

Point	Enthalpie [J/kg]	Pression [Pa]	Entropie [J/(kg K)]	Température [K]	Qualité [-]
1	29805	280000	81,93	367,6	
2	543519	280000	1371	458,2	
3	520700	150000	1380	445,6	
4	497750	80000	1389	433,2	
5	558695	80000	1525	463,2	
6	531496	40000	1533	449,6	
7	504858	20085	1541	436	
8	-92224	20085	-278,4	308,2	0
9	-92187	40000	-278,3	308,2	
10	-57798	40000	-169,8	325,8	0
11	-57578	150000	-169,6	325,9	
12	29538	150000	81,71	367,5	0

Tableau III. 6 : Performances du cycle (Cyclohexane)

Paramètre	Valeur
Rendement du cycle	$\eta = 0.1526$
Débit	$\dot{m}_b = 3.537 \text{ kg} / \text{s}$
Puissance nette	$\dot{W}_{net} = 305254 \text{ W}$
Coût et efficacité bouilleur	$Coût_b = 85185 \$, Eff_b = 0.9412$
Coût et efficacité condenseur	$Coût_{cond} = 100345 \$, Eff_{cond} = 0.9844$
Revenu	$1.243 \cdot 10^6 \$$
Profit	$557891 \$$

c. Cyclopentane

Les propriétés thermodynamiques aux points cardinaux sont résumées sur les tableaux, III.7 alors que les performances sont récapitulées dans le tableau III.8

Tableau III. 7 : Paramètres thermodynamiques du cycle (Cyclopentane)

Point	Enthalpie [J/kg]	Pression [Pa]	Entropie [J/(kg K)]	Température [K]	Qualité [-]
1	25118	280000	75,64	335,1	
2	610842	280000	1658	458,2	
3	583294	150000	1669	442,6	
4	555908	80000	1679	427,1	
5	624632	80000	1834	463,2	
6	592057	40000	1844	446	
7	612719	61836	1838	456,9	
8	-26591	61836	-84,14	308,2	0
9	-28065	40000	-87,6	296,7	
10	-47527	40000	-153,2	296,7	0
11	-47306	150000	-152,9	297,1	
12	24850	150000	75,39	334,9	0

Tableau III. 8 : Performances du cycle (Cyclopentane)

Paramètre	Valeur
Rendement du cycle	$\eta = 0.09691$

Débit	$\dot{m}_b = 3.096 \text{ kg / s}$
Puissance nette	$\dot{W}_{net} = 193816 \text{ W}$
Coût et efficacité bouilleur	$Coût_b = 79230 \$, Eff_b = 0.9509$
Coût et efficacité condenseur	$Coût_{cond} = 102108 \$, Eff_{cond} = 0.9858$
Revenu	789490 \$
Profit	108151 \$

d. N-heptane

Les propriétés thermodynamiques aux points cardinaux sont résumées sur les tableaux, III.9 alors que les performances sont récapitulées dans le tableau III.10

Tableau III. 9 : Paramètres thermodynamiques du cycle (n-heptane)

Point	Enthalpie [J/kg]	Pression [Pa]	Entropie [J/(kg K)]	Température [K]	Qualité [-]
1	212054	280000	620,8	385,6	
2	676698	280000	1743	458,2	
3	657830	150000	1751	448,2	
4	638559	80000	1758	438,8	
5	695500	80000	1884	463,2	
6	672664	40000	1891	452,9	
7	627177	9834	1904	432,6	
8	22513	9834	74,71	308,2	0
9	22579	40000	74,78	308,2	
10	103979	40000	325	342,8	0
11	104235	150000	325,2	342,9	
12	211741	150000	620,5	385,5	0

Tableau III. 10 : Performances du cycle (n-heptane)

Paramètre	Valeur
Rendement du cycle	$\eta = 0.1651$
Débit	$\dot{m}_b = 3.918 \text{ kg / s}$

Puissance nette	$\dot{W}_{net} = 330231 W$
Coût et efficacité bouilleur	$Coût_b = 87169 \$, Eff_b = 0.927$
Coût et efficacité condenseur	$Coût_{cond} = 93753 \$, Eff_{cond} = 0.9816$
Revenu	$1.345 \cdot 10^6 \$$
Profit	644241 \$

Les tableaux III.3-III.10 résument les propriétés thermodynamiques d'une part et les performances d'autre part. On remarque que parmi les quatre fluides étudiés, le cyclopentane présente le rendement le plus médiocre avec les indicateurs financiers les plus bas. Le benzène et le n-heptane produisent les meilleurs rendements avec une préférence du n-heptane qui ne présente pas d'effets corrosifs importants en comparaison avec son rival.

III.5.3 Etude paramétrique

D'après les résultats obtenus du cycle pour un régime stationnaire, le benzène et le n-heptane présentent les meilleures performances. Le benzène par contre est corrosif et pose des problèmes d'environnement et de santé. Le n-heptane d'autre part est un hydrocarbure qui est inflammable certes mais est moins dangereux vis-à-vis de la santé.

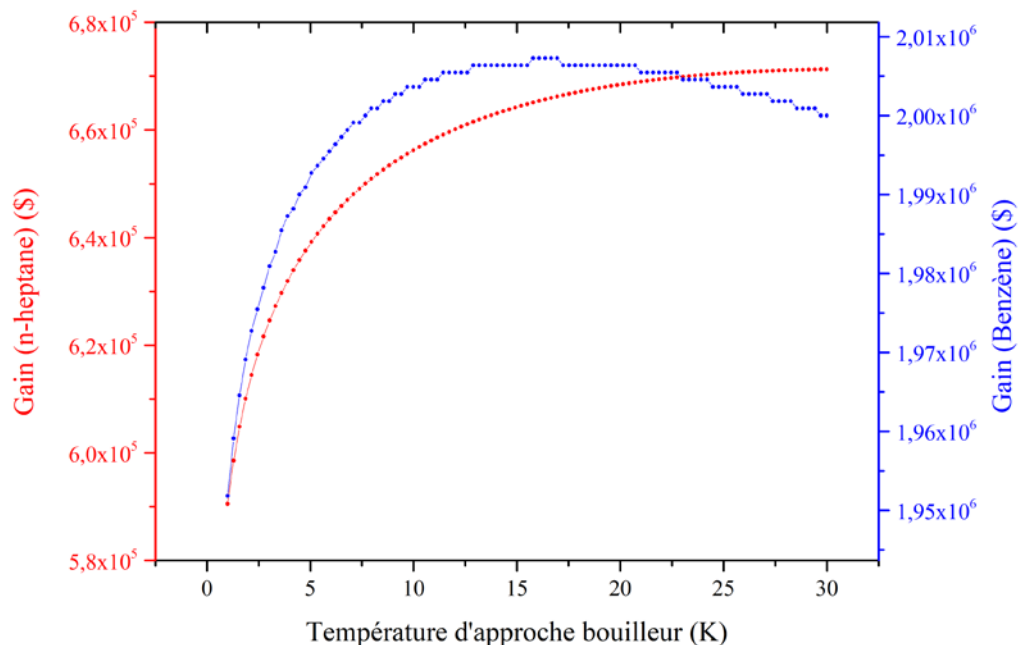


Figure III. 4 : Coût du bouilleur et profit vs température ΔT_b

La figure III.4 illustre le gain réalisé pendant une période de 10 ans de fonctionnement. Il est clair que le profit réalisé à partir du benzène est à pied d'égalité avec celui du n-heptane. Mais l'utilisation du benzène peut s'avérer problématique et coûteuse du point de vue maintenance et fonctionnement de façon à augmenter drastiquement la facture de maintenance et de fonctionnement sans parler de ces retombées sur la santé et la sécurité.

III.5.3.2 Influence de la température d'approche du bouilleur

L'étude paramétrique concerne la sensibilité des performances vis-à-vis de la température d'approche du bouilleur.

Les résultats suivants concernent le n-heptane et la discussion des résultats ci-après est aussi valable pour tous les autres fluides. Pour une variation de la température d'approche du bouilleur ΔT_b entre 1 °C et 30 °C, la variation du coût du bouilleur et son efficacité, du revenu et du gain sont étudiés.

La figure III.5 présente la sensibilité du coût du bouilleur et du profit vis-à-vis de la température d'approche du bouilleur. On remarque que le prix d'un bouilleur assurant une température d'approche au voisinage de celle de la source géothermique est important ce qui influe sur le profit. Le coût du bouilleur diminue avec la température d'approche alors que le profit augmente jusqu'à la température de 15 °C à partir de laquelle il se stabilise. Un profit maximal est réalisé autour d'une température d'approche de 20 °C.

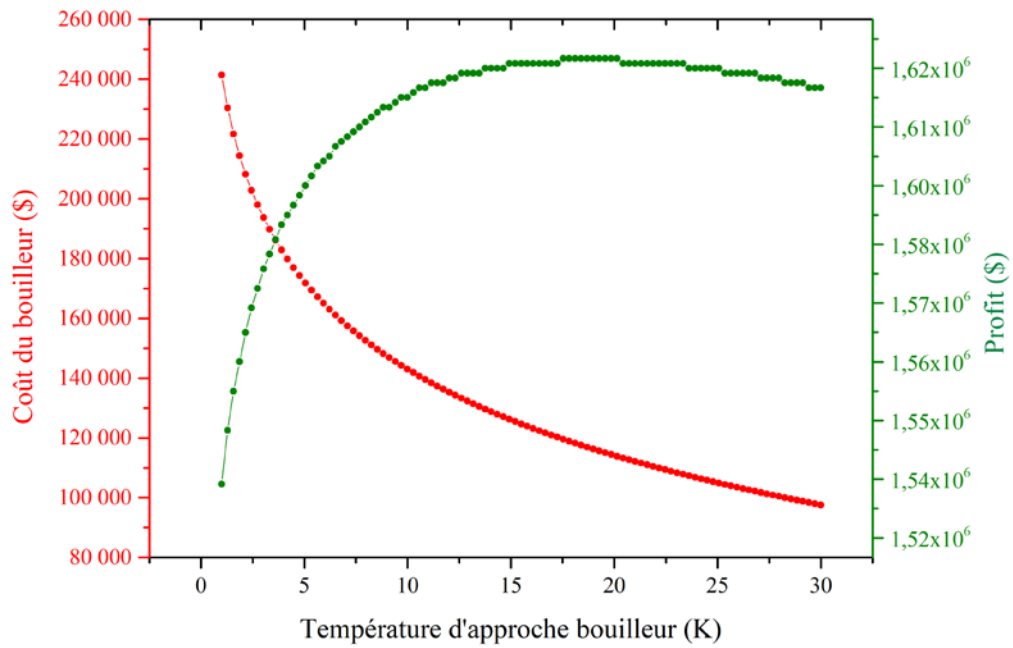


Figure III. 5 : Coût du bouilleur et profit vs température ΔT_b

La figure III.6 montre l'influence de l'efficacité du bouilleur sur le coût et le profit. Le coût varie de façon quasi parabolique avec une faible pente et puis s'accélère lorsque l'efficacité dépasse 0.97 coïncidant avec une chute accentuée du profit. Celui-ci est quasiment stable entre les efficacités 0.88 et 0.96.

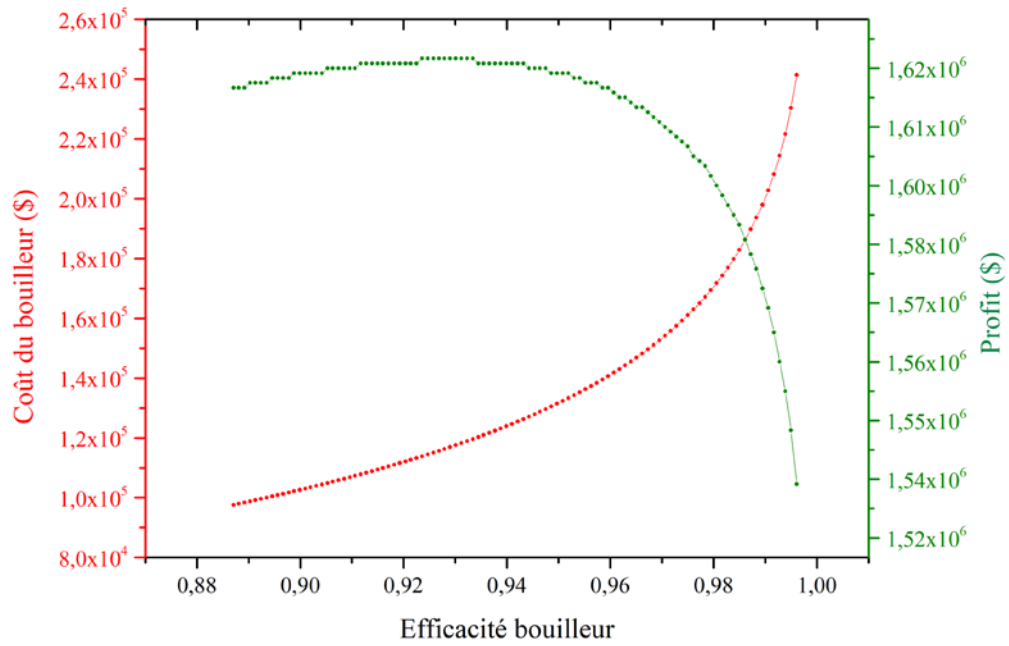


Figure III. 6 :Sensibilité du coût du bouilleur et du profit à l'efficacité du bouilleur

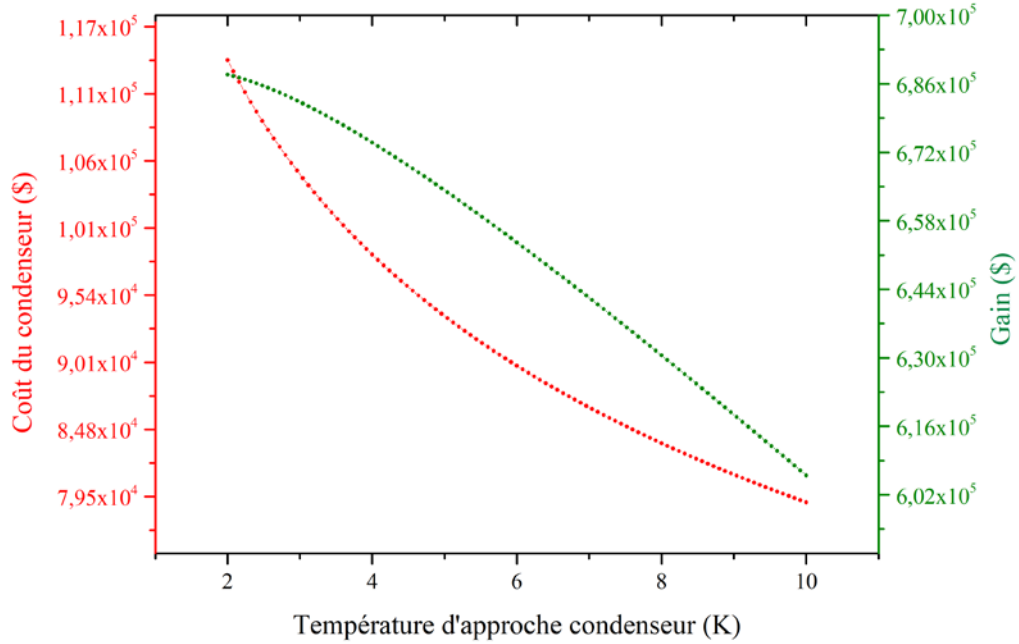


Figure III. 7 : Sensibilité du coût du condenseur et du gain à la température d'approche du condenseur

III.5.3.3 Influence de la température d'approche du condenseur

De même l'étude paramétrique concerne la sensibilité des performances vis-à-vis de la température d'approche du condenseur. En faisant varier cette température de 2 °C à 10 °C, la figure III.7 illustre la variation du gain et du coût du condenseur en fonction de la température d'approche du condenseur.

A la différence du bouilleur, le coût du condenseur et le gain réalisés sur une période de 10 ans diminuent avec l'augmentation de la température d'approche. Cela découle du fait que la réversibilité du processus diminue avec la différence de température entre la source froide et l'agent de transfert de chaleur.

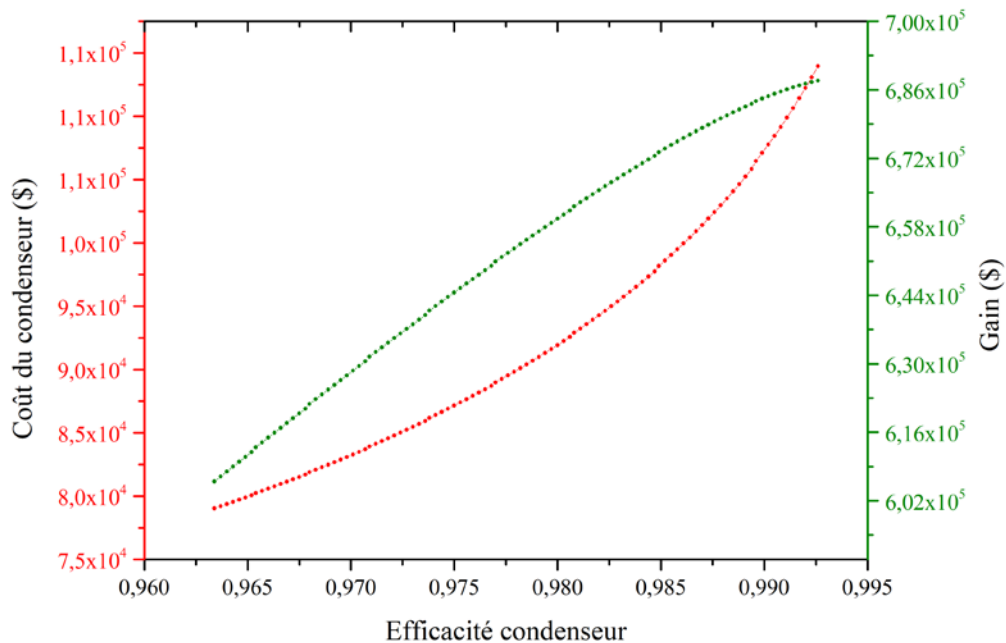


Figure III. 8: Sensibilité du coût du condenseur et du gain à l'efficacité du condenseur

La figure III.8 montre une relation proportionnelle entre le coût du condenseur et le gain réalisé en fonction de l'efficacité du condenseur qui varie entre 0,962 et 0,995. Cette augmentation progressive de l'efficacité entraîne une hausse simultanée du coût du condenseur, passant de 80 000 \$ à 110 000 \$, ainsi qu'une amélioration du gain, qui s'élève de 602 000 \$ à 686 000 \$.

Cette relation est prévisible dans les systèmes thermodynamiques, où une amélioration de l'efficacité conduit généralement à une réduction des pertes thermiques et à une meilleure

récupération de l'énergie. Cependant, l'augmentation du coût, bien que notable, est compensée par la hausse du gain, suggérant que les investissements dans une efficacité accrue sont rentables sur le long terme. Cela met en évidence un point d'équilibre critique, où l'optimisation des performances du condenseur devient économiquement avantageuse malgré le coût supplémentaire.

Il serait cependant judicieux de mener une analyse plus poussée pour déterminer si des alternatives moins coûteuses pourraient offrir un compromis acceptable en termes de performance et de rentabilité.

.III.6 Conclusions

L'étude thermodynamique a permis de comparer plusieurs fluides de transfert de chaleur éligibles à une utilisation à une température moyenne autour de 200 °C. Une modélisation thermodynamique d'un cycle organique e Rankine a été effectuée et transcrite sous environnement EES. Les propriétés thermodynamiques et les performances du cycle ont été déterminées.

Quatre fluides ont été testés. En plus de leurs effets néfastes notamment vis-à-vis de la santé et de l'environnement, le cyclohexane et le cyclopentane présentent des performances relativement basses.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- Le benzène et le n-heptane présentent des performances meilleures que le cyclohexane et le cyclopentane.

Bien que ces fluides soient également performants, les problèmes de sécurité, de santé humaine et d'environnement doivent être gérés de façon stricte.

IV. Conclusion générale

L'étude thermodynamique menée dans ce travail a permis de comparer les performances de quatre fluides de transfert de chaleur – benzène, cyclopentane, cyclohexane et n-heptane – au sein d'un cycle organique de Rankine destiné à une exploitation géothermique à une température moyenne de 200°C. Les résultats obtenus, tant au niveau des propriétés thermodynamiques que des indicateurs financiers, permettent de dégager plusieurs conclusions importantes.

Tout d'abord, il ressort que le cyclopentane présente les performances les plus faibles en termes de rendement et d'efficacité économique, ce qui en fait un fluide moins compétitif pour ce type d'application. En revanche, le benzène et le n-heptane se distinguent par leurs excellentes performances thermodynamiques et financières, bien qu'il faille noter des préoccupations importantes concernant la sécurité et la santé. Le benzène, en particulier, s'avère être un fluide corrosif et dangereux pour la santé humaine, ce qui pourrait augmenter significativement les coûts de maintenance et de fonctionnement à long terme. Le n-heptane, quant à lui, bien qu'inflammable, est moins dangereux en termes d'effets sanitaires et présente une alternative viable avec de meilleures performances et des risques moindres sur la durée.

L'analyse paramétrique a également montré l'importance de la gestion des températures d'approche au niveau du bouilleur et du condenseur. Un équilibre optimal est à atteindre afin de maximiser l'efficacité énergétique et économique des systèmes. Par exemple, un profit maximal a été observé avec une température d'approche du bouilleur autour de 20°C, tandis que l'efficacité du condenseur joue un rôle crucial dans la réduction des coûts et l'optimisation du gain sur une période de dix ans.

En conclusion, bien que le benzène et le n-heptane soient des fluides techniquement performants, le n-heptane apparaît comme le choix le plus adapté pour des applications à long terme, en raison de sa meilleure compatibilité avec les exigences de sécurité et d'environnement. Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer des critères thermodynamiques, environnementaux et économiques pour le choix des fluides de travail dans les cycles organiques de Rankine.

Références bibliographiques

- [1] E. Barbier, «Geothermal energy technology and current status: An overview,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, n° %12002, pp. 3-65, 2002.
- [2] R. DiPippo, *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact.*, New York: Butterworth-Heinemann, 2016.
- [3] A. Franco et M. & Villani, «Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, medium-temperature geothermal fields.,» *Geothermics*, vol. 38, n° %14, pp. 379-391, 2009.
- [4] N. Toshihiko, S. Diego et R. Mikhail, «Application of energy system models for designing a low-carbon society,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 37, n° %14, pp. 462-502, 2011.
- [5] K. S. S, *Geoscience.*, Kenneth S. Schmitz, 2018,.
- [6] T. Claudia, D. N. Giuseppe, S. Roberto, S. Renato et M. Roberto, «The Campi Flegrei caldera unrest: Discriminating magma intrusions from hydrothermal effects and implications for possible evolution.,» *Earth-Science Reviews*, vol. 188, pp. 108-122, 2019.
- [7] G. Susmita et K. R. Abhishek, «An assessment of prospects of geothermal energy in India for energy sustainability,» *Renewable Energy*, 2024.
- [8] A. Gabriela, A. M. Marco et T. Edson, *The Renewable Energy-Water-Environment Nexus*, Shahryar, Jafarinejad; Bryan, S., Beckingham, 2024.
- [9] R. I. M., *Fundamentals of separation of oil and gas*, Gulf Professional Publishing, 2023.

- [1 R. Aaron, K. Klaus, W. Zhiyang, L. Xiaojun, P. Alan, K. Jamshid, N. Mohamad, C. Terry, 0] A. Bahar, S. Eric et B. Eugene, *Thermal, Mechanical, and Hybrid Chemical Energy Storage Systems*, Academic Press, 2021.
- [1 G. Yiheng, P. Scott, Z. Dan, Z. Senlin et B. Sid, «Overview of the application status and 1] development trends of hydropower and geothermal power in New Zealand,» *Energy and Built Environment*, 2024.
- [1 W. Gaosheng, S. Xianzhi, S. Guofeng, S. Yu, Y. Chao, X. Fuqiang, J. Jiayan et S. Zihao, 2] «Analyzes of thermal characteristics of a hydrothermal coaxial closed-loop geothermal system in a horizontal well,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 180, 2021.
- [1 Z. H. M. Sadiq, «Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review,» 3] *Geothermics*, vol. 51, pp. 142-153, 2014.
- [1 E. E. Conference, «2010 Energy Conference: Short-Term Stresses, Long-Term Change,» 4] EIA, 2010. [En ligne]. Available: <https://www.eia.gov/conference/2010/>. [Accès le 22 Mars 2024].
- [1 «Navigant Research: 2013 the year global PV market stabilises,» PVTECH, 11 November 5] 2013. [En ligne]. Available: https://www.pv-tech.org/navigant_research_2013_the_year_global_pv_market_stabilises/. [Accès le 04 Avril 2024].
- [1 «International Energy Outlook,» EIA, May 2016. [En ligne]. Available: 5] [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf). [Accès le 25 05 2024].
- [1 «B2B MARKET,» Priority Metrics Group , December 2014. [En ligne]. Available: 7] <https://www.pmgco.com>. [Accès le 11 Juillet 2024].
- [1 «THE ECONOMICS OF GEOTHERMAL HEAT PUMP SYSTEMS FOR 3] COMMERCIAL AND INSTITUCIONAL BUILDINGS,» 2003. [En ligne]. Available: <https://www.geothermal-energy.org> . [Accès le 21 Août 2024].

- [1 L. Xiaobing, H. Patrick, S. Jeffrey et A. Arlene, «An Updated Assessment of the Technical Potential of Geothermal Heat Pump Applications in the United States,» [En ligne]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/215262302.pdf>.
- [2 [En ligne]. Available: <https://www.eia.gov>. [Accès le 12 Janvier 2024].
- [2 K. Sanford et N. Gregory, *Thermodynamics*, Cambridge : Cambridge University Press, 2012.
- [2 « The Ultimate Guide to Heat Transfer Fluids,» Thermtest, 11 09 2023. [En ligne]. Available: <https://thermtest.com/the-ultimate-guide-to-heat-transfer-fluids>. [Accès le 11 08 2024].
- [2 [En ligne]. Available: https://www.citepa.org/fr/2024_02_a03/#:~:text=L%27AIE%20avait%20publié%20en,que%20légèrement%20ralenti%20en%202022..
- [2 [En ligne]. Available: <https://www.fws.gov/node/265252>.
- [2 O. F. M. M. H. Abidur Rahman, «Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, 2022.