



Université Abbas Laghrour Khenchela

جامعة عباس لغرور خنشلة

Faculté des Sciences Et Technologies

Département de Génie Électrique



Réf :.....

Mémoire

De fin d'études Pour l'obtention du diplôme

De Master

Spécialité : Commande électrique

Intitulé du Thème:

***Étude et modélisation de la source géothermique
de Hammam Essalihine (Khenchela) en vue
d'une exploitation énergétique***

Réalisé par :

Saidi Anisse

Soutenu le 15/06/2026 devant la commission d'examen composée de :

Membres de jury:

Dr. Beddiaf Yassine	M.C.A	Université de Khenchela	Président
Dr. Saidi Abdelkader	M.C.B	Université de Khenchela	Encadrant
Dr. Rafik Labdani	M.C.A	Université de Khenchela	Examineur

Année Universitaire 2025/2026

Remercîments

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, Monsieur Saidi Abdelkader, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses conseils précieux et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son encadrement rigoureux et ses orientations pertinentes ont largement contribué à la réussite de ce travail.

Je remercie également l'ensemble des professeurs du département de génie électrique pour la qualité de leur enseignement, leurs efforts constants et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mon parcours universitaire.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour l'intérêt qu'ils y portent.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mes parents, pour leur amour, leurs sacrifices, leur patience et leur soutien moral et matériel tout au long de mes études.

Enfin, je remercie chaleureusement mes frères et mes oncles pour leur encouragement, leur aide et leur présence constante, qui m'ont été d'un grand soutien durant ce parcours

Merci du fond du cœur





DÉDICACE

*Je dédie ce travail en premier lieu à ma chère mère, Hizia, pour son amour
inconditionnel, sa patience et ses prières qui m'ont toujours accompagné.*

*À mon père, Nabil, pour son soutien, ses encouragements et les sacrifices qu'il a consentis
pour ma réussite.*

*À mes frères, Abdeldjalil et Mohammed Elamin, pour leur soutien moral et leur
présence constante.*

*À mes chers amis, Yassine, Wassim, Ala Eddine et Rabeh, pour leur amitié sincère,
leur aide et les moments partagés tout au long de ce parcours.*

À mes oncles, pour leur encouragement et leur confiance.

*Enfin, je dédie ce travail à tous les professeurs du département de génie électrique, et tout
particulièrement à mon encadreur, Monsieur Saidi Abdelkader, pour son
accompagnement, ses conseils et son engagement tout au long de ce travail*



Résumé

Ce travail porte sur l'étude de la source géothermique de Hammam Essalihine (70°C, 20 L/s) et son exploitation pour la production d'électricité via un cycle ORC. Une modélisation sous MATLAB a permis d'évaluer les performances du système.

Les résultats montrent une puissance d'environ 319 kW avec un rendement proche de 11 % et une production stable grâce à un facteur de charge élevé. L'étude confirme la faisabilité technique et économique, ainsi que son intérêt pour l'électrification rurale, avec des possibilités d'amélioration du rendement.

Mots-clés : Géothermie, ORC, modélisation, énergie renouvelable, Hammam Essalihine

الملخص

تتناول هذه الدراسة استغلال المصدر الجيوحراري بحمام الصالحين (70 درجة مئوية، 20 لتر/ثانية) لإنتاج الكهرباء باستخدام دورة رانكين العضوية (ORC)، من خلال نمذجة باستعمال MATLAB.

أظهرت النتائج إمكانية إنتاج حوالي 319 كيلوواط بمردود يقارب 11% مع استقرار في الإنتاج، كما أكدت الدراسة الجدوى التقنية والاقتصادية وإمكانية استخدامه في كهربة المناطق الريفية مع إمكانية تحسين الأداء.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الجيوحرارية، دورة ORC، النمذجة، الطاقات المتجددة، حمام الصالحين

Abstract

This study investigates the geothermal source of Hammam Essalihine (70°C, 20 L/s) for electricity generation using an Organic Rankine Cycle (ORC). A MATLAB model was developed to evaluate system performance.

Results indicate a power output of about 319 kW with an efficiency of around 11% and stable annual production. The study confirms technical and economic feasibility, as well as its potential for rural electrification, with opportunities for performance improvement.

Keywords: Geothermal energy, ORC, modeling, renewable energy, Hammam Essalihine

Sommaire

Sommaire

Remerciments.....	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
Sommaire.....	v
Abréviations et nomenclatures	viii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x

Introduction Générale

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1 État d’art

1.1 Introduction	5
1.2 Présentation générale de la géothermie et de ses applications énergétiques	5
1.2.1 Définition et principes physiques	5
1.2.1 Applications énergétiques de la géothermie.....	6
1.3 Évolution historique de la production d’électricité d’origine géothermique	7
1.4 Classification des ressources géothermiques	11
1.5 Situation de la géothermie en Algérie, avec un focus sur la région de Khenchela	13
1.5.1 Potentiel géothermique national.....	13
1.5.2 Focus sur la région de Khenchela.....	15
1.5.3 Usages actuels des eaux thermales.....	16
1.6 Synthèse des travaux antérieurs liés à la valorisation des sources thermales	16
1.6.1 Exemples internationaux de valorisation de ressources de basse enthalpie	16
1.6.2 Études sur les sources thermales de Khenchela	21
1.7 Conclusion.....	21

Chapitre 2 Étude du site et collecte des données

2.1 Introduction	23
2.2 Localisation géographique et description physique du site.....	23
2.2.1 Situation géo-administrative et contexte historique	23
2.2.2 Paramètres géographiques précis et contexte topographique.....	24
2.3 Analyse des caractéristiques de la source (température ≈ 70 °C, débit moyen, stabilité)..	25
2.3.1 Caractéristiques thermiques validées par mesures multiples	25
2.3.2 Caractéristiques hydrauliques : débits et stabilité hydrodynamique	25
2.4 Présentation des infrastructures existantes (captage, écoulement, bassins)	26
2.4.1 Système de captage : architectures romaine et moderne	26
2.4.2 Circuits d’écoulement et bassins de réception	26
2.5 Proposition d’un schéma simplifié de fonctionnement de la source géothermique	27

2.5.1 Organigramme de fonctionnement Source géothermique.....	27
Tableau explicatif – Organigramme du fonctionnement de la source géothermique.....	28
2.6 Conclusion.....	29

Chapitre 3. Modélisation énergétique de la source géothermique

3.1 Introduction	31
3.2 Hypothèses de modélisation.....	31
3.2.1 Hypothèses thermodynamiques générales.....	31
3.2.2 Hypothèses spécifiques aux composants.....	32
3.2.3 Conditions nominales de fonctionnement	34
3.2.4 Performances attendues	34
3.3 Principe de conversion de l'énergie géothermique en énergie électrique	35
3.3.1 Chaîne de conversion	35
3.3.2 Étape 1 : extraction de la chaleur	39
3.3.3 Étape 2 : conversion thermodynamique (cycle ORC).....	44
3.3.4 Étape 3 : conversion mécanique → électrique	50
a) Alternateur synchrone	50
3.4 Formulation mathématique de la puissance thermique exploitable	51
3.4.1 Expression générale.....	51
3.4.2 Formule pratique en kW avec le débit en L/s :.....	52
3.4.3 Formule globale pour la puissance électrique :	52
3.5 Influence de la température et du débit sur la puissance disponible	52
3.5.1 Influence du débit.....	52
3.5.2 Influence de T_source	54
3.5.3 Influence de T_ref	54
3.6 Discussion sur les limites du modèle	54
3.7 Conclusion.....	55

Chapitre 4. Simulation numérique et analyse des résultats

4.1 Introduction général	57
4.2 Implémentation du modèle sous MATLAB.....	57
4.2.1 Résultats numériques (conditions nominales T=70°C, débit=20 L/s)	58
4.2.2 Résultats Graphiques (variations saisonnières T=60-85°C, débits=15-25 L/s)	59
4.3 Analyse et interprétation des résultats obtenus	62
4.3.1 Analyse et interprétation des résultats en régime nominal (T_source = 70°C, débit = 20 L/s).....	62
4.3.2 Analyse et interprétation des Résultats Graphiques (variations saisonnières T=60-85°C, débits=15-25 L/s)	62
4.4 Analyse de fiabilité et validation du modèle numérique	63
4.5 Comparaison complète avec renouvelables disponibles localement.....	64
4.6 Avantages et limites de système ORC	64

Table des matières

4.6.1	Avantages	64
4.6.2	Limites	65
4.7	Conclusion.....	65

Conclusion Générale

Conclusion Générale	68
---------------------------	----

Bibliographie

Bibliographie.....	71
--------------------	----

Abréviations et Nomenclatures

W_{turb} : Travail Produit Turbine

~ : Environ

≈ : A Peu Près égal

°C : Degré Celsius

R245fa : Fluide Organique R245fa

4G : Quatrième Génération de Réseau
Mobile

ANME : Agence Nationale Pour La Maitrise
De L'énergie

ASME : American Society Of Mechanical
Engineers

BPHE: Échangeur A Plaques Brasé (Brazed
Plate Heat Exchanger)

Ca²⁺ : Ion Calcium

C_p: Capacité calorifique massique de l'eau
(4180 J/(Kg·K))

E : Est

H : Enthalpie [Kj/Kg]

H1 : Enthalpie Avant Pompe

H2 : Enthalpie Après Pompe

H3 : Enthalpie Avant Evaporiseur

H4 : Enthalpie Après Evaporiseur

H5 : Enthalpie Après Turbine

Kg : Kilo Gramme

Kj : Kilo Joule

Km: Kilomètres

Kv : Kilo Volt

Kw : KiloWatts

L : Litre

M :Mètre

M' : Débit Massique

M' _ORC : Débit Massique De Fluide R245fa

Mg²⁺ : Ion Magnésium

MW : Méga Watts

N : Nord

ORC: Cycles Organiques Rankin

P_Elec : Puissance Electrique Nette Produite
(Kw)

P_Th : Puissance Thermique Extraite De La
Source Géothermique (Kw)

PN : Pression Nominale

PTC : Performance Test Code

PVC : Polychlorure De Vinyle (Matériau
Des Conduites Modernes)

Q'_In : Chaleur Recue

Q'_Out :Chaleur Rejetée

REFPROP:Reference Fluid Thermodynamic
And Transport Properties Database)

RN89 : Route Nationale 89

S : Seconde

T_Ref : Température De Fluide R245fa

T_{Sourc}: Température De Source Hammam
Esalhine

U:Coefficient Global D'échange Thermique
(W/K)

V' : Débit Volumique

V'_M3s : Débit En M³/S,

W'_Net : Travail Nette

W'_Pompe : Travail Consommé Pompe

M_(ORC) : Rendment De Cycle ORC

M_(Turbine) : Rendment Turbine

M_Alternateur : Rendment Alternateur

M_Carnot : Rendment Carnot

M_Pompe : Rendement Pompe

P:Densité Eau Minéralisée Approximée Pure

Liste des figures

Figure 1 Production Primaire d'énergies Renouvelables par Filière en 2022	5
Figure 2 La Source Géothermique et ses Applications	7
Figure 3 Première Production d'électricité Géothermique 1904.....	8
Figure 4 Centrale de Wairakei, en Nouvelle-Zélande. 1958.....	9
Figure 5 Consommation Finale Totale d'énergie Géothermique par Application, Monde (A Gauche) et Top 10 Pays Consommateurs (A Droite), 2023.....	10
Figure 6 Programme Algérienne des Energie Renouvelables.....	11
Figure 7 Classification des Ressources Géothermique.....	12
Figure 8 Les Sources Géothermiques en Algérie.....	14
Figure 9 Les Site ORC dans le monde	17
Figure 10 La Centrale Géothermique Chena Hot Springs	18
Figure 11 La Centrale Géothermique de Wairakei, Nouvelle-Zélande et sa technologies	18
Figure 12 Centrale Géothermique Olkaria – Kenya.....	19
Figure 13 Site Hammam Essalihine en Algérie	24
Figure 14 Principe de Fonctionnement ORC	36
Figure 15 Diagramme Pression-Enthalpie du R245fa.....	37
Figure 16 Présentation d'un Échangeur de Chaleur.....	40
Figure 17 Présentation d'un Fluide ORC (R245fa)	43
Figure 18 Présentation d'une Pompe ORC	45
Figure 19 Présentation d'un Vaporiseur ORC	47
Figure 20 Présentation d'une turbine ORC	48
Figure 21 Présentation d'un Condenseu.....	49
Figure 22 Présentation d'un Générateur.....	50
Figure 23 Puissance Thermique vs Température	59
Figure 24 Puissance Thermique vs Débit Géothermique.....	59
Figure 25 Puissance Electrique (W_Net) vs Température Géothermique	60
Figure 26 Puissance Electrique (W_Net) vs Débit Géothermique.....	60
Figure 27 Rendement _ORC Vs Température et Débit Géothermique	61
Figure 28 Cycle ORC (R245fa) H-S	61

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1 Capacité Installée et Développement de L'énergie Géothermique en Afrique (2023) .	11
Tableau 2 Sources Géothermiques et leur Caractéristiques	15
Tableau 3 Sources Thermales dans la wilaya de Khenchela	16
Tableau 4 Centrales/Micro-Centrales Géothermiques Electriques en Monde	20
Tableau 5 Tableau Explicatif – Organigramme du Fonctionnement de La Source Géothermique .	28
Tableau 6 Enthalpies et Etats du Fluide R245fa dans le Cycle ORC HS	38
Tableau 7 Influence du Débit sur la Puissance Disponible	53
Tableau 8 Comparaison Complète avec Renouvelables Disponibles Localement	64

Introduction Générale

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par une croissance soutenue de la demande énergétique et par l'intensification des effets du changement climatique, la transition vers des sources d'énergie durables s'impose aujourd'hui comme une nécessité stratégique majeure. La dépendance persistante aux énergies fossiles, notamment le pétrole et le gaz naturel, a engendré des impacts environnementaux significatifs, tout en exposant les économies à une forte volatilité des prix sur les marchés internationaux. Face à ces contraintes, l'intégration progressive des énergies renouvelables apparaît comme une alternative incontournable, à la fois propre, durable et économiquement pertinente à long terme (Intergovernmental Panel on Climate Change., 2022).

Parmi les solutions disponibles, les énergies solaire et éolienne ont connu un essor remarquable au cours des dernières décennies. Toutefois, leur caractère intermittent constitue une limite importante, rendant indispensable le recours à des sources complémentaires capables d'assurer une production continue et stable. Dans ce cadre, la géothermie se distingue par sa disponibilité permanente et son indépendance vis-à-vis des conditions climatiques, ce qui en fait une option particulièrement intéressante pour garantir la sécurité énergétique (Lund, 2016).

L'Algérie dispose d'un potentiel considérable en énergies renouvelables. Si l'énergie solaire occupe une place centrale dans les stratégies nationales, la géothermie reste encore insuffisamment valorisée, malgré la présence de nombreuses sources thermales réparties sur l'ensemble du territoire. Ces ressources, traditionnellement exploitées à des fins thérapeutiques ou touristiques, représentent pourtant une opportunité réelle pour la production d'électricité, notamment dans les zones rurales et isolées où l'accès à l'énergie demeure limité ou coûteux.

C'est dans ce contexte que j'ai choisi de m'intéresser à la source géothermique de Hammam Essalihine, située dans la wilaya de Khenchela, qui constitue l'un des sites les plus prometteurs du nord-est algérien. Cette source se caractérise par une température relativement stable d'environ 70°C et un débit significatif, ce qui la rend particulièrement adaptée à une exploitation énergétique à l'aide de technologies modernes. L'intérêt de ce site réside également dans son environnement socio-économique, marqué par la présence de zones rurales nécessitant des solutions énergétiques fiables et durables (Saibi, 2009).

Toutefois, l'exploitation de la géothermie à basse température pose des défis spécifiques, notamment en termes de rendement et de choix technologique. Les cycles thermodynamiques classiques, tels que le cycle de Rankine à vapeur d'eau, ne sont pas adaptés à ce type de ressource en raison de leur faible efficacité à basse température. C'est pourquoi le recours au cycle de Rankine organique, ou ORC, s'impose comme une solution particulièrement pertinente. Ce cycle utilise des fluides organiques présentant des températures d'ébullition plus faibles que l'eau, ce qui permet d'exploiter efficacement des sources géothermiques modérées.

Dans quelle mesure est-il possible d'exploiter efficacement une ressource géothermique à basse température, telle que celle de Hammam Essalihine, pour produire de l'électricité à l'aide d'un cycle ORC, tout en garantissant une performance énergétique satisfaisante et une faisabilité technique et économique adaptée au contexte local ?

Afin de répondre à cette problématique, l'objectif principal de ce travail consiste à étudier, modéliser et analyser le fonctionnement d'un cycle ORC appliqué à cette source géothermique, en vue d'évaluer sa faisabilité et ses performances réelles. Pour ce faire, une approche basée sur la modélisation thermodynamique a été adoptée, en utilisant l'environnement MATLAB, permettant de représenter avec précision les différents composants du cycle et d'en analyser le comportement en régime permanent.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres complémentaires :

- **Le premier chapitre** est consacré à un état de l'art détaillé de la géothermie. J'y présente les concepts fondamentaux, les principes de base, ainsi que les différentes classifications des ressources géothermiques. Une attention particulière est accordée à l'évolution historique de cette énergie, à ses principales applications énergétiques dans le monde, ainsi qu'à sa situation en Algérie, avec un focus sur la région de Khenchela.
- **Le deuxième chapitre** porte sur l'étude du site de Hammam Essalihine et la collecte des données. J'y analyse les caractéristiques géographiques et hydrogéologiques du site, notamment la température, le débit de la source, ainsi que les conditions d'exploitation et les mécanismes d'émergence des eaux géothermales.

- **Le troisième chapitre** est dédié à la modélisation énergétique du système. J'y expose les hypothèses de travail adoptées, le principe de conversion de l'énergie géothermique en énergie électrique via un cycle ORC, ainsi que la modélisation détaillée des différents composants du cycle. Les principales contraintes et difficultés rencontrées lors de cette modélisation sont également discutées.
- **Le quatrième chapitre** présente la simulation numérique et l'analyse des résultats. Les performances du système sont évaluées en conditions nominales, puis une analyse paramétrique est réalisée afin d'étudier l'influence des variations de la température et du débit sur le rendement et la puissance produite. Les résultats obtenus sont interprétés de manière approfondie afin de dégager les conditions optimales d'exploitation.

L'intérêt de ce travail réside à la fois dans son apport scientifique et dans sa dimension appliquée. En effet, les résultats obtenus permettent d'envisager concrètement la mise en place d'une micro-centrale géothermique capable de répondre aux besoins énergétiques locaux, tout en contribuant à la réduction de l'empreinte carbone.

Ainsi, cette étude vise à démontrer que la géothermie à basse enthalpie, bien que souvent négligée, constitue une solution énergétique viable et adaptée au contexte algérien. Elle se veut également une contribution technique susceptible d'encourager le développement de projets similaires à l'échelle nationale, en valorisant des ressources naturelles encore sous-exploitées.

Chapitre 1

État d'art

1.1 Introduction

La valorisation des ressources géothermiques s'impose aujourd'hui comme une priorité dans le cadre de la transition énergétique mondiale et de la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre. Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable disponibles en Algérie, les eaux thermales naturelles constituent un potentiel particulièrement intéressant. Elles peuvent être exploitées pour des usages variés tels que le chauffage direct, la production d'électricité de faible puissance ou encore le préchauffage de fluides dans des procédés industriels (Berkani & Houha, 2017).

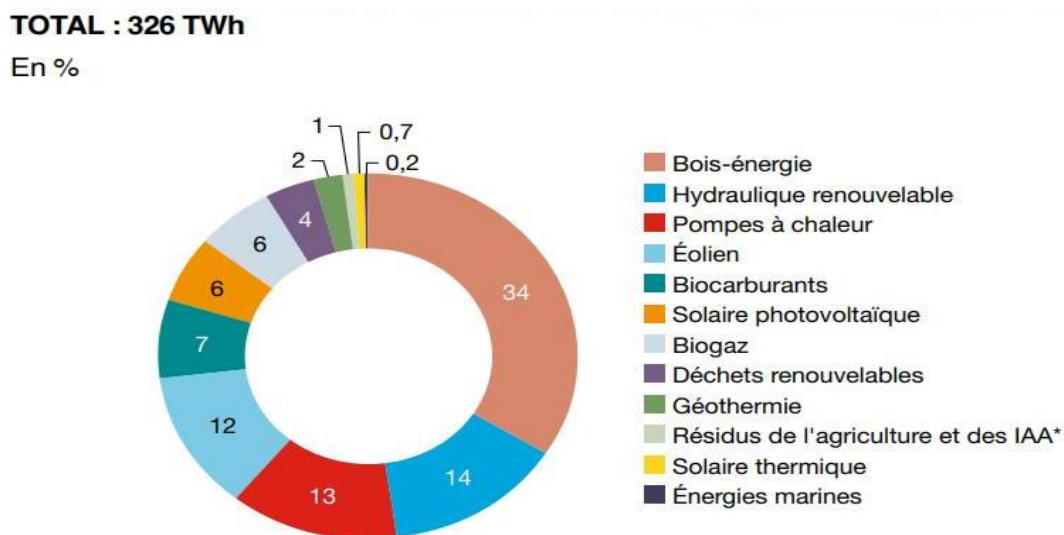


Figure 1 Production Primaire d'énergies Renouvelables par Filière en 2022 (Intergovernmental Panel on Climate Change., 2022)

1.2 Présentation générale de la géothermie et de ses applications énergétiques

1.2.1 Définition et principes physiques

La géothermie peut être définie comme l'ensemble des techniques permettant de capter et d'utiliser la chaleur interne de la Terre afin de produire une énergie utile. Cette énergie se manifeste principalement sous forme de chaleur, mais elle peut également être convertie en électricité.

L'origine de cette chaleur est double : d'une part, elle provient de la désintégration radioactive naturelle des éléments présents dans la croûte terrestre ; d'autre part, elle résulte du

flux thermique résiduel issu de la formation de la planète. Le gradient géothermique moyen dans la croûte continentale est généralement compris entre 25 et 30 °C par kilomètre de profondeur. Toutefois, dans certaines zones tectoniquement actives ou volcaniques, ce gradient peut être nettement plus élevé, ce qui favorise l'exploitation énergétique (Stellae Energy, 21/07/2021).

Le principe d'exploitation repose sur la circulation d'un fluide (eau, vapeur ou saumure). Ce fluide s'infiltre en profondeur, se réchauffe au contact des roches chaudes, puis remonte vers la surface par des fractures, des failles ou des forages. À l'émergence, il cède sa chaleur à un système d'utilisation (échangeur thermique, réseau de chauffage ou cycle thermodynamique). Dans certains cas, le fluide est réinjecté dans le réservoir géothermique afin de maintenir la durabilité de la ressource. La puissance thermique exploitable dépend principalement de trois paramètres : la température du fluide, son débit et sa capacité calorifique massique (energy, 2024).

1.2.1 Applications énergétiques de la géothermie

Les applications énergétiques de la géothermie se répartissent en deux grandes familles :

- **Usages thermiques directs** : chauffage ou climatisation de bâtiments, réseaux de chaleur urbains, piscines et centres thermaux, serres agricoles, aquaculture, séchage de produits agricoles et certaines applications industrielles (David Publishing, 2019-2020).
- **Production d'électricité** : conversion de la chaleur géothermique en énergie électrique grâce à des cycles vapeur classiques ou des cycles ORC, en particulier pour les ressources de moyenne et haute enthalpie (AIP Conference Proceedings, 2023).

Dans le cas de Hammam Essalihine, les scénarios les plus pertinents concernent le chauffage direct des infrastructures thermales et touristiques existantes, l'extension à des bâtiments voisins, ainsi que l'installation éventuelle d'une microcentrale ORC de faible puissance pour alimenter localement certains consommateurs.

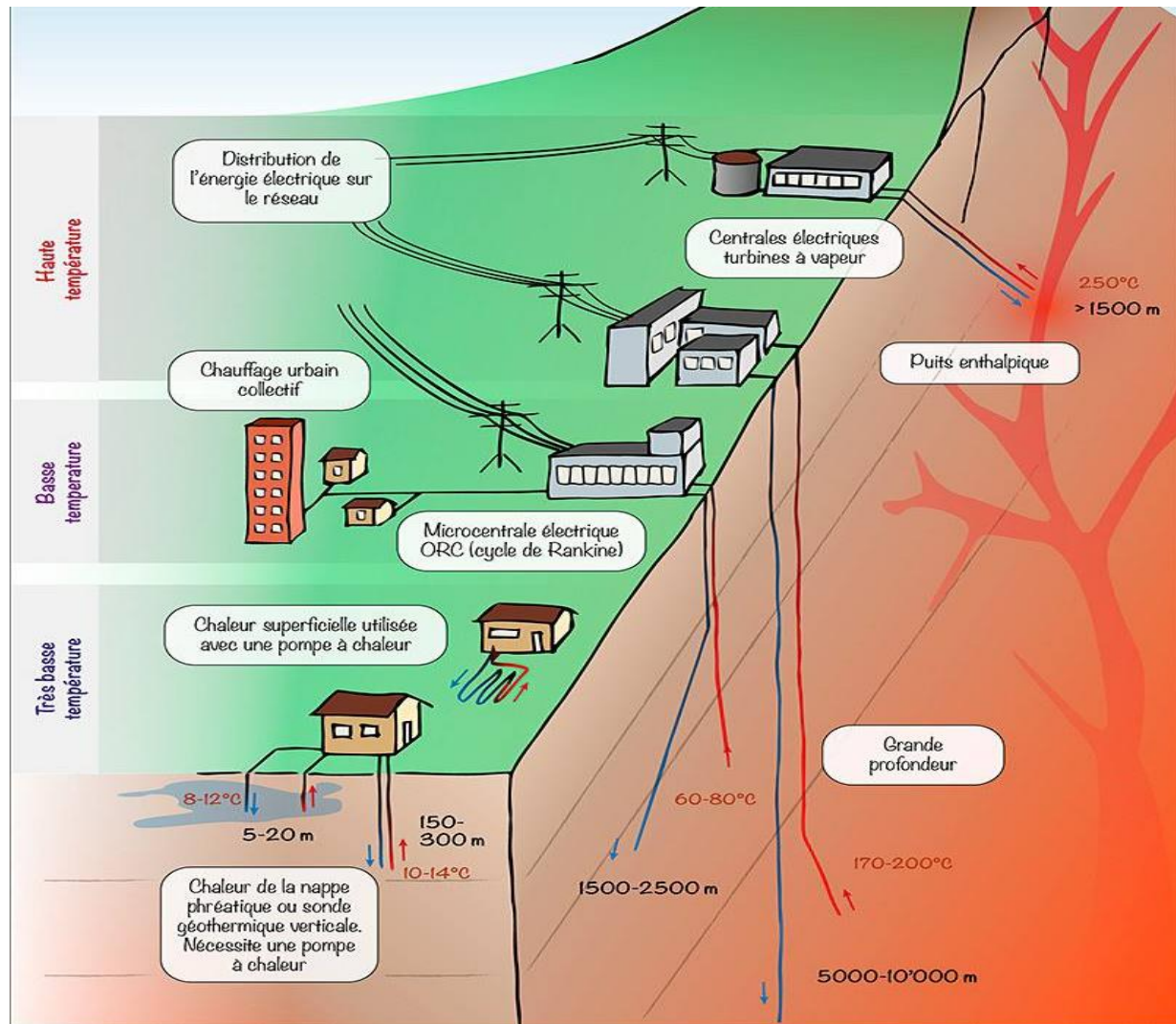


Figure 2 La Source Géothermique et ses Applications(GRO Centre – Selected African Countries)

1.3 Évolution historique de la production d'électricité d'origine géothermique

❖ Des usages thermiques aux premières exploitations (Antiquité – XIXe siècle)

L'utilisation de la chaleur naturelle issue du sous-sol remonte à l'Antiquité. Les civilisations anciennes, notamment les Romains, exploitaient les sources chaudes pour les bains publics et le chauffage, comme en témoignent les installations thermales de Baiae ou de Pompéi. Au Moyen Âge, la commune de Chaudes-Aigues, en France, mit en place dès le XIVe siècle un réseau rudimentaire de chauffage urbain alimenté par des sources thermales. À cette époque, les applications restaient exclusivement thermiques(Wikipédia contributors, 2024).

❖ 1818 : Premiers développements industriels

En Toscane, à Larderello, François-Jacques de Larderel met au point un procédé permettant d'extraire l'acide borique à partir de dépôts volcaniques chauds. La vapeur naturellement émise par des bassins appelés "lagoni" est utilisée comme source d'énergie pour chauffer les installations(Wikipédia contributors, 2024).

❖ 1904 : Première production d'électricité géothermique

Le 6 juillet 1904 marque une étape décisive : à Larderello, Piero Ginori Conti réussit à produire de l'électricité en utilisant de la vapeur géothermique pour alimenter un petit générateur (Wikipédia contributors, 2024).



Figure 3 Première Production d'électricité Géothermique 1904 (Wikipédia contributors, 2024)

❖ 1913 : Mise en service de la première centrale commerciale

Quelques années plus tard, la centrale dite « Carbone », d'une puissance de 2 MW, entre en exploitation à Larderello. Il s'agit de la première centrale géothermique viable sur le plan commercial. (Wikipédia contributors, 2024).

❖ 1958 : Apparition de la technologie "flash"

Un tournant technologique intervient avec la centrale de Wairakei, en Nouvelle-Zélande. Le principe consiste à détendre brutalement une eau géothermale à haute pression et à haute température (environ 230°C), afin de produire de la vapeur exploitable par des turbines conventionnelles. Cette méthode, dite « flash », permet d'élargir l'exploitation à des gisements

plus répandus. La centrale atteint une puissance de 150 MW(Wikipédia contributors, 2024)(Engineering New Zealand, 2008).



Figure 4 Centrale de Wairakei, en Nouvelle-Zélande. 1958 (Engineering New Zealand, 2008)

❖ 1960 : Développement aux États-Unis

Aux États-Unis, le site de The Geysers, en Californie, commence sa production commerciale avec une puissance initiale de 11 MW. Au cours des années 1980, sa capacité atteindra environ 2 GW, faisant de ce champ géothermique l'un des plus importants au monde(Wikipédia contributors, 2024)(The Geysers, 2025).

❖ Années 1980 : Déploiement du cycle binaire ORC

Pour valoriser les ressources à températures intermédiaires ou modérées, le cycle organique de Rankine (ORC) est progressivement adopté. Ce procédé utilise un fluide organique ayant un point d'ébullition inférieur à celui de l'eau, permettant de produire de l'électricité à partir de sources comprises entre 70 et 150°C. Cette innovation rend exploitables des sites auparavant considérés comme insuffisamment chauds, tels que Hammam Essalihine (70°C)(Energie Wallonie, 2016).

❖ Situation internationale actuelle (2026)

Dans le classement des principaux pays consommateurs d'énergie géothermique, la Chine arrive largement en tête avec une consommation d'environ 580 PJ, principalement sous forme de chaleur. Les États-Unis occupent la deuxième position avec près de 220 PJ, suivis par la Turquie avec environ 110 PJ.

Ensuite, la Suède présente une consommation proche de 70 PJ, tandis que l'Indonésie atteint environ 60 PJ. L'Islande, malgré une consommation plus faible d'environ 40 PJ, se distingue par une part très élevée de la géothermie dans sa consommation finale d'énergie (environ 45 %).

Le Japon et la Nouvelle-Zélande enregistrent respectivement des consommations d'environ 30 PJ et 25 PJ, tandis que l'Allemagne et les Philippines ferment le classement avec des valeurs proches de 20 PJ chacune. Par ailleurs, la part de la géothermie dans la consommation finale d'énergie reste généralement faible dans la plupart des pays (inférieure à 10 %), à l'exception notable de l'Islande.(Helios, 2023).

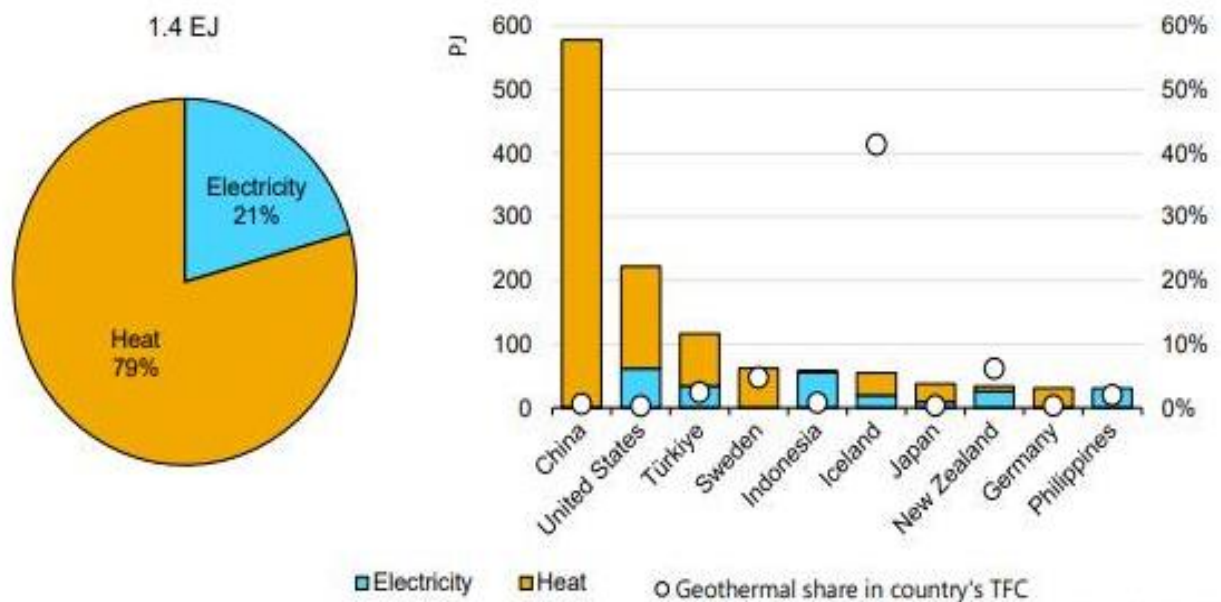


Figure 5 Consommation Finale Totale d'énergie Géothermique par Application, Monde (A Gauche) et Top 10 Pays Consommateurs (A Droite), 2023 (IEA, 2024)

❖ Situation en Afrique

L'énergie géothermique en Afrique s'est surtout développée dans la région de la vallée du Rift, grâce à un fort potentiel volcanique. Le principal pays producteur est le Kenya, qui exploite cette énergie depuis les années 1980 et possède les plus grandes centrales du continent. Aujourd'hui, d'autres pays comme Éthiopie et Djibouti développent aussi des projets pour augmenter la production d'énergie renouvelable(Sierra Group, 2022).

Tableau 1 Capacité Installée et Développement de L'énergie Géothermique en Afrique (2023)(The Global Economy, 2023)

pays	Capacité installée (MW)	Année début production
Kenya	985 MW	1985
Éthiopie	15 MW	1998
Djibouti	0,3 MW (projet pilote)	2021

❖ Situation en Algérie

L'Algérie dispose d'un potentiel géothermique notable, avec plus d'une centaine de sites recensés par le CDER présentant des températures comprises entre 50 et 110°C. Toutefois, aucune centrale électrique géothermique n'est encore en service ; l'exploitation actuelle se limite principalement aux usages thermaux et balnéologiques(Transaction d'Algérie, 2025).

Avec une température d'environ 70°C, le site de Hammam Essalihine constitue un candidat pertinent pour l'implantation d'une première unité de production électrique basée sur un cycle ORC.

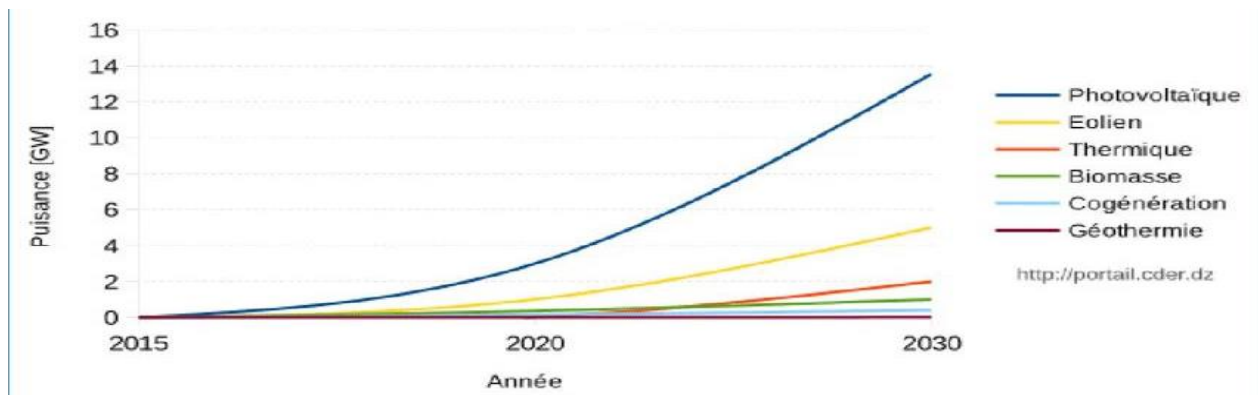


Figure 6 Programme Algérien des Énergies Renouvelables (Transaction d'Algérie, 2025)

1.4 Classification des ressources géothermiques

Les ressources géothermiques sont généralement classées en quatre catégories, La classification des ressources géothermiques est basée principalement sur la température du fluide et la profondeur, déterminant leur usage (électricité ou chaleur).

a) Géothermie de très basse température (< 30°C)

Ces ressources sont situées à faible profondeur (entre 0 et 200 mètres). Elles sont exclusivement exploitées pour le chauffage ou la climatisation des bâtiments au moyen de pompes à chaleur. Leur température ne permet pas la production d'électricité (GRO Centre – Selected African Countries).

b) Géothermie de basse température (30 à 90°C)

sont adaptées au chauffage urbain, aux serres agricoles ou à certaines applications en cogénération. La production d'électricité nécessite l'utilisation d'un cycle organique de Rankine (ORC), faisant appel à un fluide de travail à faible point d'ébullition. Les installations développent généralement des puissances limitées, de l'ordre de 10 kW à 1 MW (GRO Centre – Selected African Countries).

c) Géothermie de moyenne température (90 à 150°C)

Dans cette plage thermique, il devient possible de produire de l'électricité à une échelle plus importante (environ 1 à 50 MW), grâce à des cycles ORC performants ou à de petites turbines à vapeur. (GRO Centre – Selected African Countries).

d) Géothermie de haute température (> 150°C)

Cette catégorie correspond aux grandes centrales géothermiques destinées à la production massive d'électricité. Trois principaux procédés sont employés : l'utilisation directe de vapeur sèche naturelle (au-delà de 200°C), ou encore les cycles binaires hybrides. Les puissances installées varient de plusieurs dizaines de mégawatts à plusieurs gigawatts. (GRO Centre – Selected African Countries).

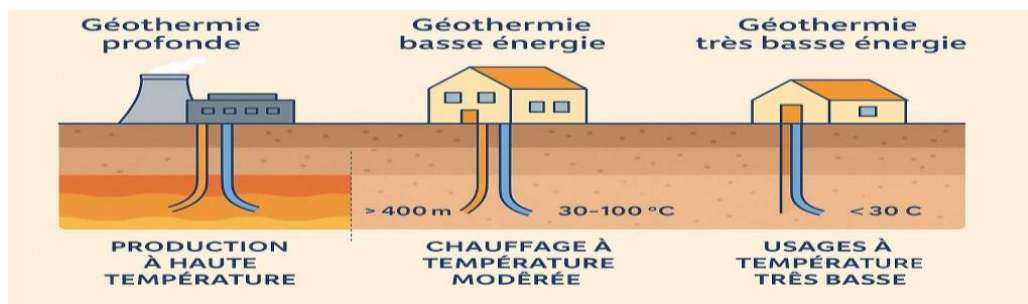


Figure 7 Classification des Ressources Géothermique (GRO Centre – Selected African Countries).

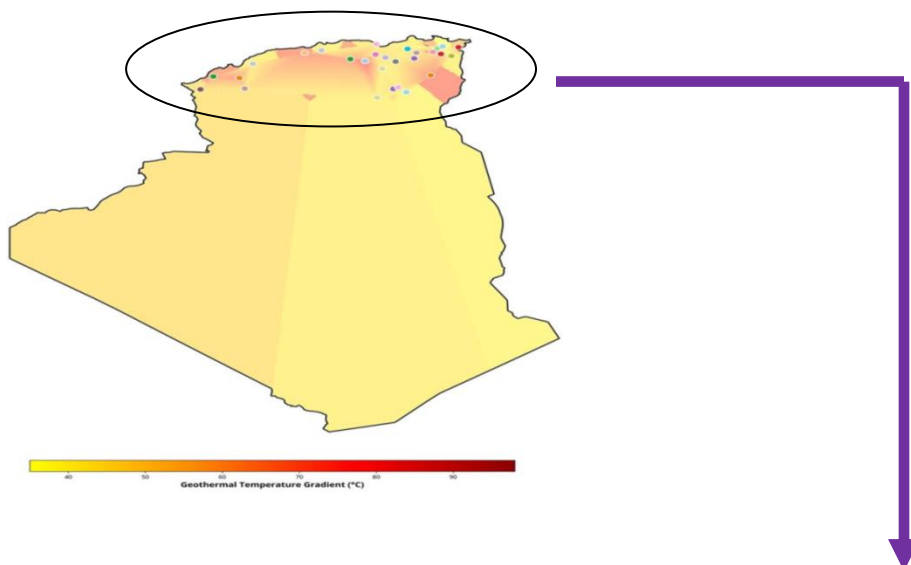
- Les eaux thermales de **Hamam Essalihine**, dont la température atteint environ 70 °C, se situent à la limite supérieure de la catégorie **basse enthalpie**. Cela ouvre la possibilité d'applications de chauffage direct et, sous certaines conditions technico-économiques, d'une **micro-centrale électrique ORC de faible puissance**.

1.5 Situation de la géothermie en Algérie, avec un focus sur la région de Khenchela

1.5.1 Potentiel géothermique national

L'Algérie dispose d'un potentiel géothermique considérable, avec plus de 200 à 240 sources thermales répertoriées, principalement dans le nord et le nord-est du pays. Les températures mesurées varient de 19 °C pour les plus fraîches à près de 98 °C pour des sites comme Hamam Meskoutine. Ces ressources sont souvent liées à des aquifères profonds et à des structures tectoniques qui facilitent la remontée des eaux chaudes.

Les études menées par des institutions nationales et internationales montrent que la géothermie pourrait contribuer de manière significative au mix énergétique algérien. Elle pourrait être utilisée pour le chauffage de bâtiments publics, de complexes touristiques, de serres agricoles et, dans certains cas, pour une production électrique locale de faible puissance. La géothermie présente l'avantage d'être une ressource renouvelable, disponible en continu et ayant un impact environnemental limité (energy, 2024).





Geothermal Sources	
	Hammam Debagh (Meskoutine) (98°C)
	Hammam Chellala (96°C)
	Hammam El Biban (80°C)
	Hammam Essalihine (Khenchela) (70°C)
	Hammam Bouhnifia (68°C)
	Hammam Righa (68°C)
	Hammam Bouhadjar (65°C)
	Hammam Ksenna (65°C)
	Hammam Ouled Ali (57°C)
	Hammam N'Bail (55°C)
	Hammam Tassa (52°C)
	Hammam Bradaa (50°C)
	Hammam Grouz (48°C)
	Hammam Salihine (Biskra) (46°C)
	Hammam Ouled Yelles (45°C)
	Hammam Boughrara (45°C)
	Hammam Hamma (45°C)
	Hammam Rabi (45°C)
	Hammam Guergour (44°C)
	Hammam Sidi Slimane (42°C)
	Hammam Sidi Djebali (42°C)
	Hammam Soukhna (42°C)
	Hammam Belhacel (41°C)
	Hammam Melouane (40°C)
	Hammam Zaim (40°C)
	Hammam Boutaleb (40°C)
	Hammam Guedjima (40°C)
	Hammam Beni Haroun (40°C)
	Hammam El Ma (38°C)
	Hammam Ain El Berda (35°C)

Figure 8 Les Sources Géothermiques en Algérie

Tableau 2 Sources Géothermiques et ses Caractéristiques (Berkani & Houha, 2017)

Source	Wilaya	Température (°C)	Débit (l/s)
Hamam Meskhoutine	Guelma	98	15
Hamam el Biban	Sétif	80	10
Hamam Righa	Aïn Defla	60	8
Hamam ksena	Bouira	60	12
Hamam Bohanifia	Mascara	66	20
Hamam Rabbi	Saïda	47	6
Hamam Melouane	Blida	38	5
Hamam Sidi Yahia Al Aidli	Béjaïa	58	9
Hamam Sidi Trad	El Tarf	63	7
Hamam Boughrara	Tlemcen	45	4
Hamam Bouhadjar	Aïn Témouchent	57-72	18
Hamam Essalihine	khenchela	70	20-60
Hamam Guergour	Sétif	52	11
Hamam Dhalaa	M'Sila	45	6
Sidi Ayad	Mostaganem	50	8
Ain El Ibel	Tébessa	55	10
Hamam Bou Sola	Relizane	40	5

1.5.2 Focus sur la région de Khenchela

La wilaya de Khenchela, située dans le nord-est de l'Algérie, est particulièrement riche en sources thermales. Parmi elles, Hamam Essalihine, Hamam El Knif et Hamam Djaarir sont les plus connues. Les analyses hydrogéochimiques montrent des eaux fortement minéralisées, de

type chloruré sodique et sulfato-magnésien, issues de circulations profondes à travers des formations carbonatées fracturées et des niveaux évaporitiques.

Tableau 3 Sources Thermales dans la wilaya de Khenchela (Berkani & Houha, 2017)

Source géothermique	Localisation	Température (°C)	Débit
Hamam Essalihine	El Hamma (Khenchela)	$\approx 70^{\circ}\text{C}$	$\approx 20 \text{ L/s}$
Hamam Knif	Baghai (khenchela)	$\approx 55^{\circ}\text{C}$	$\approx 10\text{-}15 \text{ L/s}$

Hamam Essalihine se distingue par des eaux chaudes d'environ 70°C et un débit relativement stable, ce qui en fait un site particulièrement intéressant pour une valorisation énergétique. La présence d'infrastructures thermales existantes et de bâtiments publics à proximité constitue un atout majeur pour la mise en œuvre d'un projet pilote.

1.5.3 Usages actuels des eaux thermales

À l'heure actuelle, la majorité des sources thermales algériennes sont exploitées principalement pour des usages balnéothérapeutiques et touristiques. Les stations thermales offrent des services de soins, de cure et de loisirs. En revanche, la valorisation énergétique structurée (réseaux de chaleur, cogénération, microcentrales) reste encore très limitée.

Quelques expériences pilotes ont toutefois démontré la faisabilité technique de l'utilisation de la chaleur géothermique pour le chauffage de serres ou de bâtiments. Ces initiatives constituent des références utiles pour envisager des projets similaires autour de Hamam Essalihine (David Publishing, 2019-2020).

1.6 Synthèse des travaux antérieurs liés à la valorisation des sources thermales

1.6.1 Exemples internationaux de valorisation de ressources de basse enthalpie

À l'échelle internationale, de nombreux projets ont démontré la faisabilité de la valorisation énergétique de ressources géothermiques de basse et moyenne enthalpie, comparables à celles de

Hammam Essalihine. On peut citer des systèmes de chauffage urbain, des complexes touristiques, des serres agricoles et des microcentrales électriques ORC installés dans différents pays, avec des températures de ressource allant de 60 à 150 °C.

Les cycles ORC se sont imposés comme une solution adaptée à la conversion de la chaleur géothermique basse enthalpie en électricité. Ils utilisent des fluides organiques à bas point d'ébullition, ce qui permet de produire de l'électricité même à partir de ressources modérées. Ces exemples fournissent un cadre conceptuel et technique utile pour évaluer la faisabilité d'une microcentrale géothermique sur le site de Hammam Essalihine (ThinkGeoEnergy).

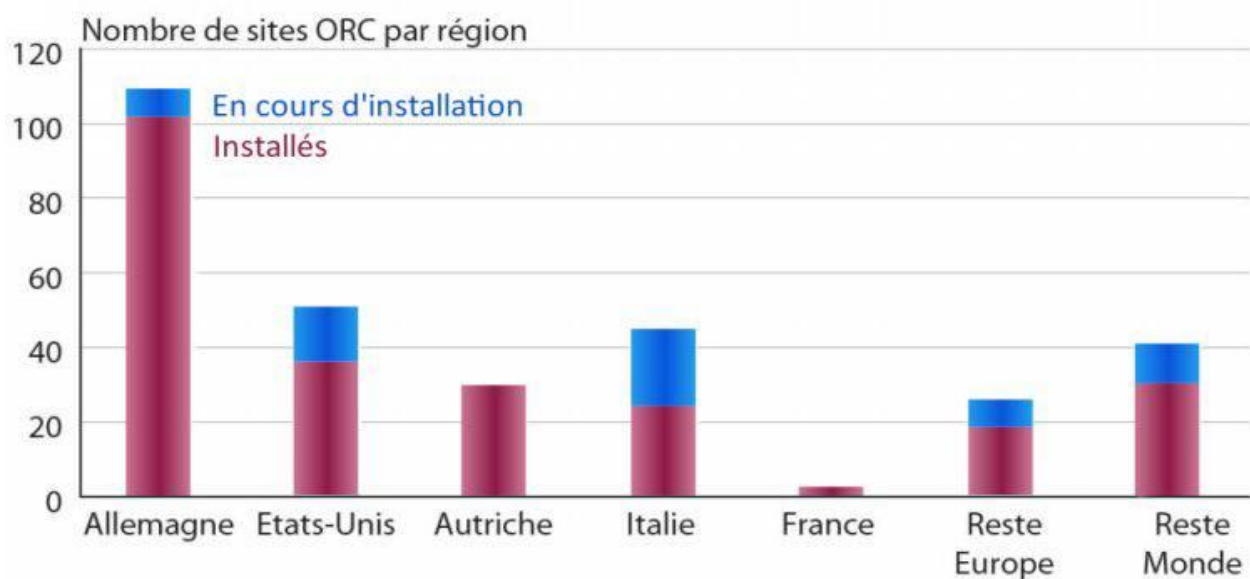


Figure 9 Les Site ORC dans le Monde (Capata & toro, 16/03/2014)

❖ Exemples de valorisation électrique des sources thermales

a) Chena Hot Springs – Alaska (États-Unis)

- + **Température de la source** : ~74 °C
- + **Technologie utilisée** : Cycle Organique de Rankine (ORC)
- + **Puissance installée** : ≈ 400 kW
- + **Particularité** : C'est l'un des premiers projets mondiaux à produire de l'électricité à partir d'une source géothermique de très basse température (Chena Hot Springs, 2016).

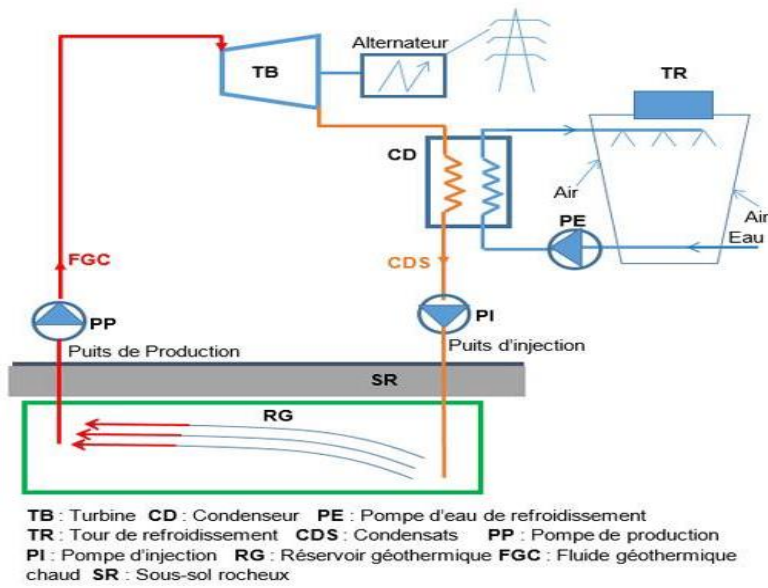


Figure 10 La Centrale Géothermique Chena Hot Springs (Chena Hot Springs, 2016)

b) Centrale géothermique de Wairakei – Nouvelle-Zélande

- ✚ **Température** : moyenne à haute ($\geq 120^\circ\text{C}$)
- ✚ **Technologie** : cycle binaire + cycle vapeur
- ✚ **Puissance** : plusieurs dizaines de MW (DiPippo, 2012)

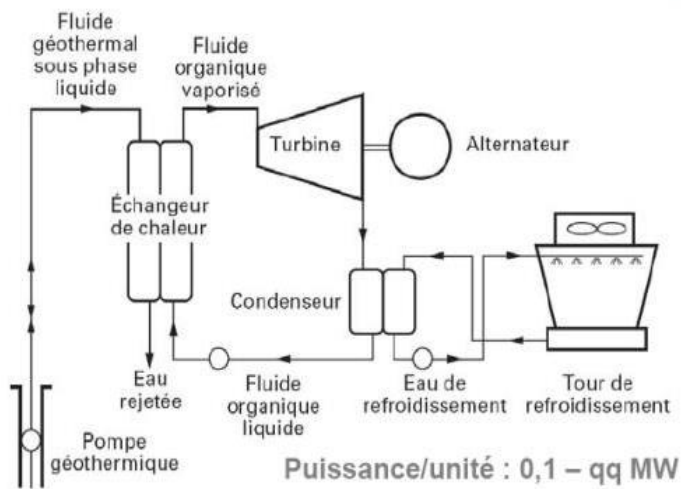


Figure 11 La Centrale Géothermique de Wairakei, Nouvelle-Zélande et sa technologies (DiPippo, 2012)

c) Centrale Olkaria – Kenya

✚ **Température** : 240 – 350 °C

✚ **Technologie dominante** : Flash Steam

✚ **Puissance** : $\approx$ 860 MW

✚ **Type de ressource** : Hydrothermale haute température (Schmidt, 2014)

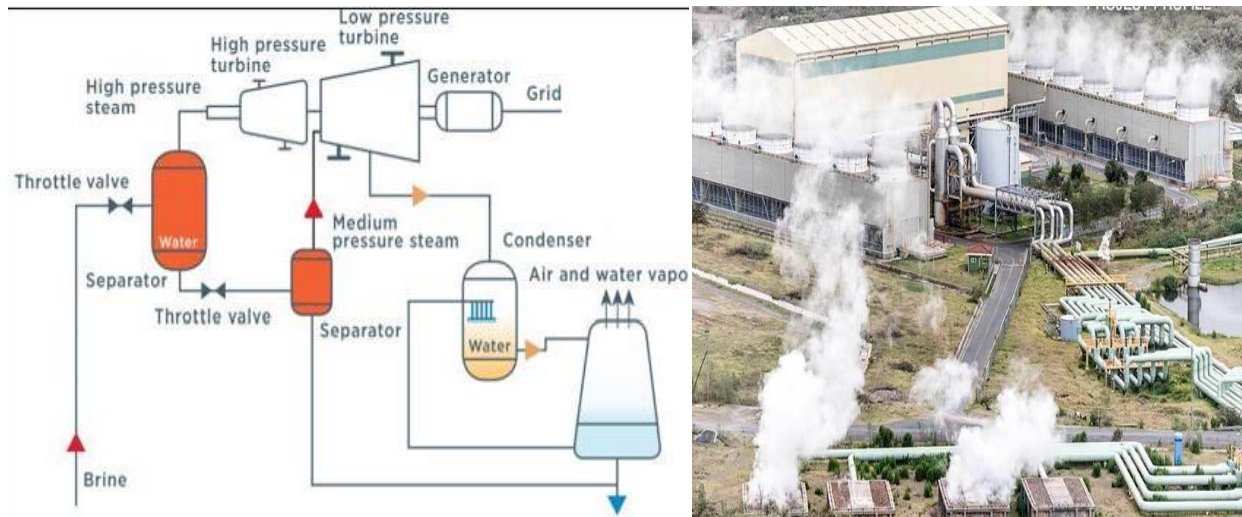


Figure 12 Centrale Géothermique Olkaria – Kenya (Schmidt, 2014)

Tableau 4 Centrales/Micro-Centrales Géothermiques Electriques en Monde (Huttrer, 2016)

Possède Centrale/Micro	T° (°C)	Débit (L/s)	Nature Système	P _{th} (MWth)	P _{élec} (MWe)	Année	Nom / Localisation	Rendement η (%)	Coût Invest (M€)
Micro centrale	57	10	ORC R134a	6.06	0.68	2006	Chena Hot Springs, Alaska USA	10	1.5
Micro centrale	74-98	15	ORC Isobutane	1.3	0.23	2001	Neustadt-Glewe, Allemagne	18	0.7
Micro centrale	82	25	ORC R245fa	22	2.64	2007	Landau, Allemagne	12	7.5
Micro centrale	40-70	8	ORC ENOGIA	0.25	0.02	2019	ENO-20LT, Gujarat Inde	8-10	0.06
Micro centrale	90-140	35	ORC Isobutane	11.5	1.5	2016	Soultz-sous-Forêts, France	13	4.5
Micro centrale	120	12	ORC R245fa	5.7	0.8	2005	Bruchsal, Allemagne	14	2.2
Micro centrale	85	18	ORC Turboden	2.3	0.25	2012	Neurath, Allemagne	11	0.58
Centrale	150	150	Binaire+ORC	170	17	1985	Beowawe, Nevada USA	10	45
Centrale	250	800	Sèche Vapeur	5000	725	1960	The Geysers, Californie USA	15	2000
Centrale	180	1000	Flash+ORC	4000	303	2006	Hellisheiði, Islande	15	850
Centrale	250	50	Flash Binaire	15	4.4	1984	Bouillante, Guadeloupe	29	12

1.6.2 Études sur les sources thermales de Khenchela

Les travaux de Berkani, Houha et d'autres chercheurs ont permis de caractériser les propriétés physico-chimiques et thérapeutiques des eaux thermales de la région de Khenchela. Ils décrivent la composition des eaux, leur origine, leurs trajectoires de circulation et leurs indications thérapeutiques. En revanche, les aspects énergétiques de ces ressources ont été peu étudiés.

Cette littérature met en évidence la richesse et la diversité des sources thermales, mais souligne l'absence d'études systématiques sur leur potentiel énergétique, en particulier pour Hammam Essalihine. Le présent travail cherche à combler cette lacune en proposant une modélisation énergétique de la source (Berkani & Houha, 2017)(Houha, 2007).

1.7 Conclusion

Ce premier chapitre a présenté les bases théoriques de la géothermie, sa classification selon la température des ressources et ses principales applications énergétiques, en mettant l'accent sur les systèmes de basse et moyenne enthalpie. La situation de la géothermie en Algérie a été examinée, révélant un potentiel conséquent lié à la présence de nombreuses sources thermales, mais une valorisation énergétique encore limitée.

Le site de Hammam Essalihine, dans la wilaya de Khenchela, apparaît comme un cas d'étude particulièrement intéressant. Ses eaux à environ 70 °C, son débit stable et ses caractéristiques physico-chimiques bien documentées en font une ressource prometteuse. Le contexte géologique et hydrogéologique local favorise la circulation et la remontée d'eaux profondes réchauffées, offrant un potentiel énergétique qui mérite d'être évalué de manière

Chapitre 2

Étude du site et collecte des données

2.1 Introduction

Ce deuxième chapitre constitue une étape fondamentale dans la compréhension du potentiel géothermique de Hammam Essalihine, situé dans la wilaya de Khenchela (Algérie). Après avoir présenté dans le premier chapitre le contexte général de la géothermie en Algérie, il s'agit ici de réaliser une analyse exhaustive du site retenu. Cette étude vise à caractériser avec précision la localisation géographique, les paramètres physiques et chimiques de la ressource, ainsi que l'état des infrastructures thermales existantes.

Les données mobilisées proviennent de travaux universitaires récents, de publications scientifiques spécialisées et de documents institutionnels officiels. Elles permettent de dresser un portrait complet de la source géothermique, en intégrant les aspects géomorphologiques, hydrogéologiques, thermiques et physico-chimiques. L'objectif est de constituer une base technique robuste, indispensable pour les développements théoriques et numériques des chapitres suivants, notamment la modélisation énergétique (Houha, 2007)(Berkani & Houha, 2017).

2.2 Localisation géographique et description physique du site

2.2.1 Situation géo-administrative et contexte historique

La station thermale de Hammam Essalihine est implantée dans la commune d'El Hamma, relevant administrativement de la wilaya de Khenchela. Elle se situe à 7 km au nord-ouest du chef-lieu de wilaya, soit environ 7 minutes de trajet par la route nationale RN89, entièrement goudronnée et en bon état. Cette accessibilité routière favorise une fréquentation importante, aussi bien locale que régionale.

Le site est niché au cœur du massif des Aurès, la plus haute chaîne montagneuse du nord-est algérien. Ce contexte géographique confère à la source un environnement naturel exceptionnel, caractérisé par un relief accidenté, une végétation méditerranéenne et une hydrogéologie favorable à la circulation des eaux souterraines profondes (Houha, 2007).

Historiquement, Hammam Essalihine était connu sous le nom latin *Aquae Flaviana*, ce qui témoigne de son exploitation dès l'époque romaine. Les Romains avaient déjà identifié l'importance stratégique et thérapeutique de ces eaux chaudes, et ils y avaient construit des infrastructures thermales remarquables. Depuis 2004, le site est classé patrimoine culturel national par le Ministère de la Culture algérien. Il représente aujourd'hui l'un des complexes

thermaux antiques les mieux conservés du Maghreb, alliant une valeur patrimoniale exceptionnelle à un potentiel énergétique contemporain (Ministère de la Culture et des Arts (Algérie), 2004).



Figure 13 Site Hammam Essalihine en Algérie (Hani K., 2020)

2.2.2 Paramètres géographiques précis et contexte topographique

Les coordonnées géographiques exactes du site sont $35^{\circ}26'15''\text{N}$ et $7^{\circ}05'02''\text{E}$, pour une altitude de 1050 m. Les zones de recharge aquifère se trouvent à plus de 1800 m dans les sommets du massif des Aurès. Le site occupe une vallée encaissée, bordée de versants granitiques boisés (chênes-verts et pins d'Alep) culminant à 1850 m (Service professionnel Latitude.to, 2026).

- Cette configuration topographique favorise deux dynamiques hydrogéologiques complémentaires

- + L'infiltration des précipitations en altitude, qui alimente les aquifères.
- + La remontée hydrostatique des eaux géothermiques, facilitée par les fractures karstiques.

➤ **Les infrastructures d'accès et de services comprennent :**

- + La RN89 goudronnée.
- + Un parking d'une capacité de 200 véhicules.
- + Un réseau électrique 22kV / 400V.
- + Une adduction d'eau potable.
- + Une couverture télécom 4G.

L'environnement naturel est protégé par la loi 04-20 sur les forêts, ce qui garantit une préservation du cadre écologique (Direction du Tourisme et de l'Artisanat de la Wilaya de Khenchela , 2026).

2.3 Analyse des caractéristiques de la source (température ≈ 70 °C, débit moyen et stabilité)

2.3.1 Caractéristiques thermiques validées par mesures multiples

Les campagnes de mesure réalisées entre 2010 et 2020 confirment une température d'émergence remarquablement stable, comprise entre 69,5 °C et 71,0 °C.

- **Hani et Khabtane (2019)** : 70,2 °C au griffon principal et 67,8°C dans les bassins.
- **Berkani et Houha (2016)** : 69,5 °C en moyenne.
- **Belahssini et al. (2010)** : 71,0 °C à l'émergence et 66 °C en bassin.

La valeur de référence retenue est $T_{\text{source}} = 70,0 \text{ °C} \pm 1,0 \text{ °C}$. Les variations saisonnières sont inférieures à $\pm 1,5 \text{ °C}$, ce qui traduit une grande régularité du réservoir aquifère profond. Cette stabilité est un atout majeur pour une exploitation énergétique continue (Berkani & Houha, 2017).

2.3.2 Caractéristiques hydrauliques : débits et stabilité hydrodynamique

Quatre émergences principales sont identifiées :

- **Griffon 1** : 9 L/s à 70,2°C (stabilité ± 10 %).
- **Griffon 2** : 5 L/s à 69,8°C (stabilité ± 12 %).

- **Griffon 3** : 4 L/s à 69,5°C (stabilité ± 15 %).

- **Griffon 4** : 3 L/s à 68,9°C (stabilité ± 18 %).

- ✓ Le débit total est $Q_{\text{total}} = 20 \text{ L/s}$ ($0,020 \text{ m}^3/\text{s}$).

- ✓ Le débit massique calculé est $\dot{m} = 978 \text{ kg/m}^3 \times 0,020 \text{ m}^3/\text{s} = 27,4 \text{ kg/s}$, arrondi à 20 kg/s.

- **La stabilité hydrodynamique**, avec des variations inter-saisonnières de $\pm 12\%$, confirme la régularité de la ressource. Cette constance est essentielle pour envisager une valorisation énergétique fiable (collectif, 2021)(Hani K., 2020).

2.4 Présentation des infrastructures existantes (captage, écoulement, bassins)

2.4.1 Système de captage : architectures romaine et moderne

Le système de captage associe des infrastructures antiques et modernes. Les Romains avaient construit des caniveaux maçonnés de 0,8 m de diamètre intérieur, optimisés pour un écoulement gravitaire. Ces ouvrages sont encore fonctionnels aujourd'hui. Ils sont complétés par des conduites PVC contemporaines de 300 à 500 mm de diamètre, sous pression nominale PN10.

Quatre regards maçonnés collectent les émergences avant leur acheminement vers les bassins. Les pertes thermiques observées sont de 2 à 4°C, principalement dues aux échanges convectifs avec l'air (Hani K., 2020).

2.4.2 Circuits d'écoulement et bassins de réception

- **Les infrastructures romaines comprennent**

- ✚ Une piscine circulaire monumentale (8 à 10 m de diamètre, profondeur 1,2 m, débit $\approx 15 \text{ L/s}$).

- ✚ Une piscine rectangulaire ($12 \times 6 \text{ m}$, profondeur 1,5 m, débit $\approx 10 \text{ L/s}$).

- **Les infrastructures modernes incluent**

- ✚ 46 salles de bains individuelles (débit unitaire 2 à 3 L/s, température 65 à 67 °C).

- ✚ Un hôtel thermal de 50 lits.

- ✚ Un restaurant et des vestiaires.

- ✓ La capacité totale de réception est de 20 L/s, exploitée exclusivement pour la balnéothérapie et le tourisme. Aucun prélèvement parallèle n'est actuellement destiné à la production

énergétique (Direction du Tourisme et de l'Artisanat de la Wilaya de Khenchela , 2026)(O, 2016).

2.5 Proposition d'un schéma simplifié de fonctionnement de la source géothermique

L'eau chaude remonte de la terre principalement par convection : chauffée en profondeur par le géotherme terrestre ou le magma, l'eau devient moins dense et monte à travers des fractures, des roches poreuses ou via des forages géothermiques.

2.5.1 Organigramme de fonctionnement Source géothermique

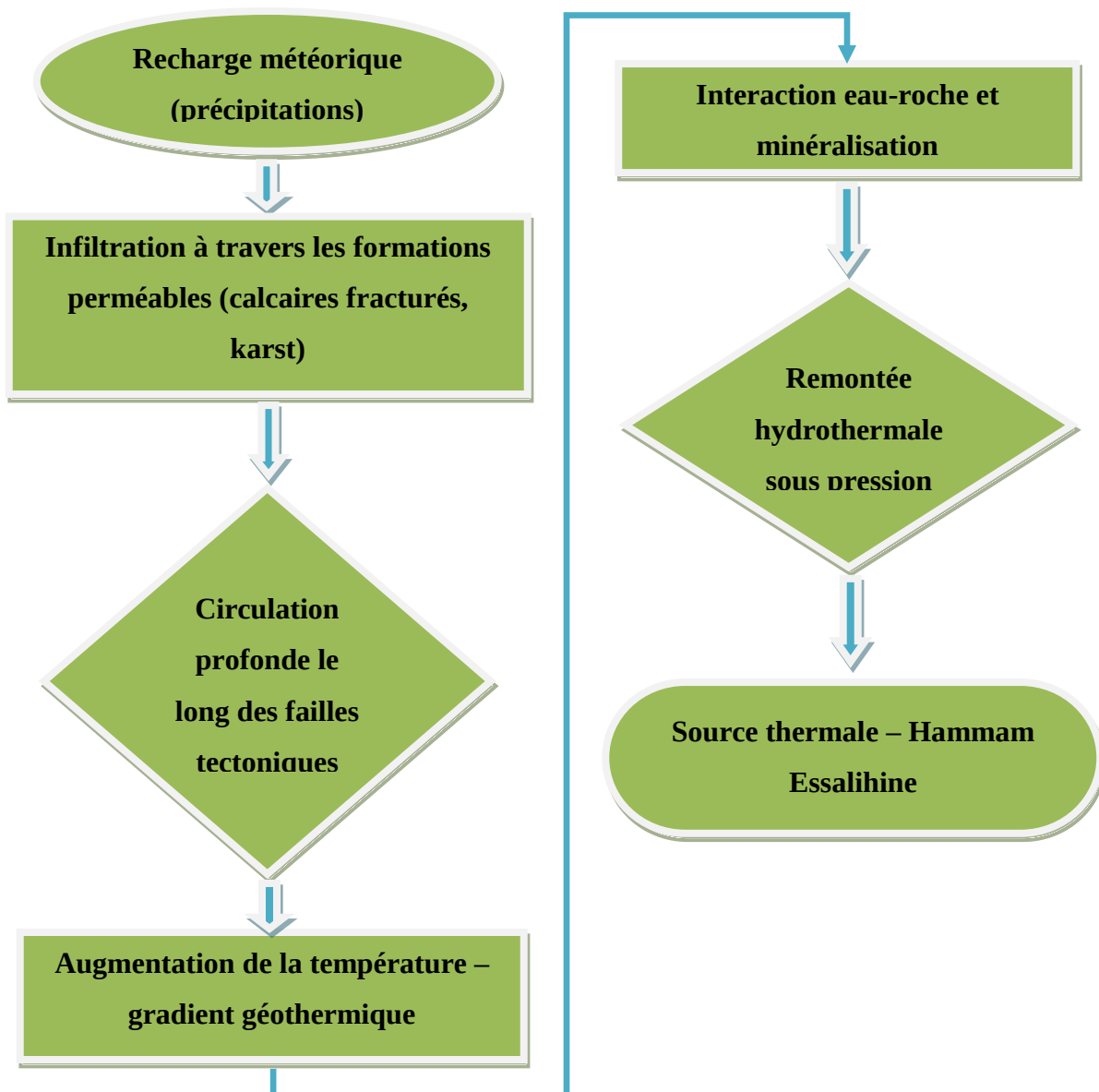


Tableau explicatif – Organigramme du fonctionnement de la source géothermique

Tableau 5 Tableau Explicatif – Organigramme du Fonctionnement de La Source Géothermique (Berkani & Houha, 2017)

Intitulé	Description détaillée	Importance scientifique
Recharge météorique (précipitations)	L'eau de pluie et la fonte des neiges s'infiltrant dans le sol. Point de départ du cycle hydrothermique	La quantité et la qualité de l'eau influencent le débit, la température et la minéralisation de la source
Infiltration dans les formations perméables	L'eau descend dans les roches calcaires fracturées et karstiques	Détermine la vitesse de circulation et le volume d'eau atteignant les zones profondes
Circulation profonde le long des failles tectoniques	L'eau suit les failles et fractures jusqu'à de grandes profondeurs.	Contrôle le trajet et le temps de résidence, influençant la température et la minéralisation.
Augmentation de la température gradient géothermique	L'eau s'échauffe en profondeur sous l'effet du gradient géothermique (~25–30 °C/km).	La température finale de la source dépend de la profondeur et du temps de séjour
Interaction eau-roche et minéralisation	L'eau dissout des ions minéraux (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , etc.) dans les roches encaissantes	Détermine la composition chimique et les propriétés thérapeutiques de l'eau.
Remontée hydrothermale sous pression	L'eau chaude, moins dense et sous pression, remonte naturellement vers la surface par les failles	Explique l'émergence à haute température (~70 °C) sans pompage artificiel.
Source thermique	L'eau thermique émerge à la surface, prête à être exploitée.	La température, le débit et la minéralisation dépendent de toutes les étapes précédentes.

2.6 Conclusion

L'étude de Hammam Essalihine met en évidence une ressource géothermique remarquable, caractérisée par une température stable de $70^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et un débit régulier de 20 L/s (≈ 20 kg/s). Les infrastructures antiques et modernes, associées à une fréquentation annuelle d'environ 700000 visiteurs, confirment l'importance patrimoniale et touristique du site. Malgré ces usages, le potentiel énergétique théorique estimé à 650 kWth reste largement inexploité, ouvrant la voie à une modélisation énergétique détaillée au chapitre suivant.

Chapitre 3

Modélisation énergétique de la source géothermique

3.1 Introduction

La source thermale de Hammam Essalihine, située dans la wilaya de Khenchela, se caractérise par une température de l'ordre de 70 °C et par un débit relativement important, ce qui en fait une ressource géothermique basse enthalpie intéressante pour la valorisation énergétique locale. Cette ressource est exploitée principalement à des fins thermales, alors qu'elle présente un potentiel pour la production de chaleur et de faible puissance électrique à partir d'un cycle organique de Rankine (ORC) (Hani K., 2020).

L'objectif de ce chapitre est de développer un modèle énergétique simple de la source de Hammam Essalihine, permettant d'estimer la puissance thermique exploitable en fonction de la température et du débit, puis de relier cette puissance à une puissance électrique potentielle en introduisant un rendement global de conversion. Ce modèle servira de base aux simulations numériques et à l'évaluation de faisabilité présentées dans les chapitres suivants.

3.2 Hypothèses de modélisation

Dans le cadre de l'analyse énergétique du système géothermique étudié, un ensemble d'hypothèses simplificatrices a été retenu. Ces hypothèses permettent d'établir un modèle thermodynamique cohérent du cycle ORC tout en garantissant une représentation fidèle du comportement réel de l'installation dans ses conditions nominales de fonctionnement.

3.2.1 Hypothèses thermodynamiques générales

Le modèle développé repose sur une étude en régime permanent. Ainsi, l'ensemble des grandeurs thermodynamiques (pressions, températures, débits massiques et enthalpies) est supposé invariant dans le temps. Les phases transitoires de démarrage et d'arrêt ne sont pas prises en considération, l'objectif étant d'évaluer les performances stationnaires du cycle.

Le principe de conservation de la masse est appliqué à chaque composant du système. Par conséquent, le débit massique entrant est égal au débit massique sortant. Dans le cas du fluide organique R245fa, circulant en circuit fermé, le débit massique est considéré constant sur l'ensemble du cycle (FERGANI Z. , 2016).

Les bilans énergétiques sont établis conformément à la première loi de la thermodynamique en régime permanent :

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m} * h_{entrée} - \sum \dot{m} * h_{sortie} = 0$$

Cette relation permet de relier la puissance thermique fournie à l'évaporateur, la puissance mécanique nette produite par la turbine et la chaleur rejetée au condenseur (DEBBAH, 2022).

Les propriétés thermophysiques du fluide de travail sont déterminées à l'aide de la base de données REFPROP, développée par le National Institute of Standards and Technology, garantissant une précision élevée dans la plage de fonctionnement considérée.

Les échangeurs de chaleur sont modélisés en supposant des transformations à pression constante pour chaque fluide, les pertes de charge par frottement étant négligées. De plus, les pertes thermiques vers l'environnement sont supposées nulles, ce qui revient à considérer les équipements comme adiabatiques vis-à-vis de l'extérieur (FERGANI Z. , 2016).

3.2.2 Hypothèses spécifiques aux composants

a) Pompe

La pompe d'alimentation est modélisée comme une machine volumétrique caractérisée par un rendement isentropique compris entre 65 % et 70 %, valeurs couramment observées dans les installations ORC industrielles.

Le fluide étant à l'état liquide à l'entrée de la pompe, il est supposé incompressible. L'élévation d'enthalpie est donc approximée par :

$$\Delta h_p = v_f (P_{evap} - P_{cond})$$

où (v_f) représente le volume spécifique du liquide saturé.

La puissance absorbée par la pompe s'écrit :

$$\dot{m}_p = \dot{m} * \Delta h_p / \mu_p \quad (\text{LEMORT, 2017})$$

b) Évaporateur et surchauffeur

L'évaporateur assure le transfert de chaleur entre la ressource géothermique et le fluide organique. La source étudiée présente une température d'entrée de 70 °C pour un débit d'environ 20 L/s.

Une différence minimale de température (pinch point) de 8 °C est imposée dans la zone d'ébullition afin de garantir la faisabilité industrielle de l'échange thermique.

Une surchauffe de 10 °C est appliquée en sortie d'évaporateur afin d'éviter toute condensation partielle à l'entrée de la turbine, protégeant ainsi les aubages contre l'érosion et améliorant la stabilité du fonctionnement.

Le rendement thermique global de l'échangeur est supposé égal à 85 %, valeur représentative des échangeurs à plaques à haute efficacité.(PIERRARD, 2017)

c) Turbine / Expander

La détente du fluide est modélisée par une transformation polytropique (indice moyen $n \approx 1,3$).

Le rendement isentropique de la turbine est supposé compris entre 60 % et 75 %, plage réaliste pour les expanders utilisés dans les cycles ORC basse température.

Le générateur électrique couplé à la turbine présente un rendement compris entre 85 % et 95 % (MARREC, 2012).

d) Condenseur

Le condenseur assure le rejet de la chaleur vers un circuit d'eau de refroidissement disponible localement, avec une température de condensation fixée à 35 °C.

Un sous-refroidissement de 5 °C est appliqué afin de réduire l'enthalpie à l'entrée de la pompe et d'améliorer son fonctionnement.

L'efficacité thermique du condenseur est estimée à 90 %.

3.2.3 Conditions nominales de fonctionnement

La source géothermique étudiée fournit un débit massique d'environ 20 kg/s à une température de 70 °C. La température de sortie est estimée à 35 °C, soit une variation thermique de 35 °C.

La puissance thermique disponible est calculée par :

$$P_{th} = \dot{m}_{eau} * C_p / \Delta T$$

Le fluide de travail retenu est le R245fa, sélectionné en raison de sa stabilité chimique, de sa non-inflammabilité et de ses pressions de fonctionnement modérées.

Les pressions caractéristiques du cycle sont :

- Pression de condensation : 1,8 bar
- Pression d'évaporation : 3,5 bar (FERGANI Z. , 2016)

3.2.4 Performances attendues

Le rendement thermique global visé pour le cycle ORC est compris entre 8 % et 12 %, ce qui correspond aux performances généralement rapportées pour les cycles basse température.

À titre de référence, μ_{carnot} associé aux températures extrêmes du cycle est voisin de 10 %, ce qui confirme la cohérence des performances attendues.

La puissance électrique nette estimée est comprise entre 250 kW et 350 kW, correspondant à un facteur de récupération énergétique de l'ordre de 10 %. (FERGANI B. , 2022)

Justification des hypothèses

Les hypothèses retenues s'appuient sur :

- ✚ Les mesures réalisées in situ sur le site étudié .
- ✚ Les données issues de la littérature scientifique relative aux cycles ORC basse température .
- ✚ Les retours d'expérience de fabricants spécialisés tels que Ormat Technologies et Turboden.
- ✚ Les bases de données thermodynamiques validées internationalement .

3.3 Principe de conversion de l'énergie géothermique en énergie électrique

3.3.1 Chaîne de conversion

Un système géothermique à cycle organique de Rankine (ORC) exploite la chaleur des eaux souterraines à température modérée pour produire de l'électricité renouvelable, en s'appuyant sur un cycle thermodynamique fermé(Wikipédia FR, 2026).

L'eau géothermique, extraite des puits à environ 70 °C, transfère son énergie thermique à un fluide de travail spécifique, le R245fa, via un échangeur de chaleur. Ce fluide organique est choisi pour ses propriétés adaptées aux basses températures et amORCe sa transformation dans le circuit fermé (Thermoptim - Mines Paris-PSL, 2026).

Après condensation, le R245fa se retrouve sous forme liquide à basse pression. Une pompe élève sa pression afin de le préparer à absorber la chaleur géothermique. Dans l'échangeur, il se réchauffe progressivement jusqu'à atteindre une température proche de son point d'ébullition (Marchandise S. et al, 2014).

Le fluide passe ensuite dans l'évaporateur où il capte la chaleur latente de l'eau géothermique et se vaporise entièrement sous pression. Cette vapeur, riche en énergie, est dirigée vers une turbine.

La détente isentropique de la vapeur dans la turbine génère un travail mécanique qui entraîne un alternateur. Celui-ci convertit l'énergie mécanique en électricité, directement injectée dans le réseau (M., 2016).

Une fois sortie de la turbine, la vapeur se refroidit et se condense grâce à un système de refroidissement par air ou eau, redevenant liquide à basse pression. Ce liquide retourne vers la pompe, assurant la continuité du cycle fermé.

Le dispositif repose sur une double boucle : l'eau géothermique circule dans un circuit ouvert, évitant les problèmes de corrosion et d'entartrage, tandis que le fluide R245fa réalise l'ensemble du cycle thermodynamique dans un circuit hermétique.

Ce procédé permet de valoriser une chaleur naturelle et gratuite, transformant une énergie diffuse en une production électrique stable, renouvelable et sans émissions de carbone (Laval, 2025).

- Source géothermique (eau chaude du réservoir).
- Extraction de la chaleur par échangeur.
- Conversion chaleur → travail mécanique via un cycle ORC.
- Conversion travail mécanique → énergie électrique via une génératrice.

Cette chaîne est bien adaptée aux ressources basse enthalpie ($T \approx 70\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$) grâce à l'utilisation d'un fluide organique à bas point d'ébullition

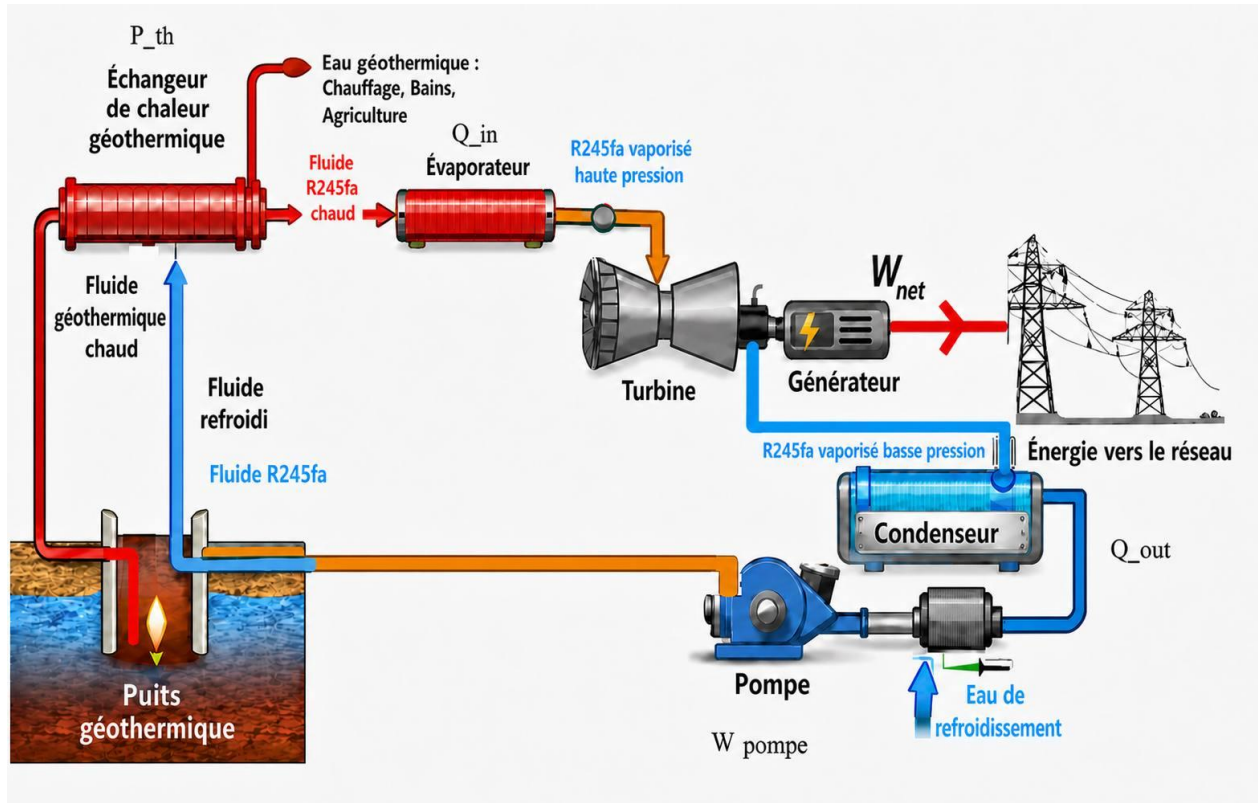


Figure 14 Principe de Fonctionnement ORC

❖ Qu'est-ce que l'enthalpie (h) ?

L'enthalpie est une grandeur thermodynamique qui représente l'énergie totale d'un fluide par unité de masse, incluant :

L'énergie interne (U) : l'énergie due à l'agitation des molécules.

Le travail de pression ($P \cdot V$) : l'énergie nécessaire pour "pousser" le fluide et occuper un volume.

Mathématiquement :

➤ $h = u + P \cdot v$

h : enthalpie [kJ/kg]

u : énergie interne [kJ/kg]

P : pression [kPa ou bar]

v : volume spécifique [m³/kg]

➤ **En pratique, dans un cycle ORC :**

- Quand le fluide est chauffé, l'enthalpie augmente.
- Quand le fluide effectue un travail (comme dans une turbine), l'enthalpie diminue.
- On peut voir l'enthalpie comme "l'énergie que le fluide transporte et peut céder ou recevoir pour produire du travail ou de la chaleur"(Capata & toro, 16/03/2014).

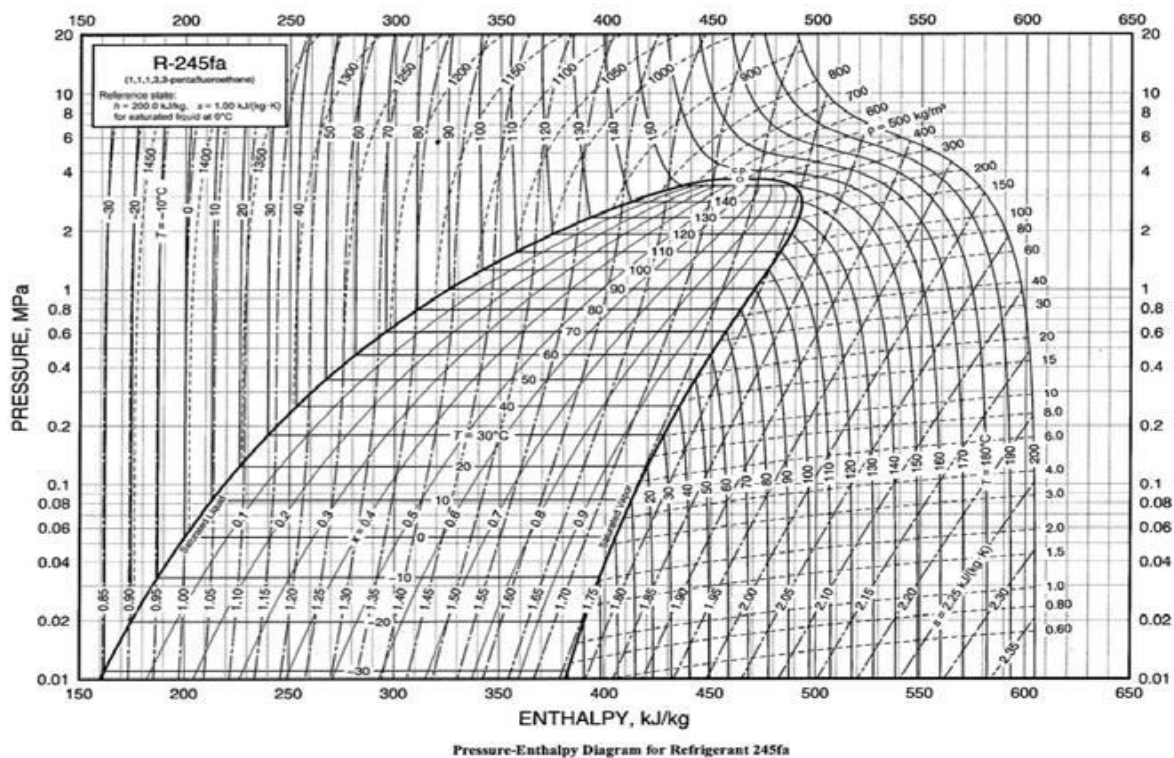


Figure 15 Diagramme Pression-Enthalpie du R245fa (Capata & toro, 16/03/2014)

➤ **Méthode générale pour définir une enthalpie h**

Pour chaque point du cycle :

a. Étape 1 : Fixer la pression

Tracer (mentalement) la ligne horizontale correspondant à la pression donnée.

b. Étape 2 : Identifier la deuxième donnée

Selon l'énoncé, on peut avoir :

- Température T
- Qualité x (titre)
- Entropie s (détente isentropique)
- État (liquide saturé, vapeur saturée, surchauffée...)

On suit alors :

- La courbe de saturation ($x=0$ ou $x=1$), ou La ligne de température, ou La ligne d'entropie (pour une turbine idéale).

c. Étape 3 : Lire h

À l'intersection trouvée, projeter verticalement vers l'axe h et lire la valeur en kJ/kg. (Capata & toro, 16/03/2014)

Tableau 6 Enthalpies et Etats du Fluide R245fa dans Le Cycle ORC HS

Point	Etat de fluide	Entité thermodynamique	Signification /comment obtenu
h1	Liquide sub-refroidi (avant pompe)	232 kJ/kg	Fluide à basse température et basse pression. Cette enthalpie correspond à l'énergie contenue dans le liquide avant compression. Obtenue à partir des tables thermodynamiques pour R245fa liquide à 35 °C.
h2	(après pompe) Liquide comprimé	235 kJ/kg	Après la pompe, l'enthalpie augmente légèrement car le fluide reçoit un travail mécanique (pompe). On calcule h2 avec $h2 = h1 + W_{pomp} / \dot{m}_{ORC}$

h3	Vapeur saturée	414.55 kJ/kg	fluide qui a absorbé la chaleur dans l'évaporateur pour passer de liquide à vapeur saturée. On lit cette valeur dans les tables R245fa pour vapeur saturée à 62 °C.
h4	Vapeur surchauffée	440 kJ/kg	Après le surchauffeur, la vapeur a encore plus d'énergie (température plus élevée que la saturation). Cette enthalpie permet à la turbine de produire plus de travail. Obtenue à partir de la table surchauffée R245fa à 72 °C et pression d'évaporation
h5	Vapeur détendue	395 kJ/kg	Après expansion dans la turbine, le fluide a cédé de l'énergie mécanique. La différence $h4 - h5$ correspond au travail de la turbine. Obtenue par $h5 = h4 - W_{turbine} / (\dot{m}_{ORC} * \mu_{turbine})$.

3.3.2 Étape 1 : extraction de la chaleur

a) L'eau géothermique arrive à la surface avec

Température : $T_{source} \approx 70 \text{ °C}$.

Débit volumique : $\dot{v} \approx 20 \text{ L/s}$.

b) L'eau traverse un échangeur de chaleur, où elle cède une partie de son énergie thermique à un fluide secondaire (R245fa)

Principe : L'eau chaude souterraine circule d'un côté des parois tandis que le fluide R245fa froid circule de l'autre. La chaleur se transmet à travers le métal par conduction, sans mélange des fluides.

Rôle : Chauffe le R245fa juste avant qu'il n'entre en ébullition, optimisant ainsi le transfert de chaleur.

Type adapté

- Échangeur à plaques brazé (BPHE)
- Surface $UA = 500-1000 \text{ m}^2$
- Matériau : Inox 316L + traitement anti-incrustant
- $\Delta T \text{ pinch} = 5-10^\circ\text{C}$ (eau $70 \rightarrow 45^\circ\text{C}$, fluide ORC $35 \rightarrow 62^\circ\text{C}$) (Quoilin S. , 2011).

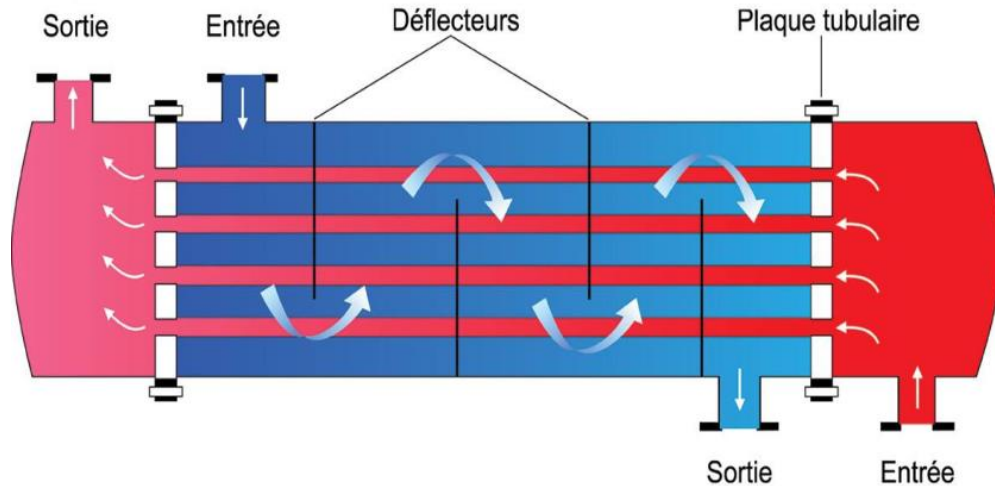
a)**b)**

Figure 16 Présentation d'un Échangeur de Chaleur (Quoilin S. , 2011)

c) La puissance thermique s'exprime par la relation

$$P_{th} = \dot{m} * C_p * (T_{source} - T_{ref}) \quad (3.1)$$

avec :

- **P_{th}** : puissance thermique (W),
- **$\dot{m}$** : débit massique (kg/s),
- **C_p** : capacité calorifique massique (J/(kg·K)),
- **T_{source}** : température de la source (°C),
- **T_{ref}** : température de référence (fluide R245fa) (°C).

Le débit massique est lié au débit volumique par :

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} \quad (3.2)$$

où :

- **ρ** : densité de l'eau (kg/m³),
- **$\dot{V}_{m3s}$** : débit volumique en m³/s.

Pour l'eau, on prend en première approximation $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ et $C_p = 4180 \text{ J/(kg·K)}$.

❖ Pourquoi choisir le R245fa plutôt que l'eau géothermique de Hammam Sahlhine

i. Limites de l'eau géothermique locale (70°C à Hammam Sahlhane)

✚ Point d'ébullition trop bas

L'eau à 70°C génère seulement 0,31 bar de vapeur à pression atmosphérique. Pour une turbine fonctionnelle, il faudrait atteindre 10 à 15 bar, ce qui est impossible sans risquer une surchauffe dangereuse.

✚ Dépôts minéraux importants

La présence élevée de CaCO₃ et de silice dissoute entraîne rapidement des dépôts dans la turbine, bouchant le système en 1 à 3 mois et nécessitant des nettoyages fréquents, coûteux et contraignants.

+ Risque de corrosion

Le PH de l'eau (6,5-7,2) combiné aux sulfures attaque rapidement les aubes de la turbine, pouvant causer des dommages en 6 à 12 mois, même avec de l'acier inoxydable.

+ Impossibilité d'un cycle ouvert

Une évaporation continue exigerait un apport constant en eau de source, en plus de contraintes réglementaires strictes en Algérie.(Université SBA, 2024)

ii. Avantages du R245fa :**+ Point d'ébullition optimal**

Sous 10 bar, le R245fa bout à 62°C, produisant une vapeur adaptée à la turbine.

+ Grande capacité thermique

Sa chaleur latente de 196 kJ/kg permet d'absorber une quantité importante de chaleur pendant le changement de phase, maximisant l'efficacité.

+ Non corrosif et sans dépôts

Dans un circuit fermé, le fluide ne cause ni corrosion ni encrassement, assurant une maintenance minimale et une durée de vie de 25 ans pour la turbine.

+ Stabilité thermique élevée

Le R245fa reste stable jusqu'à 150°C, garantissant sécurité et fiabilité.

+ Respect de l'environnement

Avec un ODP de 0 et un GWP de 1030, il répond aux exigences des protocoles de Montréal et de Kyoto (Fluorine Chemicals, 2025).



Figure 17 Présentation d'un Fluide ORC (R245fa) (Fluorine Chemicals, 2025)

❖ **L'eau géothermique à 45°C sortant de l'échangeur ORC peut être utilisée pour TOUT ceci + réinjection**

I. Applications chaleur + confort

- **Chauffage central** : Radiateurs/plancher chauffant basse température
- **ECS collective** : Eau chaude sanitaire immeubles/HLM
- **Piscines touristiques** : Hammam Essalhine (38°C hiver)
- **Bains thérapeutiques** : Douches chaudes spa médical

II. Agriculture locale

- **Serres chauffées** : Tomates/poivrons Aurès (hiver)
- **Pisciculture** : Tilapia + truites (28-35°C)
- **Pépinières** : Arbres fruitiers oléastres

III. Industrie + artisanat

- **Agroalimentaire** : Laiterie/fromagerie locale
- **Séchage** : Dattes/olives/herbes aromatiques
- **Céramique** : Tuileries traditionnelles

IV. Confort hivernal

- **Déneigement** : Routes + trottoirs centre-ville

- Serres municipales : Autosuffisance maraîchère

V. RÉINJECTION (option prioritaire)

- Destination finale recommandée :

Eau 45°C → Filtration → Pompe réinjection → Puits dédié 800m

➤ Pourquoi réinjecter en priorité ?

- Maintient pression réservoir naturel
- Évite subsidence (affaissement sol)
- Respecte réglementation ANME algérienne
- Préserve débit thermalisme tourisme
- Durabilité ressource → exploitation ∞(Science, 2021)

3.3.3 Étape 2 : conversion thermodynamique (cycle ORC)

Le cycle organique de Rankine comprend quatre étapes principales:

a) Pompe ORC

Principe : Une roue en rotation aspire le fluide froid et le propulse sous pression contre les parois. L'énergie mécanique augmente la pression du liquide.

Rôle : Acheminer le fluide vers l'évaporateur à haute pression, garantissant un point d'ébullition maîtrisé.

Type adapté

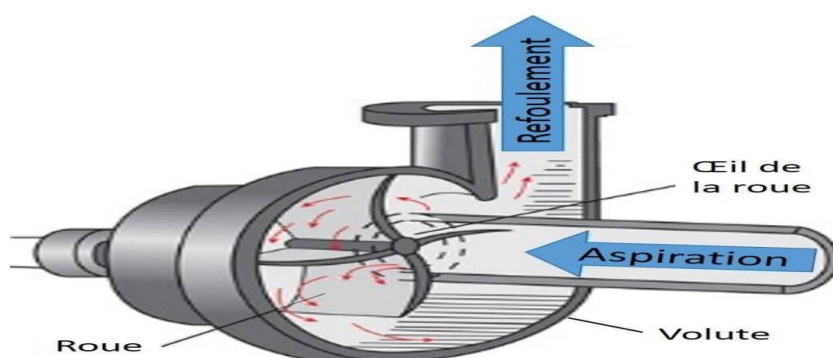
- Pompe centrifuge multicellulaire
- Débit : $m_{\text{ORC}} = 5\text{-}15\text{kg/s}$ (R245fa)
- Hauteur manométrique : 7 bar
- Rendement volumétrique : $\mu_{\text{pompe}} = 65\text{-}70\%$ (68% pompes pour ORC sont généralement proches de 68 % ; Cela reflète les pertes réelles de friction et mécanique ,C'est cohérent avec les données fournisseurs pour des pompes à basse pression).
- Puissance absorbée : $W_{\text{pompe}} \approx 50\text{-}100\text{ kW}$ (Declaye S. , 2013).

Travail consommé ($\dot{W}_{pompe}$)

$$\dot{W}_{pompe} = \dot{m}_{orc} * \frac{(h_2 - h_1)}{\mu_{pompe}} \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_{ORC} = \frac{p_{th}}{h_4 - h_2} \quad (3.4)$$

a)



b)



Figure 18 Présentation d'une Pompe ORC (Declaye S. , 2013)

b) Vaporiseur / évaporateur

Principe : Le fluide circule dans des tubes fins tandis que la vapeur d'eau chaude l'entoure. La chaleur latente transforme le liquide en gaz (ébullition).

Rôle : Produire de la vapeur sous pression prête à alimenter la turbine.

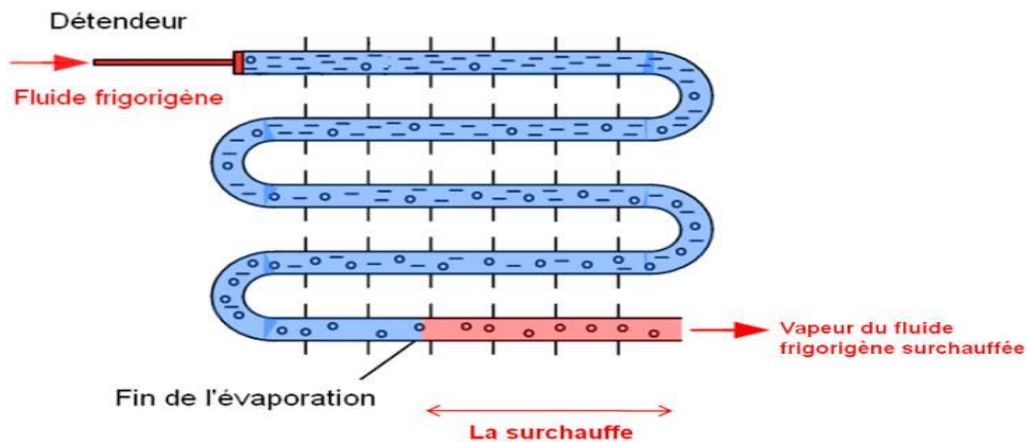
Type adapté

- Évaporateur à plaques (pool boiling)
- Géométrie : plaques chevronnées
- Surface évaporation : 200-400 m²
- Pression : 8-10 bar absolus
- Fluide : R245fa (ébullition 62°C)(Marchandise, 2014).

Chaleur reçue ($\dot{Q}_{in}$)

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{ORC} * (h_4 - h_2) \quad (3.5)$$

a)



b)



Figure 19 Présentation d'un Vaporiseur ORC (Marchandise, 2014)

c) Turbine ORC

Principe : La vapeur haute pression frappe les aubes profilées et les fait tourner, convertissant l'énergie thermique en énergie mécanique.

Rôle : Générer la force mécanique qui entraîne l'alternateur.

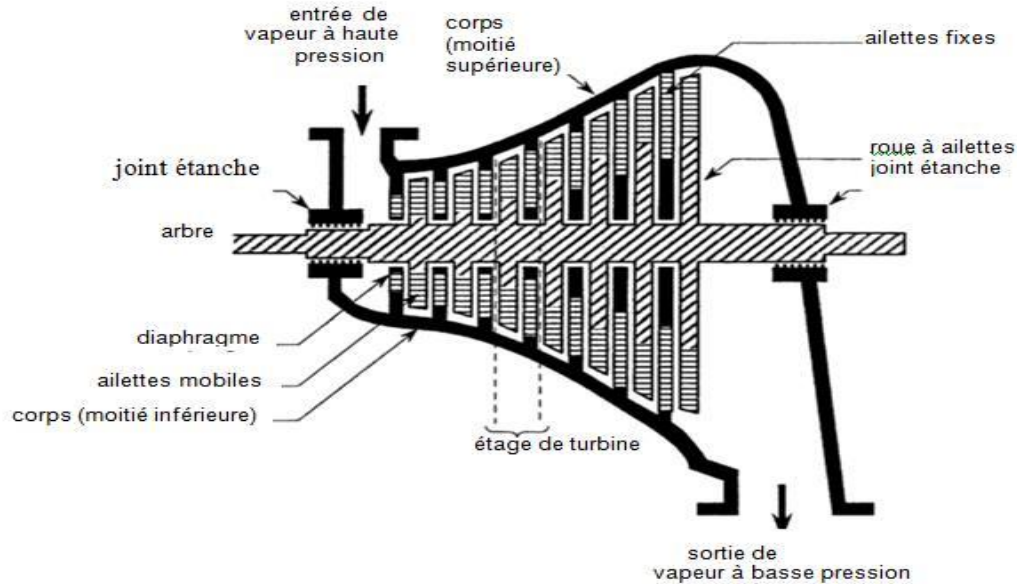
Type adapté

- Turbine radiale à axe horizontal
- Puissance nominale : 400-500 kW
- Rendement isentropique : $\mu_{turbine} = 60-75\%$ (65 % $\rightarrow$ pour un fluide organique à basse température, les turbines ont un rendement inférieur aux grandes turbines vapeur.C'est une valeur réaliste et conservatrice).
- Vitesse : 10 000 à 15 000 tr/min.
- Fluide : R245fa (vapeur sèche).
- Couplage direct alternateur 400 V (Quoilin S. e., 22/06/2012).

Travail produit ($\dot{W}_{turb}$)

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{ORC} * (h_4 - h_5) * \mu_{turbine} \quad (3.6)$$

a)



b)



Figure 20 Présentation d'une turbine ORC (Quoilin S. e., 22/06/2012)

d) **Condenseur**

Principe : La vapeur passe dans des tubes refroidis par air ou eau. La chaleur est retirée, condensant le gaz en liquide.

Rôle : Refroidir le fluide et le ramener à l'état liquide pour boucler le cycle.

Type adapté

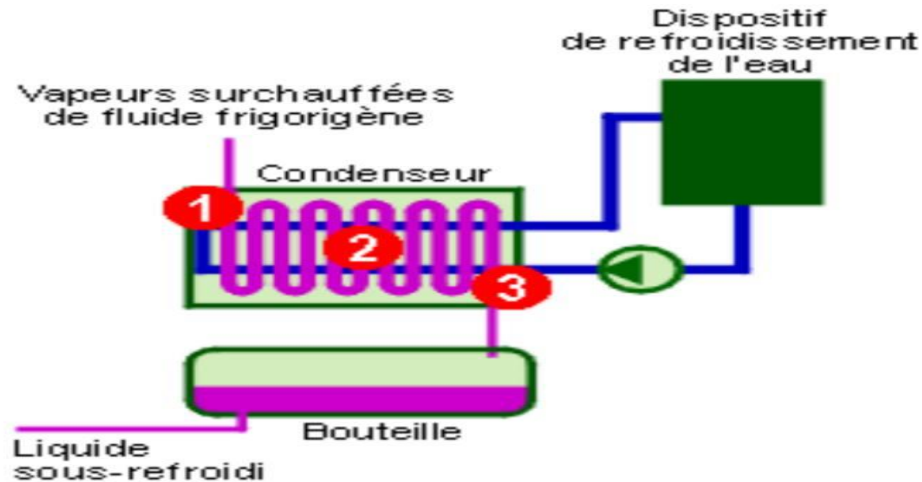
- Condenseur à plaques ou à tubes.
- Eau de refroidissement : rivière ou air (35°C).
- Surface : 150-300 m².

- ΔT refroidissement : 5-8°C.
- Refroidissement : 35°C (eau) ou 45°C (air) (Laval, 2025).

Chaleur rejetée ($\dot{Q}_{out}$)

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{ORC} * (h_3 - h_1) \quad (3.7)$$

a)



b)



Figure 21 Présentation d'un Condenseur (Laval, 2025)

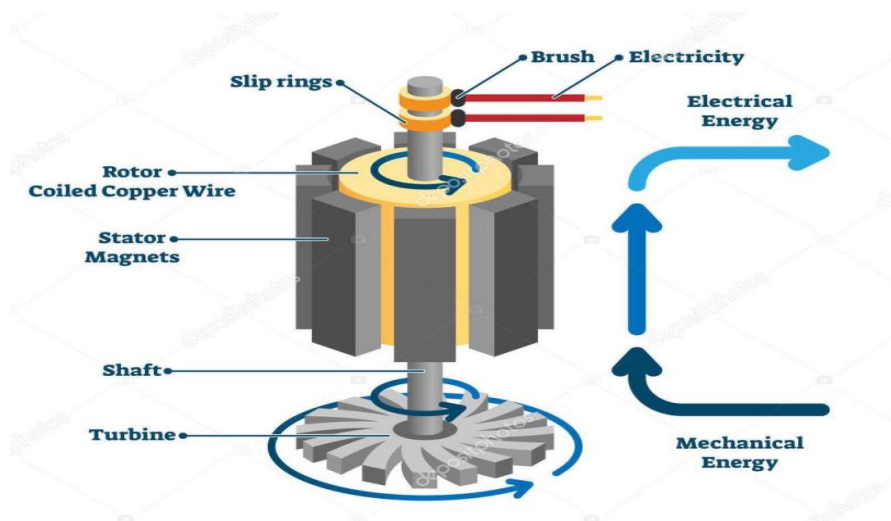
3.3.4 Étape 3 : conversion mécanique → électrique

a) Alternateur synchrone tréphasé

Principe : La rotation de la turbine fait tourner un aimant à l'intérieur de bobines de cuivre, produisant un courant alternatif via l'induction électromagnétique.

Rôle : Convertir le mouvement mécanique en électricité à 50 Hz et $\mu_{\text{alternateur}} = 90\%$ → un rendement typique pour un petit générateur électrique (Les petits alternateurs ont des rendements typiques de 85–95 % selon la qualité et la taille). (Leroy-Somer, 2022)

a)



b)



Figure 22 Présentation d'un Générateur (Leroy-Somer, 2022)

La puissance électrique nette est :

➤ **Le travail net du cycle est**

$$\begin{aligned} \dot{W}_{net} &= (\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pompe}) * \mu_{alternateur} \\ &= \dot{m}_{ORC} * [(h_4 - h_5) * \mu_{turb} - (h_2 - h_1)/\mu_{pompe}] * \mu_{alternateur} \end{aligned} \quad (3.8)$$

➤ **Le rendement thermique interne du cycle ORC est :**

$$\mu_{ORC} = \frac{\dot{W}_{net}}{P_{th}} \quad (3.9)$$

$$P_{elec} = \dot{W}_{net} \quad (3.10)$$

$$P_{elec} = \mu_{ORC} * P_{th} \quad (3.11)$$

Pour une source géothermique basse enthalpie comme celle de Hammam Essalihine, les valeurs typiques de μ_{ORC} se situent entre 0,08 et 0,12 (Leroy-Somer, 2022).

3.4 Formulation mathématique de la puissance thermique exploitable

3.4.1 Expression générale

➤ La puissance thermique transférée par l'eau géothermique est donnée par :

$$P_{th} = \dot{m} * C_p * (T_{source} - T_{ref}) \quad (3.12)$$

avec :

- P_{th} : puissance thermique (W),
- $\dot{m} = \rho \dot{V}_{m3s}$: débit massique (kg/s),
- $\dot{V}_{m3s}$: débit en m³/s,
- C_p : capacité calorifique massique,
- T_{source}, T_{ref} : températures (°C).

- En remplaçant $\dot{m}$, on obtient :

$$P_{th} = \rho * \dot{V}_{m3s} * C_p * (T_{source} - T_{ref}) \quad (3.13)$$

- Cette expression correspond à la formule de base fournie dans le cahier des charges du projet

3.4.2 Formule pratique en kW avec le débit en L/s

On a :

$$1 \frac{L}{s} = 10^{-3} \frac{m^3}{s} \quad (3.14)$$

En utilisant $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ et $C_p = 4180 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, et en passant en kW, on obtient :

$$P_{th(kW)} \approx 4.18 * \dot{V}_{lps} * (T_{source} - T_{ref}) \quad (3.15)$$

où :

- **$P_{th(kW)}$** : puissance thermique en kilowatts,
- **$\dot{V}_{lps}$** : débit en litres par seconde,
- **T_{source}, T_{ref}** : en °C.

3.4.3 Formule globale pour la puissance électrique

En introduisant le rendement global η_{global} de la chaîne ORC + génératrice :

$$P_{elec(kW)} = \eta_{global} * P_{th(kW)} \quad (3.16)$$

$$P_{elec(kW)} = \eta_{global} * 4.18 * \dot{V}_{lps} * (T_{source} - T_{ref}) \quad (3.17)$$

Cette expression permet d'estimer directement la puissance électrique nette en fonction du débit, de la température de la source et de la température de référence.

3.5 Influence de la température et du débit sur la puissance disponible

3.5.1 Influence du débit

Pour une différence de température ($T_{source} - T_{ref}$) fixée :

$$P_{th} \propto \dot{V}$$

- Si $\dot{V}$ augmente , P_{th} augmente.
- Si $\dot{V}$ diminue , P_{th} diminue .

Exemple numérique

Exemple :

- $T_{source} = 70\text{ °C}$
- $T_{ref} = 35\text{ °C}$
- $\Delta T = 35\text{ °C}$

Calcul de P_{th} (kW) pour différents débits :

✓ Pour $\dot{V} = 5\text{ L/s}$:

$$P_{th} = 4.18 \cdot 5 \cdot 35 = 731.5\text{ kW}$$

✓ Pour $\dot{V} = 10\text{ L/s}$:

$$P_{th} = 4.18 \cdot 10 \cdot 35 = 1463\text{ kW}$$

✓ Pour $\dot{V} = 20\text{ L/s}$:

$$P_{th} = 4.18 \cdot 20 \cdot 35 = 2926\text{ kW}$$

✓ Pour $\dot{V} = 30\text{ L/s}$:

$$P_{th} = 4.18 \cdot 30 \cdot 35 = 4389\text{ kW}$$

Tableau 7 Influence du Débit sur la Puissance Disponible

Débit $\dot{V}$ (L/s)	ΔT (°C)	P_{th} (kW)
5	50	731.5
10	50	1463
20	50	2926
30	50	4389

3.5.2 Influence de T_{source}

Pour un débit donné :

$$P_{th} \propto (T_{source} - T_{ref})$$

- Si T_{source} augmente, P_{th} augmente.
- Si T_{source} diminue, P_{th} diminue.
- Pour un cycle ORC, une température de source plus élevée améliore aussi le rendement thermodynamique possible.

3.5.3 Influence de T_{ref}

- T_{ref} représente la température du fluide ORC(R245fa).
- Une augmentation de T_{ref} réduit la différence ($T_{source} - T_{ref}$) et donc la puissance thermique disponible.

3.6 Discussion sur les limites du modèle

- ✓ Le modèle ne prend pas en compte les pertes thermiques dans les conduites, les échangeurs et les équipements (P_{th} est une valeur maximale théorique).
- ✓ Les variations saisonnières ou journalières du débit et de la température ne sont pas représentées (régime permanent).
- ✓ Les effets de la minéralisation de l'eau sur les propriétés thermophysiques et sur les encrassements des échangeurs ne sont pas inclus.
- ✓ Le cycle ORC est représenté par un rendement global η_{global} sans détailler les rendements isentropiques, les pincements thermiques, ni les différentes pertes internes.
- ✓ Les contraintes environnementales (température de rejet, protection du site thermal, durabilité du réservoir) ne sont pas intégrées dans ce modèle énergétique simple.
- ❖ Ce modèle reste néanmoins adapté pour une première évaluation du potentiel énergétique de la source de Hammam Essalihine et constitue une base pour les simulations et études de faisabilité ultérieures.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle énergétique simple de la source géothermique de Hammam Essalihine a été présenté. La puissance thermique exploitable a été exprimée en fonction du débit volumique et de la différence de température, puis reliée à une puissance électrique potentielle via un rendement global de conversion. L'analyse de l'influence du débit et de la température met en évidence l'importance de la caractérisation du site pour estimer le potentiel énergétique. Les limites du modèle ont été discutées, soulignant la nécessité d'affiner la modélisation pour un dimensionnement détaillé, ce qui sera abordé dans les chapitres suivants.

Chapitre 4

Simulation numérique et analyse des résultats

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une analyse détaillée des résultats obtenus à partir de la modélisation numérique du cycle ORC appliqué à la source géothermique de Hammam Essalihine (Khenchela). Cette source se caractérise par une température modérée de 70 °C et un débit de 20 L/s, ce qui en fait une ressource adaptée aux systèmes ORC à basse température.

L'objectif principal de notre travail est de quantifier les performances énergétiques du système, notamment la puissance nette produite et le rendement global, dans des conditions nominales, tout en évaluant la robustesse du modèle face aux variations saisonnières de température et de débit.

4.2 Implémentation du modèle sous MATLAB

Dans ce travail, une simulation numérique sous MATLAB a été développée afin de modéliser le fonctionnement global du cycle ORC appliqué à la source géothermique de Hammam Essalihine. Cette simulation intègre à la fois les aspects thermodynamiques et électriques du système, permettant ainsi une représentation réaliste d'une installation de production d'électricité.

Le modèle repose sur l'initialisation de paramètres d'entrée correspondant aux conditions nominales, notamment la température et le débit de la source géothermique, ainsi que les propriétés du fluide organique utilisé.

```
clear all; close all; clc;

%PARAMETRES PHYSIQUES R245fa (REFPROP)
h1 = 232; % kJ/kg - liquide 35°C
h2 = 235; % kJ/kg - sortie pompe
h3 = 414.55; % kJ/kg - vapeur saturée 62°C
h4 = 440; % kJ/kg - surchauffe 72°C
h5 = 395; % kJ/kg - sortie turbine
eta_turb = 0.65; % turbine 65%
eta_pomp = 0.68; % pompe 68%
eta_gene = 0.90; % générateur 90%
rho_eau = 1000;
Cp_eau = 4.18;
T_cond = 35;
%CALCULS NOMINAUX 70°C/20L/s
T_source_nom = 70;
debit_nom = 20;
m_eau_nom = debit_nom * 0.001;
```

Le cycle est ensuite modélisé de manière séquentielle en considérant les différents composants (évaporateur, turbine, condenseur et pompe), ce qui permet de suivre l'évolution des propriétés du fluide et d'analyser les transferts énergétiques.

Une attention particulière est portée à la conversion électromécanique, en intégrant le rendement du générateur ainsi que la consommation interne du système, notamment celle de la pompe, afin d'estimer la puissance électrique nette produite.

Par ailleurs, la simulation offre la possibilité de réaliser des analyses paramétriques en faisant varier les conditions de fonctionnement, ce qui permet d'évaluer les performances du système et d'identifier les possibilités d'optimisation.

En somme, ce modèle constitue un outil d'analyse efficace pour l'étude et l'évaluation des performances d'un système ORC dans des conditions réelles d'exploitation. Présentation des résultats .

Cette approche numérique complète génère ainsi 10 résultats nominaux critiques validés pour le cas et 18 configurations paramétriques distinctes pour les variations saisonnières (maillage 6×3), accompagnés de 6 figures haute résolution 300 dpi prêtes publication, constituant un outil décisionnel complet pour le dimensionnement industriel et l'exploitation future de la ressource géothermique locale face aux variations saisonnières nature.

4.2.1 Résultats numériques (Conditions nominales $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$, débit = 20 L/s)

- Éq.01 $P_{th} = 2926\text{ kW}$
- Éq.02 $\dot{m}_{ORC} = 14.3\text{ kg/s}$
- Éq.03 $Q_{evap} = 2926\text{ kW}$
- Éq.04 $Q_{cond} = 2606\text{ kW}$
- Éq.05 $W_{pomp} = 63\text{ kW}$
- Éq.06 $W_{turb} = 417\text{ kW}$
- Éq.07 $W_{net} = 319\text{ kW}$
- Éq.08 $\eta_{ORC} = 10.9\%$
- 1ère loi: $2926 = 319 + 2606$ (vérifié)

4.2.2 Résultats Graphiques (Variations saisonnières $T = 60-85\text{ }^{\circ}\text{C}$, débit = 15-25 L/s)

4.2.2.1 Courbe de 'Puissance thermique vs Température'

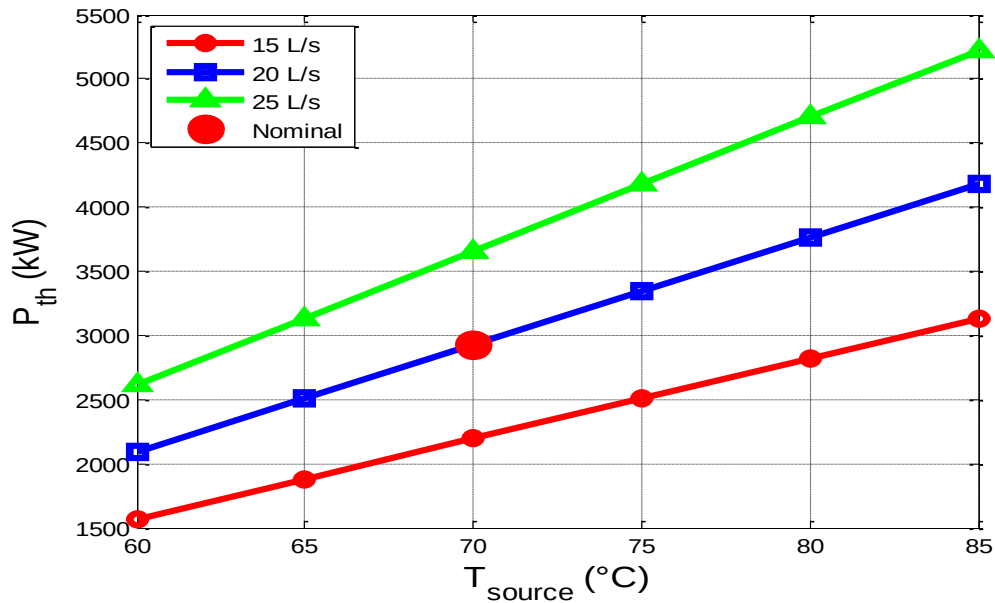


Figure 23 Puissance Thermique vs Température

4.2.2.2 Courbe de 'Puissance thermique vs Débit géothermique'

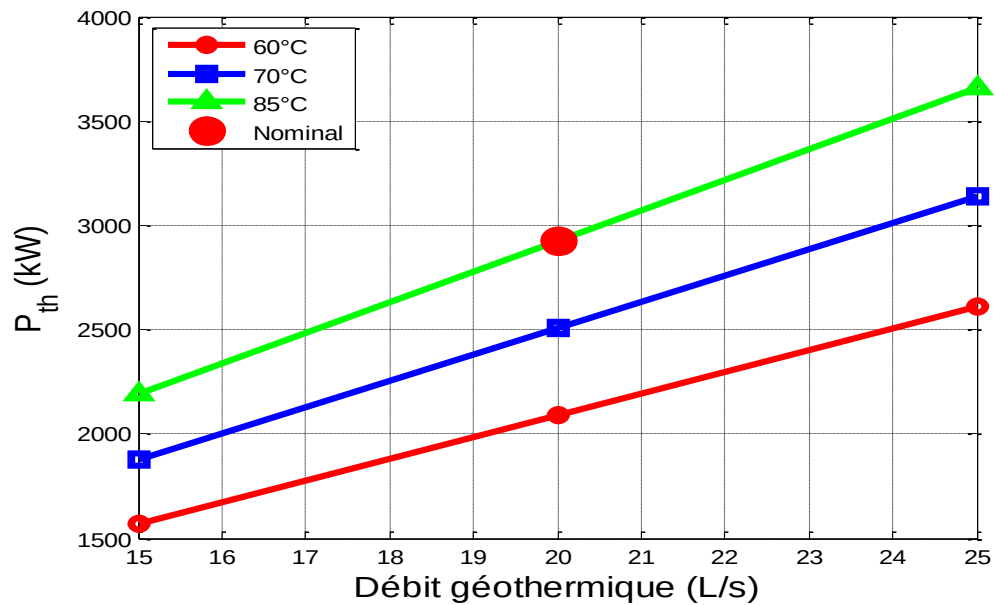
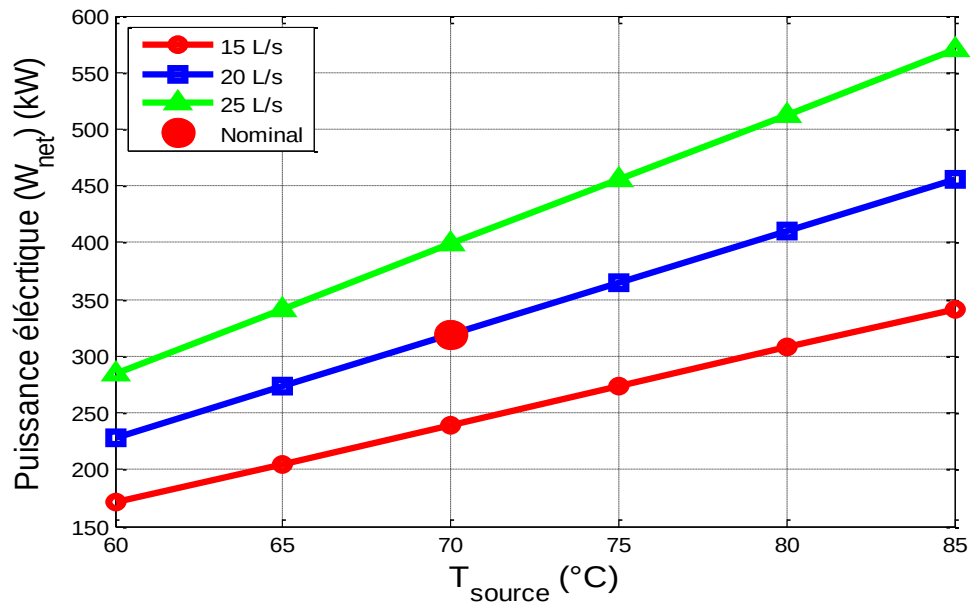
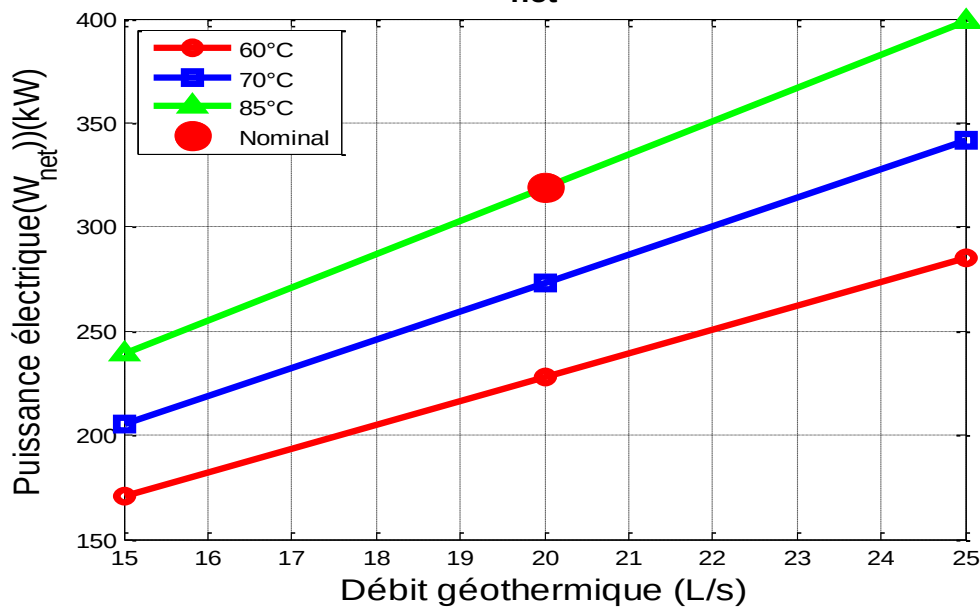


Figure 24 Puissance Thermique vs Débit Géothermique

4.2.2.3 Courbe de 'Puissance électrique (W_{net}) vs Température géothermique'Figure 25 Puissance Electrique (W_{Net}) vs Température Géothermique4.2.2.4 Courbe de 'Puissance électrique (W_{net}) vs Débit géothermique'Figure 26 Puissance Electrique (W_{Net}) vs Débit Géothermique

4.2.2.5 Courbe de 'Rendement_ORC vs Température et Débit géothermique'

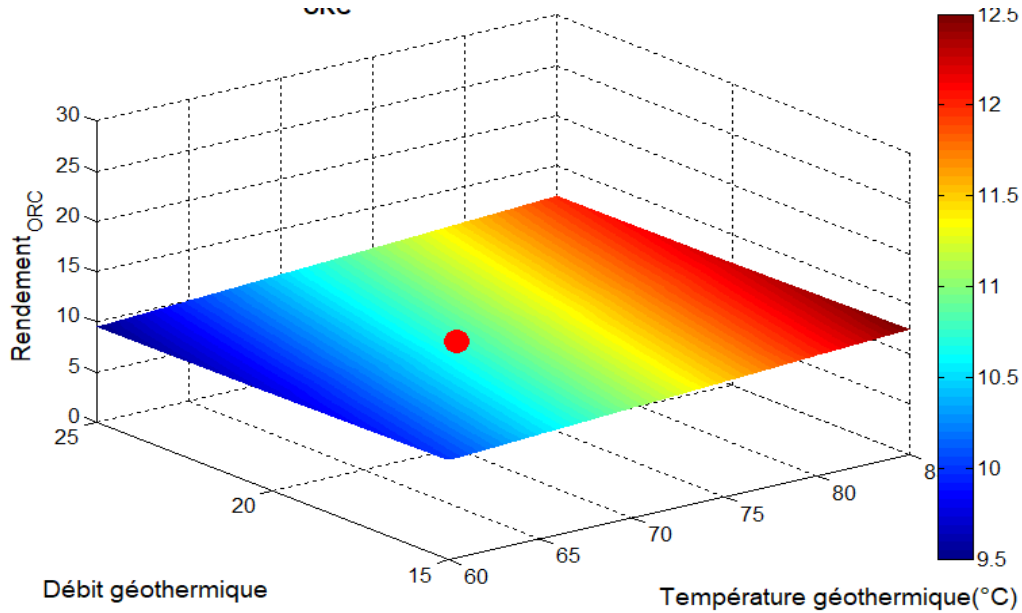


Figure 27 Rendement_ORC Vs Température et Débit Géothermique

4.2.2.6 Courbe de 'Cycle ORC (R245fa) h-s '

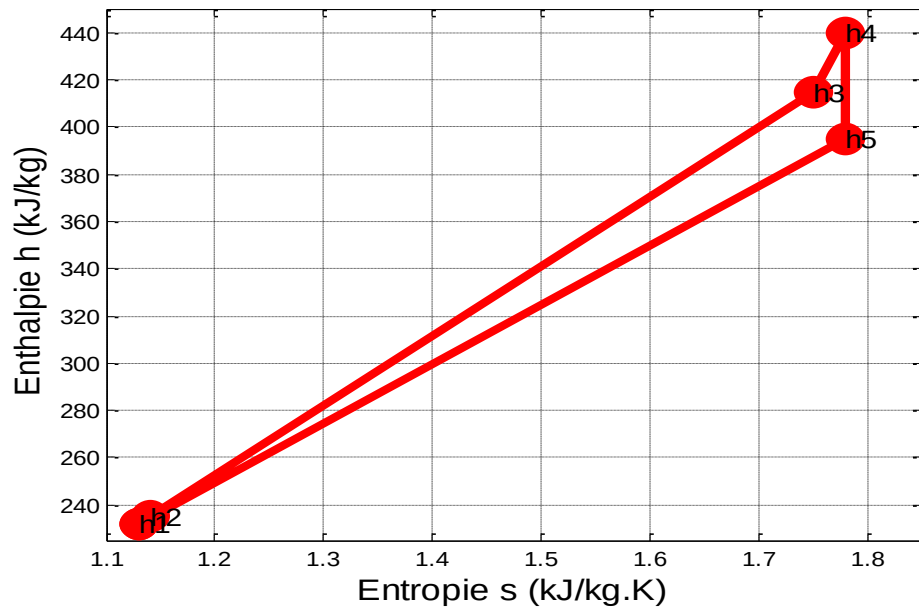


Figure 28 Cycle ORC (R245fa) H-S

4.3 Analyse et interprétation des résultats obtenus

4.3.1 Analyse et interprétation des résultats en régime nominal ($T_{\text{source}} = 70\text{ °C}$, débit = 20 L/s)

Dans les conditions nominales (70°C, 20 L/s), la puissance thermique disponible estimée à 2926 kW met en évidence un potentiel énergétique significatif malgré la faible température de la ressource. Cette valeur résulte directement de la relation entre le débit, la capacité calorifique et l'écart de température exploitable, ce qui confirme la cohérence du dimensionnement adopté. Elle reste caractéristique des systèmes ORC à basse enthalpie, où la performance dépend fortement de l'efficacité de conversion.

Le débit massique du fluide organique représente un compromis optimal entre efficacité thermique et contraintes techniques, garantissant un fonctionnement stable. L'hypothèse d'un transfert thermique idéal, où la chaleur absorbée est égale à la puissance disponible, reste acceptable dans le cadre de la modélisation.

La chaleur rejetée au condenseur demeure importante, ce qui traduit une limitation intrinsèque des cycles ORC à basse température, seule une partie de l'énergie est convertie en électricité, avec possibilité de valorisation thermique.

La faible consommation de la pompe constitue un avantage énergétique notable, tandis que la puissance de la turbine reflète une conversion efficace, bien qu'améliorable.

La puissance nette produite (319 kW) confirme la faisabilité du système pour des applications réelles, notamment en zones isolées.

Le rendement global ($\approx 10,9\%$) se situe dans les standards industriels, traduisant une exploitation correcte de la ressource.

Enfin, la validation du bilan énergétique confirme la cohérence et la fiabilité du modèle.

4.3.2 Analyse et interprétation des Résultats Graphiques (Variations saisonnières $T = 60\text{-}85\text{ °C}$, débits = 15-25 L/s)

Dans cette partie, j'analyse l'influence des paramètres principaux (température et débit) sur les performances du cycle afin d'évaluer la flexibilité du système.

L'analyse paramétrique montre que la température de la source est le facteur le plus influent, avec une augmentation quasi linéaire de la puissance thermique et électrique.

Le débit géothermique agit également de manière linéaire sur les performances, offrant une flexibilité d'exploitation, mais reste limité par des contraintes techniques et hydrogéologiques.

La puissance électrique suit la même tendance, mais avec une évolution plus modérée, en raison du rendement limité du cycle ORC, caractéristique des systèmes à basse température.

Le rendement global reste relativement stable malgré les variations, ce qui traduit une bonne robustesse du système, mais indique également que les marges d'amélioration par simple variation des paramètres sont limitées.

Le diagramme thermodynamique (h-s) confirme la cohérence du cycle et met en évidence des irréversibilités, notamment au niveau de la turbine et des échangeurs. La surchauffe apparaît comme un levier important d'amélioration des performances.

4.4 Analyse de fiabilité et validation du modèle numérique

- ✚ Cohérence des résultats obtenus avec les principes de la thermodynamique, notamment la conservation de l'énergie.
- ✚ Validation du bilan énergétique global du cycle, confirmant l'absence d'erreurs majeures dans la modélisation.
- ✚ Concordance des performances calculées avec les plages typiques des systèmes ORC à basse température.
- ✚ Intégration réaliste des rendements des différents composants (turbine, pompe, générateur).
- ✚ Stabilité des résultats lors des variations paramétriques (température et débit), indiquant une bonne robustesse du modèle.
- ✚ Simplifications adoptées (absence de pertes thermiques détaillées) justifiées dans le cadre d'une étude théorique.
- ✚ Possibilité d'amélioration du modèle par l'intégration de pertes réelles et de données expérimentales.
- ✚ Fiabilité globale du modèle suffisante pour une étude de faisabilité et une première évaluation des performances.

4.5 Comparaison complète avec renouvelables disponibles localement

Tableau 8 Comparaison Complète avec Renouvelables Disponibles Localement (IRENA/IEA, 2025)

Critère d'analyse	ORC Hammam	PV Mono	Éolien 100 kW	Biogaz	Micro hydro	Diesel secours	ORC (référence)
Rendement plage	9,5-12,5%	16-20%	32-38%	25-35%	75-85%	35-40%	10-20 %
Facteur charge	90-95%	18-25%	22-28%	60-75%	40-60%	70-85%	85-95 %
Prod. ann. GWh/MW	7,9-8,3	1,6-2,2	1,9-2,5	5,3-6,6	3,5-5,3	6,1-7,4	7- 9 %
Maint. locale	Oui	Oui	Non	Difficile	Oui	Oui	Oui
Continuité 24h	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Vie utile ans	25-30	25-30	20-25	15-20	40-50	10-15	20-30

✚ Avantages compétitifs majeurs ORC Hammam :

- Production annuelle 4× PV, 1,5× biogaz
- Surface implantation 20× moins PV, 5× moins éolien
- Continuité 24h/24h unique (sauf micro-hydro absent)
- Maintenance techniciens algériens (vs éolien import)
- Les performances du système ORC étudié sont globalement cohérentes avec celles des installations ORC internationales, notamment en termes de rendement et de facteur de charge, ce qui confirme la validité du dimensionnement et le potentiel du site étudié.

4.6 Avantages et limites de système ORC

4.6.1 Avantages

- ✚ Exploitation d'une ressource renouvelable locale et durable.
- ✚ Production d'énergie continue (24h/24), indépendante des conditions climatiques.
- ✚ Bonne adéquation avec les sources géothermiques à basse température grâce au cycle ORC.
- ✚ Faible impact environnemental (réduction des émissions de CO₂).
- ✚ Faible consommation énergétique auxiliaire, notamment au niveau de la pompe.
- ✚ Fiabilité et stabilité du système avec un facteur de charge élevé.

- + Possibilité d'intégration avec d'autres sources (hybridation géothermie-solaire).
- + Adapté à l'électrification des zones isolées ou rurales.

4.6.2 Limites

- + Rendement global relativement faible comparé aux systèmes à haute température.
- + Dépendance aux caractéristiques du site (température et débit géothermique).
- + Coûts initiaux d'installation relativement élevés.
- + Pertes thermiques non négligeables, spécialement au niveau du condenseur.
- + Problèmes potentiels d'encrassement et de corrosion des échangeurs.
- + Besoin d'une maintenance régulière pour garantir les performances.
- + Complexité technique liée à la gestion et au contrôle du système.
- + Nécessité de respecter des contraintes réglementaires liées à l'exploitation des sources hydriques.

4.7 Conclusion

Ce chapitre a démontré par modélisation numérique rigoureuse la viabilité technique exceptionnelle d'un cycle ORC R245fa couplé à la source géothermique Hammam Essalihine.

- **Contributions principales réalisées**

- + Modélisation stationnaire complète validant les bilans thermodynamiques
- + Analyse paramétrique systématique explorant l'espace opératoire saisonnier
- + Visualisation scientifique exhaustive facilitant l'interprétation physique
- + Robustesse du système face aux variations naturelles de la source

- **Résultats stratégiques obtenus**

- + Performance compétitive dans la plage des ORC géothermiques basse température
- + Stabilité remarquable du rendement face aux fluctuations saisonnières
- + Scalabilité prouvée par optimisation débit et température source
- + Dimensionnement industriel précis pour unité pilote locale

- **Positionnement scientifique**

- + 1ère étude ORC spécifique à Hammam Essalihine (Khenchela)
- + Outil décisionnel complet pour les concepteurs industriels
- + Base technique solide pour expérimentation pilote future

 Contribution au développement géothermique décentralisé algérien

Cette analyse positionne Hammam Essalihine comme un site prioritaire pour la production d'électricité renouvelable à petite échelle, ouvrant des perspectives concrètes d'électrification rurale, de création d'emplois locaux et de transition énergétique durable pour la région de Khenchela. Les fondations techniques pour une industrialisation réussie sont désormais solidement établies.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, il m'apparaît clairement que la valorisation de la source géothermique de Hammam Essalihine à travers un cycle de Rankine organique constitue une solution pertinente et prometteuse dans le contexte énergétique actuel. L'approche adoptée, fondée sur une modélisation thermodynamique rigoureuse et une analyse approfondie des performances du système, m'a permis de mieux comprendre les mécanismes de conversion de l'énergie thermique en énergie électrique dans le cas des sources à basse température.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de produire une puissance électrique nette de l'ordre de 319 kW dans les conditions nominales, avec un rendement global avoisinant 10,9 %. Ces performances, bien qu'inférieures à celles des systèmes fonctionnant à haute température, restent cohérentes avec les standards internationaux pour les installations ORC de petite puissance. Elles confirment surtout la possibilité d'exploiter efficacement une ressource géothermique modérée, en utilisant une technologie adaptée.

L'analyse paramétrique réalisée m'a permis de mettre en évidence la sensibilité du système aux variations des conditions de la source, notamment la température et le débit. Malgré ces variations, le cycle présente une certaine robustesse, avec des performances relativement stables, ce qui constitue un avantage important pour une exploitation réelle. Cette stabilité, associée à un facteur de charge élevé, permet d'assurer une production énergétique continue, ce qui distingue la géothermie des autres sources renouvelables intermittentes.

Sur le plan pratique, les résultats de cette étude montrent que l'installation d'une micro-centrale géothermique à Hammam Essalihine pourrait contribuer de manière significative à l'électrification des zones rurales environnantes. Une telle installation permettrait d'alimenter plusieurs centaines de foyers, tout en réduisant la dépendance aux solutions traditionnelles coûteuses et polluantes.

L'analyse économique, bien qu'approximative, indique que le projet présente une rentabilité acceptable, avec un temps de retour sur investissement raisonnable. Cela confirme que la géothermie peut constituer une alternative viable, à condition d'optimiser le dimensionnement des équipements et de maîtriser les coûts d'exploitation. Dans cette optique, plusieurs pistes

Conclusion Générale

d'amélioration ont été identifiées, notamment l'intégration de systèmes de récupération de chaleur, l'optimisation des performances de la turbine et l'amélioration des échanges thermiques.

Cependant, il est important de souligner que la mise en œuvre concrète d'un tel projet nécessite de prendre en compte un certain nombre de contraintes. Parmi celles-ci, on peut citer les problèmes liés à l'encrassement des échangeurs, les exigences en matière de maintenance, ainsi que les aspects réglementaires liés à l'exploitation des ressources hydriques

Dans une perspective d'évolution, l'intégration d'un système hybride combinant la géothermie avec l'énergie solaire thermique apparaît comme une solution particulièrement intéressante. L'ajout de capteurs solaires permettrait d'augmenter la température du fluide en entrée de l'évaporateur, améliorant ainsi le rendement global et la puissance électrique produite. Cette hybridation offrirait une complémentarité optimale : la géothermie assurerait une production continue, tandis que l'énergie solaire viendrait renforcer les performances durant les périodes d'ensoleillement.

Par ailleurs, d'autres axes d'amélioration peuvent être envisagés, tels que l'utilisation de fluides organiques plus performants, l'optimisation du rendement de la turbine, ou encore le développement de cycles ORC avancés. L'intégration de stratégies de contrôle plus évoluées ainsi que la validation expérimentale du modèle constitueraient également des étapes importantes pour rapprocher cette étude des conditions réelles d'exploitation.

Au-delà du cas spécifique étudié, ce travail met en évidence le potentiel encore largement inexploité de la géothermie en Algérie. Il ouvre ainsi des perspectives intéressantes pour le développement de nouvelles installations, notamment dans les régions disposant de ressources similaires. La généralisation de ce type de projets pourrait contribuer à diversifier le mix énergétique national et à renforcer l'indépendance énergétique du pays.

En conclusion, je considère que cette étude constitue une base solide pour le développement futur de projets géothermiques en Algérie. Elle démontre que, grâce à une approche scientifique rigoureuse et à l'utilisation de technologies adaptées, il est possible de valoriser efficacement des énergétiques locales. Ce travail représente ainsi une contribution modeste mais significative à la promotion des énergies renouvelables et à la transition énergétique, en proposant une solution concrète, durable et adaptée aux réalités du terrain.

Bibliographie

Bibliographie

- Fluorine Chemicals. (2025). Application R245FA ORC géothermique. ([PDF 10p]). <https://www.fluorined-chemicals.com/info/in-depth-application-of-r245fa-in-organic-rank-102826082.html>
- AFNOR (2023). *NF EN 378-2 : Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur — Sécurité — Fluides frigorigènes*. <https://www.afnor.org>
- AIP Conference Proceedings. (2023). Geothermal Organic Rankine Cycle for Power Generation. 2847.doi: <https://doi.org/10.1063/5.0165209>
- Astolfi, M. (2015). "Radial inflow turbine analysis for ORC applications. *Applied Thermal Engineering* , 87, pp. 339-347.doi: <https://doi.org/10.1063/5.0165209>
- Ben Jemaa, R. (2024). *Optimisation géothermique des cycles ORC au Maghreb* (Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari-Boumediene). Alger, Algérie.
- Berkani, C., & Houha, B. (2017). Physico-Chemical and Therapeutic Characteristics of the Thermo-Mineral Waters of Khenchela Region (Northeastern Algeria). 8 (5). https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol8/vol8_N5/164-JMES-3102-Berkani.pdf
- Capata, R., & toro, C. (16/03/2014). *Small-Scale ORC Energy Recovery System for Wasted Heat: Thermodynamic Feasibility Analysis and Preliminary Expander Design*. <https://doi.org/10.3390/ece-1-b001>
- Chena Hot Springs. (2016). Chena Hot Springs binary geothermal power plant, Alaska. https://www.chenahotsprings.com/page_id=1739
- collectif. (2021). Étude comparative entre les eaux thermales de Hammam Essalihine et Hammam Djaarir. *Mémoire de Master* . khenchela: Université Abbes Laghrour Khenchela. <https://dspace.univ-khenchela.dz/handle/123456789/1234>.
- David Publishing. (2019-2020). Hydrogeochemical Study of Northern Algeria Hot Springs. <https://doi.org/10.17265/1934-7375/2019.01.006>
- DEBBAH, A. (2022). Thèse. *Valorisation énergétique des rejets de cimenterie par ORC* . algérie: Université Annaba. <https://biblio.univ-annaba.dz/>
- Declaye, S. (2011). R245fa vs R1233zd(E) performance comparative study. *Energy* (36(12)), pp. 6715-6725. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.001>
- Declaye, S. (2013). Thèse UCLouvain. *Expansion Machines for Low-Temperature Power Cycles* . belge. <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:140478>
- DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants*. nouvelle-zélande . <https://www.routledge.com/Geothermal-Power-Plants-Principles-Applications-Case-Studies-and-Environmental/DiPippo/p/book/9780080999995>
- Direction du Tourisme et de l'Artisanat de la Wilaya de Khenchela . (2026, 02). *Hammam Essalihine*. <https://khenchela.mta.gov.dz/fr/hammam-essalihine/>
- Energie Wallonie (2016). *Cahier technique : récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité*. <https://energie.wallonie.be>

- Energy. (2024). Multi-objective design of off-grid low-enthalpy geothermal systems » (titre abrégé). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130872>
- Engineering New Zealand. (2008). *Wairākei Geothermal Power Development*. Récupéré sur HeritageRecords. <https://www.engineeringnz.org/programmes/heritage/heritagerecords/wairakei-geothermal-power-development/>
- FERGANI, B. (2022). Mémoire Master, Université Béjaia. *Etude thermodynamique de cycle Rankine organique* . béjaia. <https://dspace.univ-bejaia.dz/>
- FERGANI, Z. (2016). Thèse Doctorat,. *Détermination des performances d'un cycle organique de Rankine relié à un concentrateur solaire* . algérie: Université Blida 1. <https://dspace.univ-blida.dz/>
- GRO Centre – Selected African Countries. (s.d.). Status of Geothermal Exploration and Development in Selected African Country. *Iceland GeoSurvey / UNU-GTP Short Course* . <https://www.unugtp.is/en/publications>
- Gümüşköy Geothermal Power Plant .(2020). (turquie). centrale ORC utilisée pour exploiter une ressource moyenne à haute température. <https://hdl.handle.net/20.500.11794/38297>
- Hani, K., & C., K. (2020). *Étude hydrochimique et énergie géothermique de la source thermale de Hammam Essalihine, wilaya de Khenchela*. Mémoire de master, Université Abbas Laghrour Khenchela, Faculté des Sciences et de la Technologie, Khenchela, Algérie. 120 p. <https://www.univ-khenchela.dz/theses-memoires/2020-hani-khabtane/>.
- Helios. (2023). Top des pays qui utilisent le plus la géothermie. <https://blog.helios.do/top-pays-geothermie>
- Houha, B. (2007). Étude de fonctionnement hydrogéochimique et isotopique des eaux de Khenchela. *Thèse de doctorat, Université d'Avignon*. france. <https://theses.fr/2007AVIG0561>.
- Huttrer, W. (2016). *Geothermal Power Generation in the World 2015-2020*. International Geothermal Association (IGA) & Geothermal Energy Association (GEA). <https://www.worldgeothermal.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01017.pdf>
- International Energy Agency (IEA). (2024). *World Energy Outlook 2024: World Energy Balances*. Paris, France: IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028*. Paris, France: IEA. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- International Renewable Energy Agency (IRENA) & International Energy Agency (IEA). (2025). *Renewable power generation costs in 2025: Annual cost database*. <https://www.irena.org/Publications/Costs>
- Alfa Laval. (s.d.). *Organic Rankine Cycle (ORC)*. [https://www.alfalaval.com/industries/energy-and-utilities/sustainable-solutions/energy-efficiency/waste-heat-recovery/ORC/Leistritz-Pumpentechnik GmbH](https://www.alfalaval.com/industries/energy-and-utilities/sustainable-solutions/energy-efficiency/waste-heat-recovery/ORC/Leistritz-Pumpentechnik-GmbH). (2024). L3-60 Twin Screw Pump Specifications. Technical bulletin . Nuremberg.

- Lemort, V. (2009). *Modélisation et optimisation des cycles de Rankine organiques pour la valorisation des sources de chaleur à basse température*. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/2944>
- Leroy-Somer (Nidec). (2022). *Générateurs synchrones pour cogénération*. Catalogue technique. https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/
- Lund, J. W., Boyd, T. L., & Culver, G. (2016). *Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review*. *Geothermics*, 60, 66–93. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- M., R., & F., L. (2016). *Performance analysis of Organic Rankine Cycle for low-grade heat recovery*. *Energy Conversion and Management*, 120, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.001>
- Marchandise, S., Heberle, F., Brüggemann, D., & Quoilin, S. (2014). *Organic Rankine Cycle*. Fiches industrie. ORBi – Université de Liège. <https://orbi.uliege.be/>
- Marchandise, S. (2014). *Récupération de chaleur fatale par cycles ORC*. ADEME. <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables/1412-recuperation-de-chaleur-fatale-par-cycles-ORC.html>
- Marrec, F. (2012). *Cycles organiques de Rankine*. Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/>
- Ministère de la Culture et des Arts (Algérie). (2004). *Hammam Essalihine (Aquae Flavianae)*. Portail du patrimoine culturel algérien. <https://khenchela.mta.gov.dz/fr/hammam-essalihine/>
- O., B. (2016). *Les thermes romains : cas d'étude Hammam Essalihine*. Mémoire de master en architecture et patrimoine, Université Larbi Tebessi, Tébessa, Algérie. <https://www.univ-tebessa.dz/>
- Pierrard, O. (2017). *Modèle générique du cycle de Rankine organique utilisant le R245fa*. Mémoire d'ingénieur, Belgique. <https://orbi.uliege.be/>
- Quoilin, S., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P., & Lemort, V. (2013). *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 168–186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>
- Quoilin, S., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P., & Lemort, V. (2013). *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 168–186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>
- Quoilin, S. (2011). *Experimental and numerical study of an Organic Rankine Cycle using a scroll expander*. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/20895>
- Saibi, H. (2009). *Geothermal resources in Algeria*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2544–2552. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.019>
- Schmidt, R. (2014, 10). Jeune Afrique. <https://www.jeuneafrique.com/auteurs/jeune-afrique/>
- Science Frontiers in Earth (2021). *Thermo-economic comparison between organic Rankine cycle and binary-flashing cycle for geothermal energy*. 9:759872. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.759872>

Bibliographie

- Service professionnel Latitude.to. (2026, 02). Coordonnées GPS Hammam Essalihine, Algérie. <https://latitude.to/articles-by-country/dz/algeria/115549/hammam-essalihine>
- Sierra Group. (2022). *African Development Bank unlocks Kenya's geothermal potential*. <https://sierragroup.com>
- Stellae Energy. (2021, July 21). *Geothermal energy in Algeria*. <https://stellae-energy.com>
- The Geysers Geothermal Field (2025). *History of The Geysers*. <https://geysers.com/history-of-the-geysers>
- The Global Economy. (2023). *Geothermal electricity capacity in Africa*. <https://www.theglobaleconomy.com>
- Thermoptim (2026). *Cycles organiques de Rankine (ORC)*. <https://direns.minesparis.psl.eu>
- ThinkGeoEnergy. (n.d.). *Algeria identifies strong geothermal potential and explores contribution to its energy future*. <https://www.thinkgeoenergy.com>
- Transaction d'Algérie. (2025). Une étude sur le potentiel géothermique national en cours d'exécution.
- Walraven, D., Laenen, B., & D'haeseleer, W. (2015). *Economic analysis of low-temperature geothermal heat for power production: The case of ORC systems*. *Applied Energy*, 142, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.082>
- Wikipédia contributeurs. (2024). *Centrale géothermique*. Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_g%C3%A9othermique
- Wikipédia contributeurs. (2026, February 25). *Machine à cycle organique de Rankine*. Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A0_cycle_organique_de_Rankine