



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Abbès Laghrou Khenchela
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département Ecologie et Environnement

Mémoire

De fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en Ecologie et Environnement

Option : Ecologie fondamentale et appliqué

Thème :

**Production de l'eau distillée à partir des eaux thermales de hammam
Essalihine (khenchela)**

Présenté par :

Merzougui Rayan

Djembia Naoual

Soutenu publiquement le 19/06/2025 devant le Jury de soutenance :

Encadrant : SEDRATI. A	(MCA)	Univ. Abbès Laghrou - Khenchela
Président : LARBAA. R	(MCA)	Univ. Abbès Laghrou - Khenchela
Examineur : CHENAKER. H	(MCB)	ENS. Des Forêt – khenchela
Co-Encadrant : MOHAMEDI. R	(Docteur)	Univ. El-Manar- tunis

2024/2025

Remerciements

Avant de commencer la présentation de ce travail, nous profitons de cette occasion pour remercier du fond du cœur le Bon Dieu, qui nous a donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à **Mohamed Reda Mohammadi** ainsi qu'à Monsieur **AbdeNour Sedrati**, pour leur accompagnement rigoureux, leurs conseils judicieux et leur grande disponibilité. Leur encadrement a constitué un appui essentiel tout au long de cette recherche, tant sur le plan scientifique que méthodologique.

Nos respectueux remerciements vont également aux membres du jury, Monsieur **Chenaker .H.** et Monsieur **Larbaa R.** pour avoir accepté favorablement d'en faire partie et de juger ce travail. Leur présence et leur lecture attentive représentent pour nous un honneur et un privilège.

Nous remercions également l'ensemble du corps enseignant pour la qualité de la formation dispensée tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, nous adressons notre gratitude la plus sincère à nos familles, pour leur soutien moral et affectif constant, leur patience et leurs encouragements indéfectibles, qui nous ont permis de franchir cette étape importante avec sérénité.

Dédicace

A la mémoire de mon père

**Qu'Allah le couvre de sa miséricorde et lui pardonne et l'accueille dans son vaste
Paradis, et qu'Allah rend de sa tombe un endroit spacieux et lumineux
A ma bougie qui a éclairé ma vie, et soudainement elle s'est éteinte, mon très cher
Défunt père.**

A ma chère mère

**Qui m'a soutenue toujours, m'a suivi pas à pas, qui grâce à ses prières, je réalise petit
À petit mon chemin vers le succès et le bonheur. Ses resteront pour toujours gravés dans mon
Cœur**

A mes chers frères « Raouf, Iliyes, Amjed »

Je vous souhaite tout le bonheur et la réussite dans votre vie et la bonne santé

A mes neveux

« Iskander , samir »

Puisse dieu vous donne santé, bonheur et surtout réussite

A la femme de mon frère Raouf « mirou »

Je demande a dieu de la protéger et de prolonger sa vie pour ses enfants

A tous ceux qui me sont chers

A toute la promotion master PE et EFA « 2024/2025 »



Dédicace

Louange à Dieu, qui m'a accordé la force, la persévérance et la lumière sur ce chemin exigeant.

Sans Sa miséricorde, rien de cela n'aurait été possible.

Je dédie ce travail, humble dans sa forme mais grand dans sa signification, à ceux qui ont été les

Piliers silencieux et les étoiles lumineuses de mon parcours :

À ma mère, mon refuge et ma lumière, dont l'amour inconditionnel, les sacrifices silencieux et Les prières constantes ont été le véritable moteur de ce succès. Cette réussite est avant tout la Tienne.

À mon père, source de sagesse et de force tranquille, pour sa confiance, son soutien indéfectible

Et les valeurs qu'il m'a transmises.

À mes frères, pour leur présence constante, leur bienveillance et leur souci sincère de me voir Réussir. Merci d'avoir toujours cru en moi.

À mes sœurs, pour leur tendresse, leur écoute et leur amour fraternel qui ont réchauffé les Moments difficiles.

À mon encadrant, pour son accompagnement précieux, ses conseils éclairés et sa confiance tout

Au long de ce travail. Sa rigueur et son soutien ont été des repères essentiels dans mon Cheminement académique.

Je vous dédie ce travail avec toute ma gratitude, mon respect et mon affection sincère.

NAOUAL 

Résumé

Dans un contexte de stress hydrique croissant et de transition énergétique, il est impératif de valoriser les ressources naturelles locales de manière stratégique. Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de durabilité en examinant la faisabilité de produire de l'eau distillée à partir des eaux thermales de **Hammam Essalihine.**, situées dans la wilaya de Khenchela (Algérie). Ces eaux, naturellement chaudes et minéralisées, présentent un potentiel thermique exploitable pour des procédés de distillation à faible consommation énergétique.

Le travail a consisté à caractériser physico-chimique les eaux thermales, à comparer différentes techniques de distillation (simple, solaire, sous vide) et à évaluer la qualité de l'eau distillée obtenue. Une attention particulière a été portée à l'impact environnemental et à l'efficacité énergétique des procédés. Les résultats montrent que la **distillation des eaux thermales** constitue une alternative prometteuse, tant sur le plan écologique qu'économique, dans le contexte climatique de la région étudiée.

Pour répondre à des besoins locaux en **eau distillée** tout en réduisant l'empreinte environnementale. Elle ouvre la voie à de futures applications à plus grande échelle et à la diversification des usages des eaux thermales en Algérie.

Mots-clés : Hammam Essalihine, distillation, eaux thermales, eau distillée.

English Abstract

In a context of increasing water stress and energy transition, the valorization of local natural resources has become a strategic necessity. This thesis is part of a sustainable development approach by studying the possibility of producing distilled water from the thermal waters of **Hamam Essalihine**, located in the wilaya of Khenchela (Algeria). These naturally hot and mineral-rich waters offer thermal potential that can be exploited for low-energy **distillation** processes.

The work involved a physicochemical characterization of the **thermal waters**, a comparison of different distillation techniques (simple, solar, vacuum), and an assessment of the quality of the distilled water obtained. Particular attention was given to the environmental impact and energy efficiency of the processes. The results show that the distillation of thermal waters represents a promising alternative, both ecologically and economically, within the climatic context of the studied region.

This solution meets local needs for **distilled water** while reducing the environmental footprint. It paves the way for future large-scale applications and the diversification of the uses of thermal waters in Algeria.

Keywords: Hamam Essalihine, distillation, thermal waters, distilled water.

الملخص باللغة العربية :

في سياق تزايد الضغوط على الموارد المائية والتحول الجاري في مجال الطاقة، تبرز الحاجة إلى تقييم الموارد الطبيعية المحلية بطريقة استراتيجية. وتندرج هذه الأطروحة ضمن مقاربة تهدف إلى تحقيق الاستدامة، من خلال دراسة جدوى إنتاج الماء المقطر انطلاقاً من **المياه الحموية لحمام الصالحين** الواقع في ولاية خنشلة (الجزائر).

تتميز هذه المياه المعدنية الساخنة بخصائص حرارية طبيعية قابلة للاستغلال في عمليات **التقطير**، مع استهلاك منخفض للطاقة.

وقد شمل العمل توصيفاً فيزيائياً وكيميائياً لهذه المياه الحموية ، إلى جانب مقارنة بين تقنيات تقطير مختلفة (البسيطة، الشمسية، والفراغية)، إضافة إلى تقييم جودة الماء المقطر الناتج عن هذه العمليات. كما تم إيلاء اهتمام خاص للأثر البيئي وكفاءة استخدام الطاقة.

وقد أظهرت النتائج أن تقطير المياه الحرارية يمثل خياراً واعداً من الناحيتين البيئية والاقتصادية، في ظل الظروف المناخية للمنطقة المدروسة، حيث يمكن أن يسهم في تلبية الاحتياجات المحلية من **الماء المقطر** مع تقليل البصمة البيئية. وهو ما يفتح المجال أمام تطبيقات مستقبلية على نطاق أوسع، ويعزز فرص تنويع استخدامات **المياه الحموية** في الجزائر.

الكلمات المفتاحية: حمام الصالحين، التقطير، المياه الحموية، الماء المقطر.

La Liste des matières:

Résumé

Abstract

المخلص

Liste des figures	i
Liste des tableaux	ii
Introduction Générale	01

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1.Histoire	3
2.Définition	4
3.Classification selon les régions	4
4.Origine de l'eau thermique.....	5
5.L'utilisation des eaux thermales	5
6. La géothermie.....	7
7.Les sources thermales de l'Algérie	8
8.Historique des procédés de distillation	8
8.1Définition de la distillation.....	9
8.2Définition de L'eau distillées	10
8.3Composition de l'eau distillée.....	10
8.4Principe de la distillation.....	11
8.5. Les types de distillation	11
8.6 L'utilisation de l'eau distillée	22

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

1.Présentation de la zone d'étude	34
2. Contexte géographique de Hammem Elssalihine	34
3.Contexte climatique	36
4.1. Les données climatiques.....	36
4.2. Caractérisation du climat.....	40
5.L'indice de Martonne	41

6. Méthodologie d'échantillonnage et matériel.....	43
7. Mesures in situ	43
8.Choix et conception du système de distillation.....	45
8.1. Description des composants du système de distillation	45
8.2. Système de récupération de l'eau distillée	46
8.3. Définition du distillateur LAUDA	47
8.3.1. Méthode de travail de distillateur LAUDA.....	47
8.3.4. Conclusion	48

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Introduction.....	49
2. Préparation du matériel	49
2.1. Calibration des appareils	49
2.2. Prélèvements des échantillons	49
3. Conservation des échantillons	50
4. Variation spatiale des paramètres physico-chimiques	51
5. Mesures au laboratoires.....	52
5.1. Etude analytique des paramètres physique	54
6. Les éléments majeurs	56
6.1. Diagramme de piper	58
7. Etude comparative de la production d'eau distillés	59
8. Caractéristiques physiques des eaux utilisées	60
8.1. Données expérimentales	60
8.2. Analyse des résultats.....	60
9. Avantages environnementaux et économiques	63
10. Recommandation pour l'optimisation.....	63
11. Conclusion	64
Conclusion Générale	65
Références Bibliographiques	

La liste des Figures :

• Figure 1 : Les différents types de géothermie	8
• Figure 2 : Schéma général de procédé de distillation	10
• Figure 3 : La distillation simple	12
• Figure 4 : La distillation fractionnée	15
• Figure 5 : Distillateur à pente unique	18
• Figure 6 : Distillateur solaire à double pente	19
• Figure 7 : Distillateur solaire terre-eau	19
• Figure 8 : L'utilisation de l'eau distillée	23
• Figure 9 : Contexte géographique de Khenchela... ..	34
• Figure 10 : Carte de situation géographique de Hammam Essalihine, Khenchela	35
• Figure 11 : Image satellite de Hammam Essalihine	36
• Figure 12 : Précipitation moyenne mensuelle pour une période de 10 ans (2005-2024).....	39
• Figure 13 : Diagramme pluviothermique.....	41
• Figure 14 : Processus d'échantillonnage d'eau	43
• Figure 15 : Distillateur LAUDA.....	47
• Figure 16 : Flacons en polyéthylène (ions majeurs)	49
• Figure 17 : Technique de prélèvement des échantillons	50
• Figure 18 : Flacons rincés plusieurs fois et refermés sous l'eau	50
• Figure 19 : Mesures des paramètres physico-chimiques in situ	52
• Figure 20 : Le travail en laboratoire	53
• Figure 21 : Analyses chimiques en éléments majeurs (mg/l)	58
• Figure 22 : Diagramme de Piper, représentant les faciès chimiques	59

La listes des tableaux :

- **Tableau 1** : Les précipitation moyenne mensuelle de la station de khenchela (2005-2024) 38
- **Tableau 2** : Températures moyennes mensuelles à la station météorologique de la wilaya de Khenchela (2005-2024) 40
- **Tableau 3** : Méthodes et laboratoires d'analyse des éléments chimiques 53
- **Tableau 4** : Résultats d'analyses concentration de chaque élément chimique.....53
- **Tableau 5** : Valeurs de la température mesurée 54
- **Tableau 6** : Le pH 54
- **Tableau 7** : La conductivité électrique 55
- **Tableau 8** : Analyses chimiques en éléments majeurs (mg/l) et paramètres physico-chimiques 58
- **Tableau 9** : Quantité d'eau distillée extraite selon le temps et le type d'eau 60
- **Tableau 10** : Comparatif – Distillat d'eau thermale vs. Distillat d'eau du robinet 62



Introduction Générale

Introduction Générale

Dans un contexte mondial marqué par la raréfaction des ressources en eau et l'accroissement de la demande en eau pure pour des usages industriels, médicaux et environnementaux, l'innovation dans les procédés de traitement de l'eau devient une priorité stratégique. En particulier, la production d'eau distillée représente un enjeu important dans les domaines où une qualité irréprochable est exigée. Toutefois, les procédés classiques de distillation demeurent énergivores et peu durables, notamment lorsqu'ils sont alimentés par des sources d'énergie fossile.

Parallèlement, les eaux thermales, en particulier dans les régions géo thermiquement actives, offrent une opportunité précieuse de production d'eau distillée grâce à leur température naturellement élevée.

L'Algérie, avec plus de 200 sources thermales, dispose d'un patrimoine hydrothermal considérable, dont les potentialités restent encore largement sous-exploitées. Parmi celles-ci, la station de Hammam Essalihine, située dans la wilaya de Khenchela, se distingue par la qualité et la constance de ses eaux, dont la température et la minéralisation en font un candidat idéal pour un projet de distillation écologique.

La valorisation énergétique de ces eaux dans le but de produire de l'eau distillée permettrait d'associer deux objectifs majeurs : réduire l'empreinte écologique des procédés de traitement de l'eau et optimiser l'exploitation durable d'une ressource géothermale locale. Une telle approche s'inscrit pleinement dans les principes de l'écologie industrielle et du développement durable, en intégrant les dimensions environnementales, énergétiques et économiques du territoire.

Malgré le potentiel évident des eaux thermales pour des applications énergétiques, aucun projet Algérie intègre des technologies de distillation à partir de sources thermales. Les contraintes techniques, le manque de données précises sur la qualité des eaux, ainsi que la nécessité d'un dimensionnement adéquat des systèmes de distillation freinent encore le développement de ces solutions.

La problématique centrale de cette recherche a été formulée comme suit :

Comment optimiser la production d'eau distillée à partir des eaux thermales de Hammam Essalihine tout en réduisant au maximum l'impact environnemental et la consommation énergétique du procédé ?

Cette problématique suppose une approche intégrée, alliant caractérisation physico-chimique de l'eau, choix des technologies appropriées (distillation simple, solaire, sous vide...), évaluation de la qualité de l'eau distillée produite et étude de l'efficacité énergétique du système.

L'objectif principal de ce mémoire est de développer un procédé durable et efficace de distillation des eaux thermales, reposant sur les caractéristiques spécifiques de la source de Hammam Essalhine. Il s'agit de transformer une ressource naturelle locale en un produit à haute valeur ajoutée, tout en respectant les contraintes écologiques et énergétique.

Ce mémoire est composé de trois chapitres contenant :

Chapitre I, ce chapitre est consacré à l'ancrage bibliographique du mémoire ou nous avons utilisé des références en adéquation avec le sujet du mémoire pour mettre en lumière l'importance du sujet et les études similaires dans la région et dans le monde,

Chapitre II, nous avons montré dans ce chapitre le matériel et la méthodologie utilisée dans ce mémoire.

Chapitre III, cette partie expose les résultats et discute la faisabilité du projet en comparaison avec les procédés anciennes et met en avant les avantages de cette technique dans la valorisation des ressources dans la région et gain énergétique de cette technique.



Chapitre I :

Synthèse bibliographique

1. Histoire :

Depuis des millénaires, les sources thermales suscitent un intérêt marqué chez l'homme. Dans l'Antiquité, leur existence était interprétée principalement à travers le prisme des croyances religieuses : les sources chaudes étaient ainsi perçues comme des manifestations du divin **(Duriez, 2006)**. Les civilisations anciennes vénérées les sources thermales, ils sont crus qu'elles étaient des phénomènes surnaturels et avaient un pouvoir de guérison **(La Moreaux and Tanner, 2001)**.

Les origines du thermalisme remontent à l'époque gallo-romaine, où l'on trouve les premières traces de l'utilisation des eaux chaudes à des fins médicales, datant d'environ 3000 avant J.-C. L'histoire des bains débute dans l'Antiquité avec le gymnase grec, qui intègre progressivement des espaces d'eau et de bains dédiés à l'hygiène. Ce développement confère alors au gymnase une importance sociale et architecturale, marquant l'émergence des premières formes de bains communaux dans l'Antiquité.

Dans la Grèce antique, le thermalisme acquiert une importance majeure en tant que pratique sociale et culturelle, étant perçu à la fois comme un rituel hygiénique et thérapeutique, où le bien-être de l'âme et du corps est indissociablement lié. À partir du Ve siècle avant J.-C., cette valorisation des sources thermales pousse les Grecs à construire des temples, souvent consacrés au dieu guérisseur Asclépios, situés à proximité des résurgences thermales de leur territoire, illustrant ainsi le caractère sacré et curatif attribué à ces lieux **(Duriez, 2006)**.

Les Romains contribuent à la popularisation des cures thermales en développant un vaste réseau de plus de cent stations thermales autour du bassin méditerranéen. Après leurs campagnes de conquête en Europe, en Asie et en Afrique, les légions de l'Empire bénéficient de cures thermales financées, favorisant leur rétablissement. Par ailleurs, des aristocrates romains font édifier des villas et maisons thermales, notamment à Baïes en Italie, où la douceur du climat, alliée aux propriétés thérapeutiques des eaux, est désormais valorisée et reconnue par la science médicale héritée de la tradition hellénistique. **(Abane, 2011)**.

Dans la culture islamique, l'homme peut être revitalisé de diverses façons : par la purification de quelques organes du corps, par la prière ou par les bains. Le hammam est considéré comme complémentaire à la mosquée. Les Turcs ont également accordé aux hammams une attention particulière. Ils construisirent dans les villes plusieurs bains disposant d'installations permettant un stockage de l'eau de source pouvant être chauffée à la demande et distribuée à l'intérieur **(Boughlali, 2003)**.

Au XIXe siècle, l'Empire et les guerres napoléoniennes assurent un nouvel essor à la ville. À son retour d'Égypte, Napoléon y fait édifier un hôpital thermal pour traiter les dermatoses de

ses soldats. Au XXe siècle, les eaux thermales suscitent un nouvel intérêt chez l'homme. Les systèmes géothermiques représentent une ressource énergétique qui, bien que modeste, a l'avantage d'être dotée d'un faible impact sur l'environnement.

2. Définition :

D'un point de vue étymologique, le mot « thermes » provient du latin *thermós* (θερμός en grec), signifiant « chaud » (**Furgault, 1824**). Il n'existe pas de définition officielle des eaux thermales, bien que plusieurs définitions aient émergé dans le domaine de l'hydrogéologie. En 1856, l'Abbé Paramelle définissait une eau thermale comme « une eau de source présentant tous les degrés de chaleur, depuis l'eau bouillante, qui est de 100 °C, jusqu'à la tempérée ». (**Gosselin et Schoeller, 1939**) ajoutent que « une eau thermale est une eau souterraine dont la température est d'au moins 5 °C supérieure à la température moyenne des sources ordinaires ». Elles sont également considérées, par différents auteurs tels que Castany et Margat, Pomerol et Ricour, ainsi que Marjat, comme des eaux se distinguant des autres eaux locales par leur composition chimique et/ou leur température. Les définitions associent couramment ces deux caractéristiques à leurs propriétés thérapeutiques ou sanitaires (**Canellas et Blavoux, 1995**).

La température des eaux du sol et du sous-sol suit les variations de la température de l'air, avec un décalage temporel et un amortissement qui augmentent avec la profondeur. Au-delà de 1,50 mètre, les variations temporelles deviennent relativement faibles, et, rapidement en dessous de cette profondeur, la température peut être considérée comme constante (à l'exception de certains cas particuliers, comme les systèmes karstiques). Les eaux thermales sont ainsi définies comme des eaux dont la température est supérieure à cette valeur régionale. On distingue les eaux thermales de basse enthalpie (basse température) et celles de haute enthalpie (**Vincent, 2008**).

Aujourd'hui, la majorité des auteurs reprennent cette définition et s'accordent à dire qu'une eau est thermale lorsque sa température à l'émergence est supérieure d'au moins 5 °C à la température moyenne annuelle de l'air (**Bakalowicz et al., 1987**) ou de 10 °F (environ 6 °C) (**LaMoreaux et Tanner, 2001**). Cette température de référence reflète celle qui influence les eaux superficielles de l'écorce terrestre. Une eau thermale n'est donc pas nécessairement minérale et vice-versa ; toutefois, les eaux sont très souvent thermales et minérales, car la minéralisation et le réchauffement des eaux souterraines sont intimement liés (**Thiébaud, 2008**).

3. Classification selon les régions :

La répartition des eaux thermales, en Algérie, est très irrégulière. Ces sources augmentent en nombre au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'est. Cette répartition semble suivre celle

des gîtes métallifères. C'est ainsi que l'on compte une vingtaine de sources minérales dans le département d'Oran, environ 40 dans celui d'Alger et 150 dans le département de Constantine. Le service des Mines a classé les sources des trois départements en sources sulfureuses, ferrugineuses, alcalines, salines, chlorurées sodiques, sulfatées, ferrugineuses, carbonatées sodiques.

Cette classification n'a d'ailleurs rien d'absolu et le classement de certaines sources peut varier selon l'importance que l'on attache à tel ou tel sel minéralisateur.

Dans une étude aussi sommaire sur l'Algérie, il est impossible de passer en revue toutes les richesses thermo-minérales de la colonie. **(Boughalali , 2003).**

4. Origine de l'eau thermique :

Les sources thermales, présentes sur les cinq continents **(Olivier et al., 2008)**, sont des phénomènes géologiques résultant soit d'une activité plutonique récente (origine volcanique), soit de l'infiltration des eaux de précipitation à travers un réseau de fractures et de roches perméables dans la croûte terrestre (origine météorique) **(La Moreaux et Tanner, 2001)**. Souvent associées à des zones tectoniquement actives, les eaux thermales ont suscité des débats quant à leur possible origine « juvénile », hypothèse selon laquelle elles proviendraient de la condensation de vapeur d'eau libérée par les magmas. La déshydratation des roches profondes, autrefois en surface, entraîne effectivement la libération de vapeur d'eau. Cependant, de nombreuses études indiquent que cette contribution « juvénile » est, dans la plupart des cas, nulle ou négligeable **(Vincent, 2008)**.

En règle générale, pour les eaux d'origine météorique, la température augmente au rythme de 2 à 3 °C par 100 m de profondeur (gradient géothermique) **(Press et Siever, 1986)**. Les températures élevées observées dans les sources thermales témoignent d'une circulation profonde de l'eau le long des failles, ainsi que de réactions exothermiques, comme la réduction des sulfates **(Kompani-Zare et Moore, 2001)** On retiendra donc qu'en général, l'eau Thermale participe à La circulation générale du cycle de l'eau **(Vincent, 2008)** , Les eaux thermales d'origine profonde, communément appelées « eaux juvéniles », résultent de la condensation progressive des émanations gazeuses issues du magma en refroidissement au cours de leur remontée. Elles émergent principalement dans des régions volcaniques, en raison de leur relation plus ou moins directe avec les zones magmatiques. Ces eaux, piégées lors du refroidissement de l'écorce terrestre, n'ont ainsi jamais participé au cycle hydrogéologique **(Sanders, 2006)** . Un autre type d'eau, d'origine mixte, résulte de l'interaction entre des eaux juvéniles d'origine profonde et des eaux vadoses superficielles, dans un contexte de connexions hydrauliques inter-nappes. Ce phénomène, désigné par le terme de « drainance », peut se

manifester dans des directions opposées au sein d'un même aquifère, lorsqu'une nappe profonde alimente une nappe superficielle.

Une distinction des systèmes géothermaux peut être réalisée à partir du fluide majoritairement impliqué dans la circulation hydrothermale. Ainsi, selon que le réservoir est composé principalement d'eau liquide ou d'eau sous forme de vapeur, on distinguera respectivement les systèmes où la phase liquide ou la phase vapeur domine.

5. L'utilisation des eaux thermales :

L'utilisation des eaux thermales à des fins récréatives est principalement déterminée par leur composition chimique (**Bouri et al, 2008**). Elles peuvent être utilisées pour le bain (hammam) et, dans certains cas, pour le chauffage domestique, l'agriculture, l'aquaculture, l'approvisionnement en eau potable et l'extraction d'éléments rares (**Petraccia et al., 2005**). Leur potentiel énergétique en tant que ressources géothermiques (**Saibi, 2009**) et leur importance socio-économique ont évolué au fil du temps.

5.1. Le thermalisme :

Le thermalisme, considéré comme une médecine naturelle par excellence, puise ses origines il y a plusieurs milliers d'années. Dès l'époque d'Aristote, de petites stations thermales accueillaient malades et pèlerins, mêlant ainsi le sacré et le sanitaire. Les auteurs s'accordent à dire que le mot latin *balneum* dérive du grec *βαλανεϊον*, désignant à l'origine des bains publics indépendants (**Fouché, 2011**). L'époque gallo-romaine constitue l'âge d'or du thermalisme, avec de grands complexes thermaux publics et des hôpitaux militaires où l'on soignait les blessures des soldats (**Laoussadi, 1997**). Aujourd'hui, le thermalisme est une thérapie complémentaire dans le traitement de diverses pathologies. Les établissements thermaux accueillent ainsi des patients curistes, mais également des individus en bonne santé recherchant repos et relaxation, loin du rythme stressant de la vie quotidienne.

La crénothérapie, du grec *krênê* (source) et *therapeia* (soins), est une forme de médecine offerte par la nature elle-même (**Traissac et al., 2002**). La crénothérapie est intemporelle : elle représente la plus ancienne thérapeutique naturelle ayant résisté à l'épreuve du temps. Elle a évolué aux côtés des grandes découvertes médicales, cliniques et thérapeutiques, et s'intègre aujourd'hui au thermalisme, qui associe la cure de boisson et la cure externe à un ensemble de facteurs complémentaires, tels que le climat, la diététique, la relaxation et le repos. Ces éléments réunis constituent la thérapie par la cure thermique.

Dans le cadre d'une cure thermique, tous les moyens médicaux et sanitaires sont mis à disposition du curiste. Ce dernier bénéficie ainsi, pendant toute la durée de sa cure, d'une surveillance médicale par un médecin spécialiste, tandis que les soins sont assurés par des

professionnels, tels que des kinésithérapeutes et des hydrothérapeutes.

Le thermalisme repose sur la crénothérapie pour structurer la prise en charge des patients en cure thermale, généralement sur une période de trois semaines. Des essais cliniques ont montré que les traitements par crénothérapie, sous diverses formes (spa, bains utilisant différentes sortes d'eaux, etc.), peuvent améliorer la qualité de vie, l'amplitude des mouvements, la capacité fonctionnelle et l'indice de gravité de la maladie. Ces traitements contribuent également à réduire les douleurs et la consommation de médicaments, et ont déjà démontré des effets bénéfiques dans la prise en charge des pathologies rhumatologiques **(Zhang, 2014, Masuda et al. 2005)**.

La crénothérapie est également appliquée avec succès dans le traitement des pathologies chroniques des voies respiratoires (comme l'asthme) **(Feix, 2014)**, de certaines affections dermatologiques **(Seite, 2013)**, et de troubles psychologiques **(Dubois et al., 2008)**.

6. La géothermie :

La consommation d'énergie a augmenté d'environ 40 % au cours des vingt dernières années (d'après l'IEA), et la demande continue de croître, alors que les principales ressources exploitées, comme les énergies fossiles, sont épuisables et polluantes. Dans un contexte où les politiques internationales s'accordent sur la nécessité d'accroître l'utilisation des énergies renouvelables, les aquifères hydrothermaux apparaissent plus que jamais comme une solution alternative prometteuse pour l'avenir.

Le terme « géothermie » provient des mots grecs *Gê* et *thermos*, signifiant respectivement « Terre » et « chaleur ». La géothermie désigne l'ensemble des techniques permettant d'extraire l'énergie thermique stockée dans le sous-sol ou dans les formations rocheuses, afin de la rendre disponible en surface pour des applications de chauffage ou pour la production d'électricité

Différentes sources sont à l'origine de la chaleur interne de la Terre **(Caron et al., 2003)**, la radioactivité, la chaleur résiduelle de formation, la chaleur de différenciation et les mouvements différentiels. La perte totale de chaleur à la surface de la Terre est estimée à environ 46 TW **(Jaupart et al, 2007)**.

L'extraction de la chaleur terrestre pour la production d'électricité peut se faire de manière naturelle lorsqu'un réservoir géothermique est productif par lui-même. Cependant, cette chaleur peut également être exploitée dans une zone initialement non aquifère, en injectant un fluide caloporteur dans un ou plusieurs puits d'injection, à une profondeur adéquate. Ce fluide, après s'être réchauffé en passant à travers l'échangeur de chaleur souterrain, est ensuite récupéré dans un puits de production, créant ainsi un réservoir géothermique artificiel. Ce concept est aujourd'hui désigné par l'acronyme « EGS » (Enhanced Geothermal System), précédemment

connu sous le nom de « Hot Dry Rock » (HDR) (Moussa, 2013).

En fonction des ressources géologiques disponibles, qu'il s'agisse de nappes superficielles ou profondes, ainsi que de l'utilisation du sol et du niveau de température, différents types de géothermie peuvent être distingués, chacun adapté à des usages spécifiques (Fig. 1).

- **6.1 Géothermie très basse énergie :**

Cette forme de géothermie exploite certains aquifères superficiels situés entre 0 et 600 mètres de profondeur, ou les sols via des systèmes fermés jusqu'à 200 mètres de profondeur, avec des températures inférieures à 30 °C. Elle est principalement destinée au chauffage et au rafraîchissement des locaux à l'aide d'une pompe à chaleur.

- **6.2 La Géothermie basse énergie :**

Cette forme de géothermie exploite des aquifères profonds, situés entre 1 600 et 2 000 mètres de profondeur, avec des températures variant de 30 à 150 °C. L'exploitation peut se faire soit par échange direct de chaleur, soit à l'aide d'une pompe à chaleur pour alimenter des réseaux thermiques, destinés notamment au chauffage urbain, aux applications industrielles, au thermalisme et à la balnéothérapie.

- **6.3 La Géothermie moyenne et haute énergie :**

Cette forme de géothermie exploite la chaleur issue de roches fracturées en profondeur, avec une température moyenne d'environ 250 °C à plus de 2 000 mètres de profondeur, dans le but de produire de l'électricité

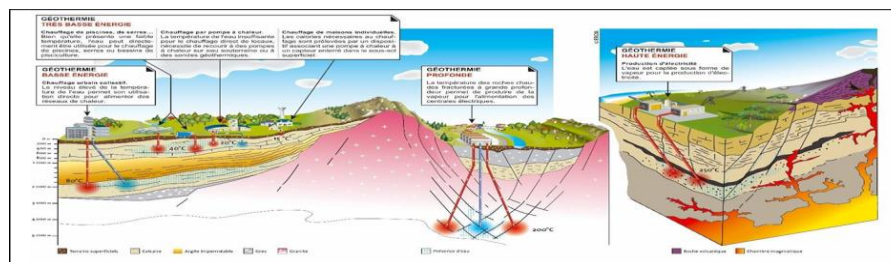


Fig. 1 : Les différents types de géothermie (ADEME-BRGM, 2008).

7. Les sources thermales de l'Algérie :

Il existe sur le territoire algérien plus de 200 sources thermales d'après les études réalisées à ce sujet, ce nombre croît régulièrement quand on se déplace vers l'Est (Ouali, 2015). Les températures mesurées à l'émergence varient de 19°C à Beni Haroune, Hammam Essalhine, Khenchela 70 °C à 98 °C à Hammam Meskhoutine (Guigue, 1947).

Les Romains construisirent des thermes dont les restes sont parfois remarquablement Conservés (Fontaine chaude de Khenchela et Youks-les-Bains dans le département de Constantine). Lors des invasions successives que subit ce pays, ils furent en grande partie Démolis. Cependant ceux qui échappèrent à la destruction, conservèrent la faveur des Arabes, grâce à la solidité de la construction romaine, il existe encore de nos jours dans certains hammams, installation très rudimentaire, des piscines judicieusement placées mais délabrées et mal entretenues (**Guigue, 1947**).

La minéralisation des eaux est déterminée surtout par la nature chimique et minéralogique des sédiments qu'elles traversent. Les sources thermales les plus minéralisées sont en relation directe avec les sédiments gypso-salins du Trias si répandu en Algérie, ce cas est trouvé à titre d'exemple à Hammam Melouane 29.42 gr/l, Hammam El Biban 15gr/l, Hammam Essalhine 9gr/l. (**Boughalali, 2003**).

8. Historique des procédés de distillation :

Le procédé de distillation (du Latin 'de-stellaire' qui signifie 'égoutter') consiste à séparer un liquide à travers son évaporation et sa condensation. L'exemple le plus simple de ce procédé peut être observé quand la vapeur de la chaudière va se poser en gouttes d'eau distillée sur une surface froide. La distillation est utilisée pour séparer les liquides des solides non volatils ainsi que dans la séparation des liqueurs d'alcool des matières fermentées, de deux liquides ou plus avec différents points d'ébullition, de l'essence, du pétrole et des huiles lubrifiants extraits à partir du pétrole brut. Il y a d'autres applications industrielles qui comprennent le dessalement de l'eau de la mer (extraire la salinité de l'eau pour la rendre potable). Au IV^{ème} siècle avant J.C, Aristote a suggéré la possibilité d'effectuer des distillations et a écrit ceci : "Nous pouvons rendre l'eau de la mer potable à travers la distillation ainsi que d'autres liquides peuvent subir le même procédé ». En effet, la distillation est un ancien procédé qui remonte à l'an 2000 avant J.C. On considère que les premières distillations se sont réalisées en Chine, en Egypte et dans la Mésopotamie dans le cadre médical et également dans le but de créer du baume, des essences et des parfums

8.1. Définition de la distillation :

La distillation est une des méthodes de séparation les plus importantes dont dispose le génie chimique. Cette opération permet la séparation d'un ou plusieurs constituants d'un mélange homogène liquide, en mettant à profit la différence de volatilité des constituants. La distillation est une opération double, après chauffage jusqu'à l'ébullition, la phase vapeur surmontant le liquide bouillant et en équilibre avec celui-ci n'a pas la même composition. Par condensation

de la phase vapeur, on obtient un liquide nommé distillat ou extrait (dit aussi produit de tête) dont la composition diffère de celle du mélange initial. La phase liquide non évaporée constitue le résidu ou le raffinat (appelée également produit de pied ou de fond). À très peu d'exceptions, le distillat est enrichi en constituants légers de température d'ébullition moins élevée, tandis que le résidu est formé par les constituants lourds dont la température d'ébullition est plus élevée. Pour réaliser des séparations poussées (obtention des constituants à des degrés de pureté élevée, en particulier lorsque ceux-ci ont des volatilités voisines), on a souvent recours à la rectification. Le contact entre les phases est favorisé par l'utilisation de plateaux (perforés, à calottes ou à clapets) ou de garnissages (anneaux Raschig par exemple).

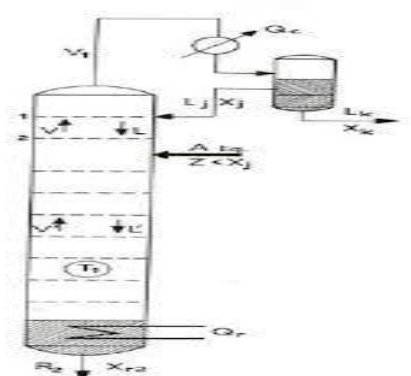


Fig2 : Schéma générale de procédé de distillation

8.2. Définitions de L'eau distillée :

L'eau distillée est de l'eau (H_2O) qui a été soumise à des procédures de distillation pour éliminer les contaminants dissous et l'amener à un état de pureté maximale. Ce processus peut être réalisé de plusieurs manières mais, en général, la distillation consiste en une vaporisation et une condensation sélectives (selon le point d'ébullition de chaque composant) pour séparer toute phase solide ou liquide dissoute dans l'eau. **(Bazin and Maurel 1870).**

L'eau distillée est une forme d'eau traitée, exempte de micro-organismes et d'éventuels contaminants qui y sont dissous. L'eau que nous obtenons normalement des tuyaux contient généralement des traces de chlore, utilisé pour son traitement et sa purification, mais aussi des résidus physiques du matériau des tuyaux ou des boues résiduelles qu'il peut apporter avec lui depuis sa source.

L'eau potable ne doit pas être confondue avec l'eau distillée. L'eau distillée est fréquemment utilisée dans les laboratoires et dans les industries manufacturières car les pratiques pratiquées dans ces lieux nécessitent souvent une eau exempte d'électrolytes et de sels minéraux, ce dont

le corps humain a besoin pour rester hydraté (ces électrolytes sont dans l'eau potable mais pas dans eau distillée).

La consommation humaine d'eau distillée peut être une source de diarrhée et d'autres formes de maladies transitoires, car elles ne fournissent pas l'hydratation que l'eau potable apporte.

8.3. Composition de l'eau distillée :

L'eau distillée n'est pas différente d'un point de vue moléculaire de l'eau ordinaire : elle est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène (H_2O). Cependant, il a été nettoyé des sels minéraux qui l'accompagnent habituellement, tels que les fluorures et autres électrolytes. En fait, les eaux distillées et rachetées dans le commerce sont enrichies de plusieurs de ces éléments une fois qu'elles quittent l'alambic. **(Bazin and Maurel 1870).**

8.4. Principe de la distillation :

La distillation consiste à porter le mélange à ébullition et à recueillir, après une succession de vaporisations et de condensations, une fraction dite légère appelée le distillat. Celui-ci correspond au produit le plus volatil qui a le point d'ébullition le plus bas et qui distille en premier. Dans le ballon, il reste la fraction dite lourde appelée le résidu. La différence entre les compositions du distillat (vapeur émise) et du liquide en ébullition est le principe exploité pendant la distillation. Le principe des différentes techniques de distillation fait appel aux lois qui régissent l'équilibre liquide - vapeur des corps purs et des mélanges

8.5. Les types de distillation :

8.5.1. Définition de la distillation simple :

La distillation simple est une technique courante en chimie analytique et appliquée, particulièrement pertinente dans le contexte environnemental. Elle permet la séparation des constituants d'un mélange liquide grâce à leurs différences de volatilité et de points d'ébullition **(Carey, 2007)** Dans le cadre écologique et environnemental, elle est notamment utilisée pour la purification de solvants, l'extraction d'huiles essentielles et la valorisation de déchets industriels.

8.5.2. Principe de la distillation simple :

La distillation simple repose sur un principe physique fondamental : les composés d'un mélange s'évaporent lorsqu'ils atteignent leur température d'ébullition, laquelle dépend de la nature chimique et des interactions moléculaires **(Hilali, 2020)**. Lorsque l'on chauffe progressivement

un mélange, le composant le plus volatil (c'est-à-dire celui ayant le point d'ébullition le plus faible) passe à l'état gazeux en premier. La vapeur ainsi formée est dirigée vers un condenseur refroidi à l'eau ou à l'air, où elle se liquéfie à nouveau sous la forme de distillat, séparé du reste du mélange initial (Carey, 2007).

Ce procédé est particulièrement efficace pour les mélanges de composés présentant une différence de points d'ébullition supérieure à 25 °C. En revanche, si cette différence est inférieure, on privilégiera une méthode plus complexe, comme la distillation fractionnée (Hilali, 2020).

Montage expérimental et précautions :

Le montage expérimental classique pour une distillation simple comprend les éléments suivants (Boukroufa, 2015)

- **Ballon chauffant (ou chauffe-ballon)** : contient le mélange à distiller.
- **Colonne de distillation simple** (parfois un simple adaptateur en verre) : guide les vapeurs vers le condenseur.
- **Condenseur à eau (réfrigérant)** : refroidit les vapeurs qui redeviennent liquides.
- **Ballon collecteur (erlenmeyer ou ballon)** : recueille le distillat.

La mise en œuvre nécessite certaines précautions pour garantir efficacité et sécurité :

Contrôle précis de la température afin d'éviter une distillation trop rapide, qui entraînerait des pertes par entraînement mécanique.

Surveillance constante pour éviter un assèchement complet du ballon chauffant (risque de dégradation thermique du ballon ou des composés restants).

Utilisation d'agents anti-bouillonnement (pierres ponce ou billes de verre) pour éviter des phénomènes dangereux comme le phénomène d'ébullition retardée.

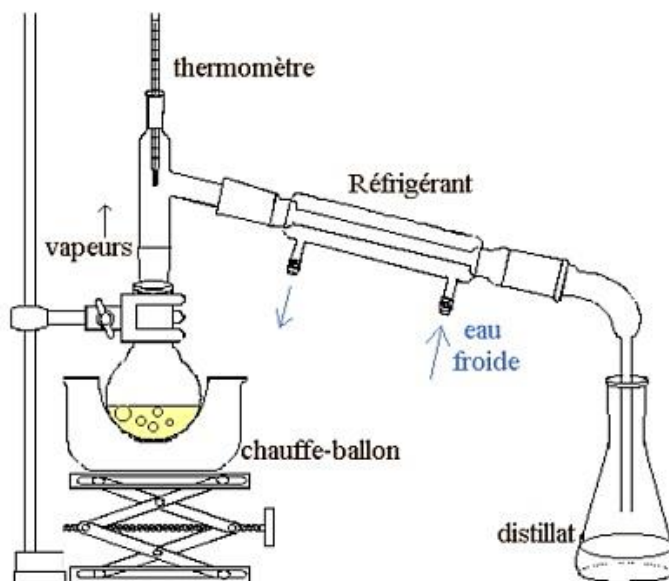


Fig.3 : La distillation simple

Applications environnementales spécifiques :

a) Extraction écologique des huiles essentielles

L'hydrodistillation, dérivée de la distillation simple, est très utilisée dans l'extraction des huiles essentielles. Ce procédé, considéré comme respectueux de l'environnement, ne requiert pas l'usage de solvants chimiques toxiques. De récentes recherches ont montré l'intérêt d'utiliser la distillation simple assistée par énergie solaire thermique, afin de réduire la consommation énergétique et de limiter l'impact écologique de l'extraction (Hilali, 2020)

b) Purification et recyclage des solvants

Dans les laboratoires d'écologie et d'analyse environnementale, la distillation simple permet la récupération et la purification des solvants organiques pollués ou altérés lors de divers processus analytiques. Ceci permet à la fois de réduire la quantité de déchets chimiques dangereux générés et de diminuer le coût lié à l'achat de solvants neufs (Carey, 2007, Harvey, 2015)

c) Valorisation des déchets de la production de biodiesel

Les procédés de fabrication de biodiesel génèrent des déchets liquides riches en composés organiques valorisables par distillation simple. Cette technique permet de récupérer ces composés, améliorant la rentabilité économique du processus et réduisant son impact environnemental (Abdallah, Ould El Hadj, & Guermoud, 2018).

Avantages et inconvénients environnementale :

a) Les Avantages :

Technique simple, économique et relativement peu énergivore si optimisée (**Hilali, 2020**).

Ne nécessite généralement pas de solvants toxiques (cas des huiles essentielles) Permet un recyclage efficace de composés chimiques industriels ou analytiques.

a) Les inconvénients :

Limitée à la séparation de composés avec une différence importante de points d'ébullition
Peut nécessiter une source d'énergie considérable si la durée de distillation est longue, d'où l'importance des techniques assistées par énergie renouvelable.

• Conclusion

La distillation simple, malgré sa simplicité apparente, reste une technique précieuse et largement exploitée en écologie et environnement. L'innovation actuelle, notamment avec l'utilisation d'énergies renouvelables, permet de réduire significativement l'impact environnemental tout en améliorant l'efficacité du procédé. Ce potentiel d'amélioration et d'adaptation aux contraintes écologiques fait de cette technique une voie intéressante pour les futures recherches en écologie appliquée et développement durable.

8.5.3. La Définition de distillation fractionnée :

La distillation fractionnée est une méthode analytique avancée utilisée pour séparer efficacement les composés volatils d'un mélange complexe présentant des points d'ébullition proches. Elle est essentielle dans plusieurs domaines, notamment en écologie et en gestion environnementale, en permettant une séparation fine et précise de contaminants, polluants, ou substances d'intérêt biologique (**Cabe, Smith, & Harriott, 2017**)

• Principe de la distillation fractionnée :

La distillation fractionnée exploite le même principe fondamental que la distillation simple, c'est-à-dire la séparation par évaporation et condensation sélectives selon les différences de volatilité. Cependant, elle se distingue par l'utilisation d'une colonne de fractionnement permettant des échanges multiples entre phases vapeur et liquide (**Felder, & Rousseau, 2016**)

Lors de ce procédé, le mélange liquide chauffé produit une vapeur riche en composés plus volatils. Cette vapeur monte dans la colonne de fractionnement, souvent remplie d'éléments appelés plateaux ou garnissage (billes de verre, anneaux de Raschig), favorisant un équilibre continu liquide-vapeur. Ainsi, des cycles répétés de condensation partielle et de vaporisation

enrichissent progressivement la vapeur en composés très volatils en haut de la colonne, tandis que les composés moins volatils restent dans les parties basses (**Felder & Rousseau, 2016**)

Montage expérimental et conditions opératoires :

Le montage typique de distillation fractionnée comprend :

- **Un ballon chauffant** : contenant le mélange initial.
- **Une colonne de fractionnement** : remplie de garnissage (billes de verre, anneaux en céramique ou métallique) favorisant les échanges entre phases.
- **Un condenseur** : pour condenser les vapeurs enrichies en composés volatils.
- **Un système de collecte** : permettant la récupération sélective des fractions (**Felder & Rousseau 2016**)

Pour une séparation efficace, plusieurs paramètres doivent être rigoureusement contrôlés, notamment :

- La température (précision indispensable pour optimiser la séparation).
- Le débit de chauffage, lent et régulier.
- La hauteur et le type de colonne de fractionnement (influence directe sur la qualité de séparation).

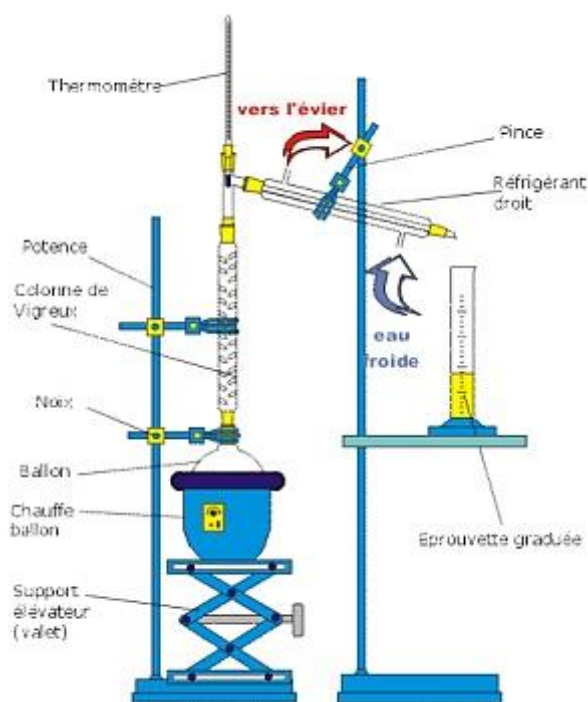


Fig.4 : La distillation fractionnée

. Applications en écologie et environnement

La distillation fractionnée a plusieurs applications importantes en écologie appliquée :

- **Analyse des contaminants environnementaux**

La distillation fractionnée est particulièrement utilisée pour analyser et séparer des mélanges complexes de composés organiques volatils (COV), souvent présents dans l'air, les eaux souterraines ou les sols contaminés par des hydrocarbures ou des solvants industriels. En séparant précisément ces polluants, elle facilite leur quantification et leur identification analytique (**Richardson & Kimura, 2016**).

- **Valorisation des déchets organiques**

En écologie industrielle, la distillation fractionnée permet également de valoriser les déchets liquides issus de procédés tels que la production de bioéthanol, la fermentation ou le raffinage de biomasse. Elle permet notamment de récupérer des solvants purs ou de fractionner des biocarburants selon leur composition chimique précise (**Hilali, 2020**)

- **Production d'huiles essentielles et d'extraits végétaux**

Bien qu'elle soit souvent remplacée par l'hydrodistillation, la distillation fractionnée peut être utilisée pour raffiner davantage les huiles essentielles extraites par des procédés simples, afin d'isoler des composés spécifiques à forte valeur ajoutée (terpènes, composés aromatiques) utiles en phytothérapie ou cosmétologie écologique (**Boukroufa, 2015**)

Les Avantages et les inconvénients environnementales :

- **Avantages :**

Séparation très fine de composés proches en termes de volatilité. Permet une récupération efficace des substances, favorisant la réduction des déchets. Adaptabilité à de nombreux procédés industriels écologiques (recyclage, valorisation des déchets).

- **Inconvénients :**

Consommation énergétique relativement élevée si le procédé n'est pas optimisé. Complexité technique supérieure par rapport à la distillation simple. Nécessité d'un contrôle rigoureux des paramètres opératoires (température, pression, débit de chauffe).

2.1 Conclusion

La distillation fractionnée constitue une avancée analytique importante pour la séparation précise des mélanges complexes rencontrés fréquemment en écologie et en sciences

environnementales. Son utilisation permet de répondre à des problématiques environnementales concrètes, telles que l'identification des polluants et la valorisation durable des déchets. Cependant, une optimisation continue est nécessaire afin de réduire les impacts énergétiques et environnementaux liés à ce procédé.

8.5.4. Distillation solaire :

Les distillateurs solaires simples sont utilisés aujourd'hui pour la production d'eau Portable à partir d'eau salée dans plusieurs pays du tiers-monde. Maintiennent que La distillation solaire est la méthode la plus économique pour la production d'eau douce en petites quantités (**Tiwari et Kumar, 1982**). Selon Malik et al, les alchimistes arabes auraient été les premiers à Utiliser la distillation solaire. Les premiers travaux détaillés publiés sur le sujet remontent à Harding (1883) où il présente le distillateur en bois recouvert de verre que l'ingénieur suédois Carlos Wilson utilisait au Chili. Cet appareil pouvait produire en moyenne 4,9 litres d'eau distillée par jour pour une journée d'été (**Julie Beauséjour 2003**).

- **Principes de base des distillateurs solaires**

Un distillateur solaire conventionnel à effet de serre est un bassin étanche à l'air, Habituellement fait de feuille d'Aluminium en forme rectangulaire. Il est recouvert d'un Matériel transparent et l'intérieur de sa base est noir ci pour maximiser l'absorption de L'énergie solaire. L'eau salée est versée dans le bassin de métal et exposée aux rayons du système soleil. Le couvercle transparent laisse pénétrer les radiations solaires qui sont absorbées en grande partie par le fond noir. L'eau se réchauffe et l'humidité comprise entre l'eau et le couvercle augmente. La base émet aussi des rayons infra- rouges qui sont reflétés dans l'eau par le couvercle transparent, le verre (ou plastique) n'est pas transparent pour les radiations de grande longueur d'ondes (**Dunkle, 1961**). Le couvercle transparent garde donc l'énergie solaire à l'intérieur, il réduit aussi les pertes de chaleur par convection. Le couvercle est habituellement à un certain angle de l'horizontal pour faciliter l'écoulement de l'eau condensée le long de la paroi jusqu'à un collecteur d'eau distillée.

(**Geibling and Bloemer, 1961**), ont été les premiers à défini les principaux mécanismes d'échange d'énergie dans un distillateur solaire simple Une grande partie des radiations solaires, directes et diffuses, est absorbée par le fond noir. De petites quantités d'énergie sont perdues par réflexion à la surface du verre et à la surface de l'eau. L'énergie absorbée par la base est presque totalement transférée à l'eau et seulement une petite fraction est perdue au sol par conduction via la structure de soutien.

L'énergie qui est transférée de l'eau au couvercle de verre l'est essentiellement par la vapeur d'eau qui s'évapore de la surface de l'eau et qui perd sa chaleur de vaporisation en se condensant. De la chaleur est aussi transférée de l'eau au couvercle par convection libre de l'air pris sous le couvercle. Le verre du couvercle absorbe une partie de la chaleur émise par la surface de l'eau. Le couvercle absorbe aussi une petite partie des rayons solaires incidents. Cette chaleur absorbée par le couvercle est perdue à l'atmosphère par convection et radiation. Il est donc possible de diviser les énergies entrantes et sortantes (**Dunkle, 1961**).

Entrants :

1. Radiations solaires
2. Radiations atmosphérique

Sortants :

1. Convection à l'atmosphère
2. Radiation à l'atmosphère
3. Réflexion à l'atmosphère
4. Conduction au sol
5. Conduction et convection aux côtés
6. Fuites de vapeur
7. Fuites d'eau usée du bassin
8. Chaleur sensible du condensat et du trop-plein d'eau usée.

- **Les différents types de distillateurs solaires :**

Les distillateurs solaires se déclinent en plusieurs types, qui varient selon leur conception et les matériaux utilisés. Malgré ces différences, ils reposent tous sur le même principe de base et remplissent les mêmes fonctions : utiliser l'énergie solaire pour produire de l'eau distillée

- **Distillateur solaire à simple effet**

Ce type de distillateur utilise un seul évaporateur. Le modèle le plus courant est le distillateur de bassin, qui existe en plusieurs variantes (**BAIT, 2014**).

- **Distillateur à pente unique**

Ce modèle possède un capteur solaire incliné selon un angle β , d'où son autre nom : distillateur simple (Sellami, 2014). L'eau est introduite dans la boîte solaire, soit manuellement, soit automatiquement grâce à un système à flotteur. L'énergie solaire traverse la vitre supérieure et chauffe l'eau jusqu'à évaporation. La vapeur ainsi produite se condense sur la vitre, plus froide. Grâce à l'inclinaison de cette dernière, l'eau distillée s'écoule naturellement vers un récipient de récupération.

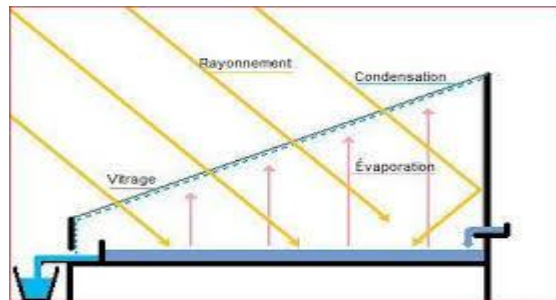


Fig. 5 : Distillateur à pente unique (Sellami, 2014).

- Distillateur solaire à double pente

Ce type de distillateur est équipé de deux capteurs solaires, chacun incliné selon un angle β . Son principal avantage réside dans sa configuration : l'un des capteurs est exposé directement au soleil, tandis que l'autre reste à l'ombre. Cette disposition favorise un meilleur différentiel de température, ce qui permet d'accélérer le processus de condensation (BAIT, 2014) (Sellami, 2014).

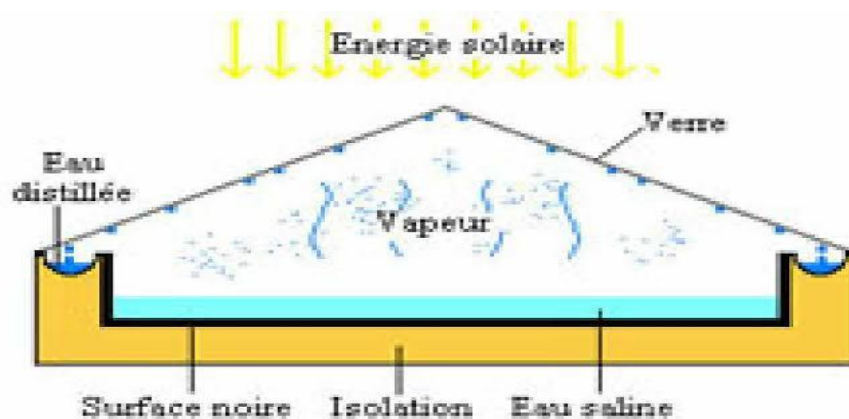


Fig.6 : Distillateur solaire à double pente (BAIT, 2014)

- Distillateur solaire terre- eau

De grandes quantités d'humidité sont accumulées dans la terre durant la saison froide, de même dans les zones arides. Pour exploiter cette hydrologie naturelle, on utilise le distillateur solaire terre-eau. Il est similaire à celui de l'effet de serre, sauf que le sol remplace le bassin noir (Sellami, 2014)

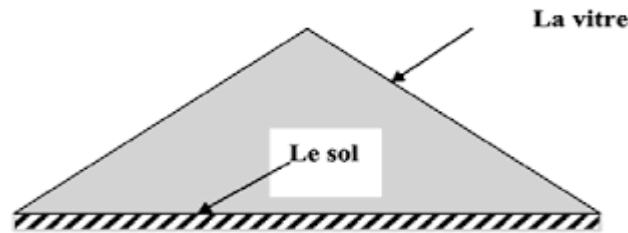


Fig.7 : Distillateur solaire terre- eau (Sellami, 2014)

- **Caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire :**

La performance d'un distillateur solaire peut être évaluée à travers plusieurs indicateurs clés, notamment le rendement, l'efficacité globale et l'efficacité interne (BAIT, 2014).

- **Rendement**

Le rendement correspond à la quantité d'eau distillée produite quotidiennement, rapportée à la surface de l'absorbeur. Il s'exprime en litres par jour et par mètre carré de surface d'eau saline (Sellami, 2014).

- **Efficacité globale**

L'efficacité globale est le rapport entre la chaleur utilisée pour l'évaporation de l'eau et le rayonnement solaire total incident sur la vitre du distillateur

- **Efficacité interne**

L'efficacité interne ($\eta_{\text{eta_in}}$) représente le rapport entre la chaleur utilisée pour l'évaporation et la chaleur réellement absorbée par l'eau via l'évaporateur-absorbeur

Paramètres influençant les performances des distillateurs solaires

Le choix et les performances d'un distillateur solaire dépendent de plusieurs paramètres regroupés sous le terme caractéristiques de fonctionnement (comme le débit de distillat,

l'efficacité globale et l'efficacité interne). Ces performances peuvent être affectées par divers facteurs classés en trois grandes catégories (BAIT, 2014).

Paramètres externes :

- **La vitesse du vent**

Les résultats concernant l'impact du vent sont partagés. Selon (Garg et al), une vitesse de vent plus élevée améliore la productivité, tandis que Hollands, Wei et Chen constatent l'effet inverse : une diminution de rendement avec l'augmentation de la vitesse du vent (El-Sebaili, 2000).

- **Rayonnement solaire**

L'intensité du rayonnement solaire joue un rôle déterminant dans la production d'eau distillée. Selon l'étude de Nafey, son impact est particulièrement notable en été. C'est le paramètre ayant le plus d'influence sur la productivité (Nafey, et al 2000) .

- **Température ambiante**

La température extérieure influe directement sur l'efficacité du distillateur. D'après les travaux de, une température ambiante plus élevée favorise une meilleure production (Singh, 2021) .

8.5.5. Applications en écologie et environnement :

- **Production d'eau potable** : La distillation solaire offre une solution durable pour fournir de l'eau potable aux communautés rurales et isolées, réduisant ainsi la dépendance aux sources d'eau conventionnelles. (Julie Beauséjour 2003)
- **Désalinisation** : Elle permet de transformer l'eau de mer ou les eaux saumâtres en eau douce, contribuant ainsi à la gestion durable des ressources hydriques dans les zones arides.
- **Réduction de l'empreinte carbone** : En utilisant une source d'énergie renouvelable, la distillation solaire minimise les émissions de gaz à effet de serre associées aux méthodes traditionnelles de purification de l'eau. (Julie Beauséjour 2003)

8.5.6. Les avantages et les inconvénients

Les Avantages :

- **Économie d'énergie** : Le processus repose entièrement sur l'énergie solaire, éliminant ainsi les coûts énergétiques liés aux méthodes conventionnelles. (Eibling, and Bloemer 1961) .

- **Simplicité et faible coût** : Les distillateurs solaires peuvent être construits avec des matériaux locaux, rendant leur fabrication et leur maintenance accessibles et économiques. (Eibling, and Bloemer 1961)
- **Adaptabilité** : Ces systèmes peuvent être dimensionnés pour répondre aux besoins spécifiques des ménages ou des communautés, offrant une flexibilité dans leur utilisation.

Les inconvénients :

- **Rendement limité** : La production d'eau distillée est généralement faible, avec une moyenne d'environ 6 litres par jour pour une surface de six mètres carrés, ce qui peut être insuffisant pour des besoins plus importants. (Dunkle 1961) .
- **Dépendance aux conditions météorologiques** : L'efficacité de la distillation solaire est directement liée à l'ensoleillement, rendant le processus moins fiable par temps nuageux ou pluvieux.
- **Espace requis** : Pour obtenir une quantité significative d'eau distillée, une surface d'installation relativement grande est nécessaire, ce qui peut poser des contraintes d'espace. (Dunkle 1961) .

8.5.7. L'utilisation de l'eau distillés

L'eau distillée a diverses utilisations, notamment en laboratoire, dans l'automobile et la mécanique, ainsi que dans les produits pharmaceutiques et cosmétiques. Cette section explorera ces applications plus en détail, fournissant un aperçu des raisons pour lesquelles l'eau distillée est appréciée dans ces industries.

- **Applications en laboratoire de l'eau distillée :**

L'eau distillée est fréquemment utilisée dans les laboratoires en raison de sa pureté. C'est un solvant idéal pour préparer des solutions, nettoyer la verrerie et mener des expériences sans risque de contamination par des impuretés ou des minéraux. L'utilisation d'eau distillée garantit que les résultats ne sont affectés par aucun contaminant, ce qui conduit à des résultats plus précis et plus fiables.

- **Utilisations automobiles et mécaniques de l'eau distillée :**

L'eau distillée est souvent utilisée dans les batteries des véhicules, les systèmes de refroidissement et les fers à vapeur. Son manque de minéraux empêche l'accumulation et la corrosion, prolongeant ainsi la durée de vie de ces systèmes. L'utilisation d'eau distillée dans ces applications peut conduire à de meilleures performances et à une réduction des coûts de maintenance.

- **Utilisations pharmaceutiques et cosmétiques de l'eau distillée :**

L'eau distillée est utilisée comme base dans la production de nombreux produits pharmaceutiques et cosmétiques en raison de sa pureté, garantissant une qualité et des performances constantes. L'utilisation d'eau distillée dans ces produits permet d'éviter les réactions avec d'autres ingrédients et réduit le risque de contamination, garantissant ainsi la sécurité et l'efficacité du produit final.



Fig 8 : L'utilisation de l'eau distillé



Chapitre : II

Présentation De La zone d'étude

1. Présentation de la zone d'étude

• La wilaya de Khanchela.

La wilaya de Khanchela est située au nord-est algérien dans la région des Aurès et au Sud-est du constantinois ; et au contrefort du mont des Aurès entre les parallèles : $34^{\circ} 06' 36''$ et $35^{\circ} 41' 21''$ latitudes Nord ; et entre $06^{\circ} 34' 12''$ et $07^{\circ} 35' 56''$ de longitudes Est avec une superficie est de 9715,6 km². Elle est limitée géographiquement au :

Nord par la Wilaya d'Oum El Bouaghi ; Sud par la wilaya d'El Oued ;

Est par la wilaya de Tébessa ; Ouest par la wilaya de Batna ;

▪ Sud- Ouest par la wilaya de Biskra. (CENEAP, 2009).

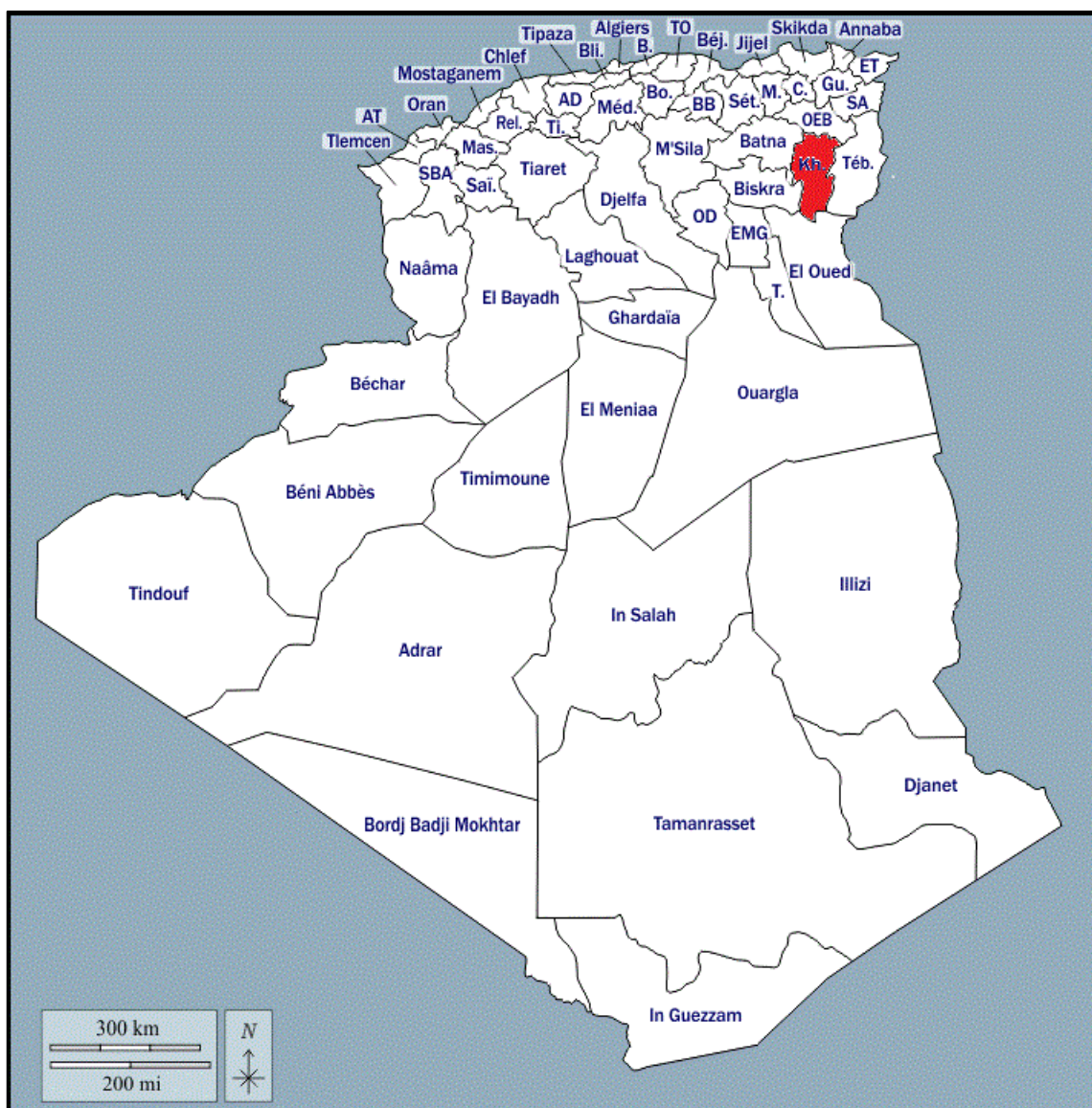


Fig. .9. Contexte géographique de kenchela (Source :D-maps.com)

2. Contexte géographique de Hammem Elssalihine Khenchela

Les anciens thermes romains d'Aquae Flavianae", furent créés en l'an 195 ap .JC par un riche citoyen de l'antique Mascula qui leur a donné son nom. Le lieu demeura un centre de repos pour les chefs militaires romains, jusqu'à sa rénovation par l'empereur Septime Sévère en l'an 208. JC. Aujourd'hui encore il attire chaque année des milliers de curistes.

La station thermale de Hammam Essalhine (Khenchela) est située dans la commune d'El Hamma, à **7 km** au Nord Ouest de chef lieu de la wilaya de Khenchela, au sud du bassin de Rémila (**Figure 10**) dans une dépression montagneuse, il couvre l'aire limitée géographiquement par les latitudes **35°26' 20.12" N** et **7°05 08.46 " E** de longitude. L'altitude de zone varie de **1079 m** dans le vallon du site thermal de Hammam Essalihine à 1650 m à la hauteur de Ras Serdoun, et culmine à 1870m au djebel Feraoun, ce site thermal est constitué de trois sources.

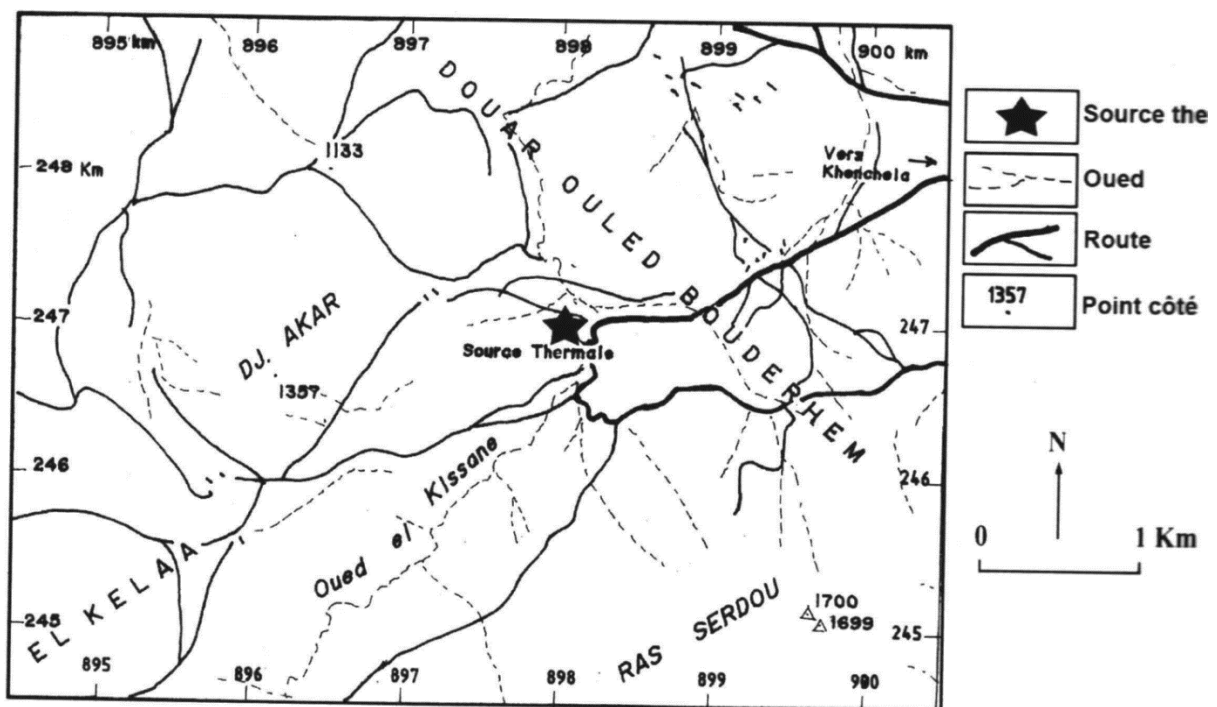


Fig.10 : carte de situation géographique de Hammam Essalihine, Khenchela
1/50000 (sonatrach, 1997)

Bordant l'oued Kissane, la source de Hammam Essalihine est très riche en minéraux, cette eau est si pure qu'elle n'a besoin d'aucun filtrage. Elle refroidit naturellement avant d'arriver dans les bassins où elle est continuellement brassée, les bains conservent toujours les pittoresques piscines romaines.

Le complexe thermal offre tous les soins appropriés aux cures : matériel de relaxation, de massage, de rééducation fonctionnelle en plus des séances d'hydrothérapie.



Fig. 11 : image satellite de hammam Essalihine

Les eaux thermales de Hammam Essalihine, atteignant près de 70 °C, sont reconnues pour leurs propriétés thérapeutiques, utiles dans le traitement des maladies rhumatismales, respiratoires et dermatologiques. Le site attire à la fois des curistes et des touristes en quête de bien-être et de détente.

La station dispose de 40 cabines et 5 piscines, accueillant jusqu'à 700 000 visiteurs par an, preuve de sa popularité croissante. Implantée dans un cadre forestier naturel, elle bénéficie aussi de la présence de vestiges romains, notamment une ancienne piscine restaurée, ce qui renforce son attrait culturel.

Ce mélange de nature, histoire et modernité fait de Hammam Essalihine un site touristique et thérapeutique incontournable. Des projets d'investissement sont en cours pour développer les structures d'accueil et de loisirs, afin de mieux exploiter son potentiel touristique et répondre à la demande croissante.

3. Contexte climatique :

Le climat se définit par la distribution statistique des conditions atmosphériques dans une région donnée sur une période déterminée. La détermination du climat repose sur des moyennes calculées à partir de mesures statistiques annuelles et mensuelles de données atmosphériques locales, telles que la température, la pression atmosphérique, les précipitations, l'ensoleillement,

l'humidité et la vitesse du vent. La récurrence de ces conditions, ainsi que les phénomènes exceptionnels, sont également prises en compte.

Le caractère semi-aride de cette région se manifeste par des précipitations irrégulières, des variations importantes d'une année à l'autre et une répartition inégale des pluies. Ces conditions climatiques particulières influencent la formation des sources thermales et la minéralisation de leurs eaux. Les eaux thermales se forment généralement lorsque l'eau de pluie s'infiltre dans le sol et descend en profondeur, où elle est chauffée par la chaleur géothermique. Le climat semi-aride de la région peut ainsi affecter le taux d'infiltration et la température de l'eau souterraine, contribuant à la formation de sources chaudes aux propriétés thérapeutiques uniques.

4. Les données climatiques

Les données de température et de précipitation correspondent à des hauteurs mensuelles des pluies et de température qui ont été recueillies à la station de (OMN) de khenchela situées à 890 m d'altitude suivant une période de mesures de 1991 à 2020 (tableau.1).

Les précipitations jouent un rôle essentiel dans la détermination du climat, comme l'a souligné **(Djebaili en 1984)**. Elles influencent le maintien et la répartition de la végétation et contribuent à la dégradation du milieu naturel par l'érosion. De plus, les précipitations ont des implications sociales et économiques significatives. Elles constituent un facteur clé pour caractériser la sécheresse globale d'un climat donné. En Algérie, comme dans d'autres régions, la distribution des pluies est influencée par divers facteurs géographiques, notamment la situation géographique, la topographie, l'orientation des chaînes de montagnes par rapport à la mer, ainsi que l'altitude.

Les précipitations jouent un rôle essentiel dans la détermination du climat, comme l'a souligné **(Djebaili en 1984)**. Elles influencent le maintien et la répartition de la végétation et contribuent à la dégradation du milieu naturel par l'érosion. De plus, les précipitations ont des implications sociales et économiques significatives. Elles constituent un facteur clé pour caractériser la sécheresse globale d'un climat donné. En Algérie, comme dans d'autres régions, la distribution des pluies est influencée par divers facteurs géographiques, notamment la situation géographique, la topographie, l'orientation des chaînes de montagnes par rapport à la mer, ainsi que l'altitude.

Ces facteurs entraînent une irrégularité des précipitations à travers la région, avec une augmentation des pluies en altitude et une diminution progressive de leur quantité du nord vers le sud, comme le souligne **(Halimi en 1981)**. Le régime pluviométrique joue également un rôle crucial dans l'hydrochimie des sols, en les lessivant. En effet, plus la pluviométrie est élevée, plus les éléments solubles sont transportés et lessivés, modifiant ainsi la composition chimique des sols.

4.1. Précipitation :

Le tableau (1) et la figure 12 fournissent des données de précipitations mensuelles pour la wilaya de Khenchela. Les précipitations mensuelles enregistrées dans la wilaya de Khenchela montrent une répartition saisonnière marquée, avec une moyenne annuelle avoisinant les 430 à 480 mm. Les mois les plus arrosés sont janvier (environ 70 à 85 mm), février (65 à 80 mm) et décembre (60 à 75 mm), représentant à eux seuls près de 40 % du total annuel. En revanche, les mois d'été, notamment juillet et août, enregistrent des précipitations très faibles, souvent inférieures à 5 mm, voire proches de 1 mm, ce qui témoigne d'une période de sécheresse sévère pouvant durer plus de trois mois. Les mois de transition comme mars (45 à 60 mm) et novembre (50 à 65 mm) participent également de manière significative à l'apport hydrique annuel. En été, le cumul des précipitations de juin à août ne dépasse généralement pas 15 mm, soit moins de 3 % du total annuel. Cette répartition inégale oblige à concentrer la collecte et la gestion de l'eau pendant la période humide (de novembre à avril), qui cumule en moyenne 350 mm, soit plus de 75 % des apports annuels.

Tableau .1 : Précipitation moyenne mensuelle de la station de Khenchela (2005_2024) en mm.

P (mm)	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Toute la période
Cumul moyen Précips	25,0	17,0	32,4	38,5	31,3	13,0	13,5	24,1	34,7	32,4	31,8	23,6	317,4
Max en 24h de précips	25,0	22,0	43,0	39,0	37,0	17,0	13,0	50,0	27,0	52,0	31,0	21,0	52,0
Max en 5j de Précips	41,0	43,0	81,0	51,0	50,0	31,0	17,2	80,0	37,0	54,0	49,0	31,0	81,0
Moyenne ≥ 1 de précips	4,2	5,2	6,1	9,8	8,1	5,2	4,8	7,5	7,4	6,0	5,8	4,3	6,2



Fig. 12 : Précipitation moyenne mensuelle pour une période de 10 ans (2005-2024).

4.2.Température

A partir des données de température fournies dans le tableau 02 :

Température Maximale Extrême : Les températures maximales extrêmes varient au cours de l'année, atteignant leur maximum en juillet avec 45,4 °C, ce qui indique une période de chaleur intense pendant les mois d'été. Les températures maximales extrêmes en hiver sont nettement plus basses, atteignant - 4,9 °C en décembre.

Température Maximale Moyenne Les températures maximales moyennes indiquent une augmentation progressive du printemps à l'été, culminant en août avec un pic à 27,4 °C, ce qui suggère une saison estivale chaude. En hiver, les températures maximales moyennes sont nettement plus fraîches, descendant à 5,6 °C en janvier.

Température Moyenne Les températures moyennes montrent une tendance similaire, avec une augmentation régulière du printemps à l'été, suivie d'une diminution à l'automne et en hiver. La moyenne annuelle est de 16,2 °C.

Température Minimale Moyenne Les températures minimales moyennes présentent également une variation saisonnière, avec des valeurs plus élevées en été et plus basses en hiver. Elles varient de 0,8 °C en janvier à 12,9 °C en septembre.

Température Minimale Extrême : Les températures minimales extrêmes montrent une variation similaire aux températures minimales moyennes, atteignant leur point le plus bas en hiver et leur point le plus élevé en été.

En analysant ces données, on observe clairement le caractère saisonnier des températures dans la région étudiée, avec des étés chauds et des hivers plus frais. Ces variations de température peuvent influencer la fréquentation et l'utilisation des sources thermales, les températures plus fraîches en hiver rendant les bains thermaux potentiellement plus attrayants pour les visiteurs. De plus, la variation des températures peut également influencer les propriétés chimiques et

thérapeutiques des eaux thermales, ce qui peut être pertinent pour les traitements et les bienfaits médicaux associés aux sources thermales de la région.

L'analyse des données de température permet de mieux comprendre le climat de la région et ses implications potentielles pour les sources thermales, tant du point de vue de l'expérience des visiteurs que des propriétés intrinsèques des eaux.

Tableau .2.: température moyenne mensuelle à la station de khenchela (2005_2024) en (°C).

T (°C)	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Tout e la période
Tempé. Maxi extrême	24,3	24,7	28,6	32,2	38,8	40,1	45,4	40,8	38,0	34,2	26,3	22,2	45,4
Tempé. Maxi moyennes	5,6	4,9	3,2	8,3	15,1	15,9	17,7	19,8	11,6	12,3	9,2	5,7	10,8
Tempé. Moy Moyennes	6,8	8,3	10,6	13,5	18,3	24,2	27,4	26,2	21,3	19,3	11,1	7,2	16,2
Tempé. Mini moyennes	0,8	1,0	1,2	2,4	4,4	7,8	11,3	12,9	7,8	6,3	4,1	2,1	5,2
Tempé. Mini extrême	-4,1	-3,1	-1,8	-0,6	3,4	7,1	7,5	11,6	7,4	2,8	-1,5	-4,9	-4,9

4.3.Caractérisation du climat

La combinaison de deux principaux facteurs climatiques : la température et les précipitations permettent de déterminer les périodes sèches et humides ainsi que la localisation de l'étage bioclimatique bien définie d'une région donnée à l'aide du Diagramme ombrothermique et du coefficient pluviométrique d'EMBERGER.

Pour cette étude, un diagramme pluviométrique a été établi, dans lequel les températures sont représentées à une échelle double de celle des précipitations. La caractérisation du climat d'une zone donnée à l'aide d'indices ou de diagrammes permet de comparer les climats entre différentes régions. Ces outils prennent généralement en compte l'offre pluviométrique, la demande évaporative et les températures. Les indices les plus couramment utilisés incluent :

4.3.1. Diagramme pluviothermique

Le Diagramme pluviothermique de BAGNOULS et GAUSSEN met en évidence la notion des saisons humides et sèches, comme celui ayant un total pluviométrique (moyenne en millimètres) égal ou inférieur au double de la température ($P \leq 2T^\circ$). Ainsi, on constate que la

saison sèche est formée par plusieurs mois secs consécutifs.

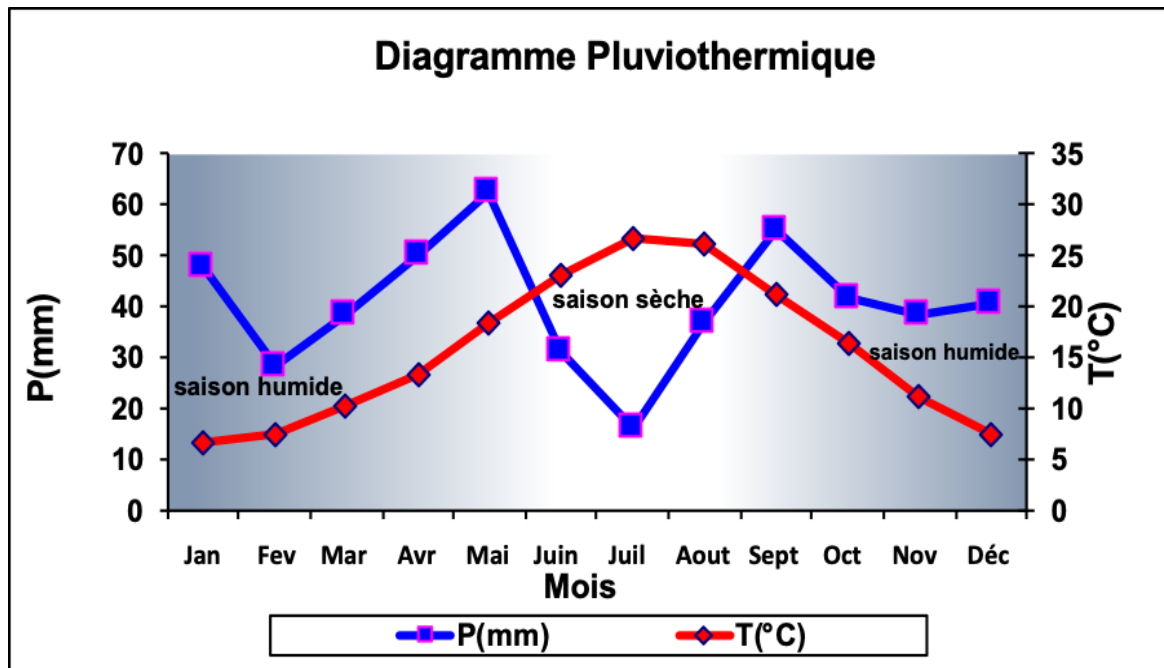


Fig.13 : Diagramme Pluviothermique.

Un diagramme pluviothermique, également appelé diagramme climatique ombrothermique, est un outil graphique qui permet de visualiser la distribution des précipitations et des températures mensuelles moyennes tout au long de l'année pour une région donnée. Cela permet d'obtenir une vue d'ensemble du climat de la région et de mettre en évidence les saisons sèches et humides.

La période humide dans la région de Khenchela commence en septembre et se termine en mai, indiquant que c'est durant cette période que les précipitations sont les plus abondantes. Cette période de forte pluviométrie correspond généralement aux saisons d'automne, d'hiver et de printemps. D'autre part, la période sèche, qui s'étend de début juin à début septembre, indique une réduction considérable des précipitations, marquant des conditions plus sèches pour la région. Cette période correspond généralement à l'été.

En combinant cette information avec les températures moyennes mensuelles on peut visualiser comment les variations saisonnières de température correspondent aux périodes humides et sèches. Les températures moyennes plus élevées pendant la période sèche sont typiques des climats semi-arides caractérisés par des étés chauds et secs.

En résumé, l'analyse d'un diagramme pluviothermique pour la région de Khenchela indique une saison humide de septembre à mai et une saison sèche de juin à septembre, ce qui est caractéristique d'un climat semi-aride.

5. Indice de Martonne

L'aridité, également appelé indice de désertification ou indice d'aridité de De Martonne

(1925), est un indicateur utilisé pour évaluer le niveau d'aridité ou de sécheresse ; une région en fonction de sa pluviométrie et de sa température. Cet indice fournit une indication de la quantité d'eau disponible dans une région par rapport à ses besoins climatiques.

En a proposé une formule climatologique permettant le calcul d'un indice dit indice d'aridité (I a). Cet indice est fonction de la température (T en °C) et des précipitations (P en mm) et permet de déterminer le type de climat qui caractérise la zone d'étude indice d'aridité (I) peut être calculé en utilisant la formule suivante : $I = \frac{P}{(T+1)}$

Où :

I : est l'indice d'aridité.

P : représente la moyenne annuelle des précipitations en millimètres.

T : représente la moyenne annuelle de la température en degrés Celsius.

Application : P = 417,4 mm ; T = 16,2°C ; $I \approx 16$

En ce qui concerne le type de climat associé à cet indice aridité, il convient interpréter cette valeur par rapport à l'échelle couramment utilisée pour classer les climats en fonction de leur aridité. Les intervalles de valeurs et les classifications peuvent varier, mais, en général, ils sont interprétés de la manière suivante :

$I < 5$: Climat humide $5 \leq I < 10$: Climat subhumide $10 \leq I < 20$: Climat semi-aride $20 \leq I < 30$: Climat aride $I \geq 30$: Climat désertique

Dans notre cas, avec un indice d'aridité d'environ 15,92, cela suggère un climat semi-aride, caractérisé par une certaine aridité tout en conservant une présence significative de

Précipitations. Ces classifications sont approximatives et peuvent varier en fonction des critères spécifiques utilisés dans les différentes classifications climatiques.

Etablissement du bilan hydrique

Le bilan hydrique est établi pour un bassin versant sur une période donnée en comparant les apports et les pertes en eau au sein de ce bassin durant cette période. il tient aussi compte de la composition des réserves et des prélèvements ultérieurs sur ces réserves. Les apports d'eau sont effectués par les précipitations.

Les pertes sont principalement dues à évaporation et à la transpiration des plantes, Regroupées sous le terme « évapotranspiration ». L'évaporation désigne le processus par lequel, eau se transforme en vapeur, tandis que la transpiration correspond à la libération d'eau par les plantes. Ensemble, ces processus forment évapotranspiration, qui constitue une composante essentielle du cycle hydrologique. La précision de son estimation est cruciale pour le calcul du bilan hydrique, la planification de, irrigation, la gestion des ressources en eau et le dimensionnement des ouvrages d'aménagement. L'estimation de ce paramètre a été faite à l'aide de la formule de G.W. Thornthwaite.

6. Méthodologie d'échantillonnage et matériel

Le matériel utilisé pour l'échantillonnage doit être adapté afin de préserver l'intégrité des échantillons et d'éviter toute contamination (**APHA, 2017**). Des bouteilles en verre ou en polyéthylène haute densité (PEHD), préalablement rincées avec l'eau à analyser, sont recommandées pour le prélèvement. Le volume prélevé doit être suffisant, généralement entre 1 et 2 litres par échantillon, afin de permettre l'ensemble des analyses nécessaires. Pour les paramètres physico-chimiques, des sondes portatives permettent de mesurer in situ la température, le pH, la conductivité et l'oxygène dissous. En outre, une glacière est indispensable pour le transport des échantillons, garantissant leur conservation à basse température, notamment pour les analyses microbiologiques.

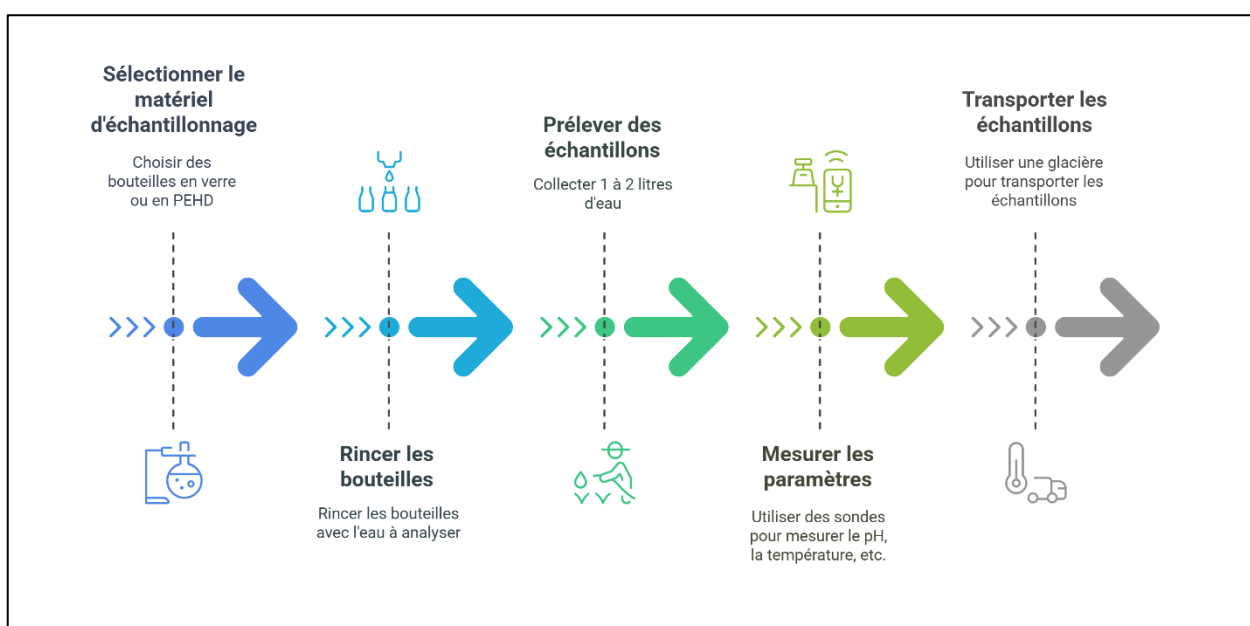


Fig.14 : Processus d'échantillonnage d'eau.

7. Mesures In Situ

Les paramètres physico-chimiques de l'eau sont systématiquement mesurés sur site. Cette démarche est particulièrement utile en début d'étude pour identifier les différentes masses d'eau présentes sur le terrain. Les mesures des paramètres physico-chimiques in situ sont essentielles pour reconstituer l'état de l'eau à la sortie de l'hydrosystème. Certains paramètres sont fugaces et ne peuvent être récupérés par la suite (**Bakalowicz, 2005**). D'autres peuvent évoluer pendant le transport des échantillons au laboratoire, d'où l'importance de réaliser ces déterminations directement sur le terrain.

Certains paramètres physico-chimiques doivent être mesurés immédiatement après le prélèvement afin d'éviter toute modification due aux interactions avec l'air ou aux variations de température. Parmi ces paramètres, la température est essentielle pour caractériser les

conditions thermales de la source. Le pH permet d'évaluer l'acidité ou la basicité de l'eau, tandis que la conductivité électrique renseigne sur la concentration en ions dissous. La mesure de l'oxygène dissous est cruciale pour comprendre les conditions d'oxygénation de l'eau, et le potentiel d'oxydoréduction (Eh) fournit des indications sur les processus d'oxydation et de réduction en milieu aquatique. Ces mesures doivent être effectuées sur site à l'aide d'instruments portables calibrés afin de garantir la fiabilité des données (Odjohou et al., 2020).

- **La température**

Les sources thermales de la région présentent des variations significatives de température, permettant de les classer en plusieurs catégories : eaux froides (moins de 20 °C), eaux hypothermales (20 °C à 30 °C), eaux mésothermales (30 °C à 50 °C) et eaux hyperthermales (plus de 50 °C).

Les températures mesurées constituent un indicateur clé pour comprendre les caractéristiques hydrothermales de la zone d'étude. Les variations observées révèlent une diversité notable des conditions géothermales sous-jacentes. En effet, la température d'une source thermique est directement liée à la profondeur à laquelle l'eau souterraine est chauffée.

- **Le pH**

L'analyse des valeurs de pH mesurées pour la source thermique fournit des informations essentielles sur la nature chimique des eaux et leur équilibre acido-basique. Le pH, qui mesure l'acidité ou l'alcalinité d'une solution, joue un rôle crucial dans l'évaluation de la qualité chimique des eaux, ainsi que de leur potentiel d'utilisation dans divers contextes.

- **La conductivité électrique**

L'analyse des valeurs de conductivité électrique mesurées pour la source thermique est une indication importante de la concentration en sels dissous dans l'eau. La conductivité électrique est une mesure de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique, ce qui est directement lié à la présence d'ions dissous tels que les sels minéraux.

- **Transport et Analyse en Laboratoire**

Afin de garantir l'intégrité des échantillons, chaque flacon doit être correctement étiqueté avec des informations essentielles telles que la date et l'heure du prélèvement, le site de collecte, les conditions météorologiques ainsi que les paramètres mesurés in situ. Lorsque les analyses ne peuvent être réalisées immédiatement, il est recommandé de transporter les échantillons dans une glacière afin de limiter les altérations physico-chimiques. Cette précaution est particulièrement importante pour les analyses sensibles, telles que celles portant sur la composition chimique et la présence éventuelle de contaminants.

Choix et Conception du Système de Distillation

Le choix du système de distillation des eaux thermales dépend de plusieurs critères, notamment la **composition chimique de l'eau**, les **objectifs du traitement** (extraction des sels minéraux, production d'eau pure, rendement énergétique) et les **contraintes techniques et économiques (Bouhezila et al., 2011)**. Différentes techniques de distillation peuvent être envisagées, chacune présentant des avantages et des limites selon les conditions d'application.

7.1.Description des Composants du Système de Distillation

- **Source de Chaleur**

Le choix de la source de chaleur pour le système de distillation repose sur des critères de performance énergétique et de viabilité économique. Deux approches principales sont utilisées :

- **Chauffage Électrique**

L'énergie électrique nécessaire au chauffage peut être fournie soit par un réseau électrique conventionnel, soit par un générateur photovoltaïque. Les modules photovoltaïques ont une puissance variant de quelques watts-crête à plusieurs dizaines de watts-crête. Pour obtenir une puissance plus élevée, plusieurs modules sont connectés en série et en parallèle afin de former un générateur photovoltaïque **(Tiwari & Tiwari, 2007)**.

Le système comprend :

- Un régulateur de charge, qui protège les batteries contre les surcharges et les décharges profondes, prolongeant ainsi leur durée de vie **(Kalogirou, 2014)**.
- Un onduleur, qui convertit le courant continu du générateur photovoltaïque en courant alternatif pour alimenter les équipements nécessitant ce type d'alimentation.

- **Énergie Solaire**

L'énergie solaire est exploitée à travers un champ photovoltaïque, qui convertit le rayonnement solaire en électricité. Ce type de système est particulièrement avantageux dans les régions à fort ensoleillement, car il réduit les coûts opérationnels et l'empreinte carbone **(Gude, 2015)**.

L'efficacité du système dépend de plusieurs paramètres :

- L'intensité du rayonnement solaire, qui influence directement la production d'électricité **(Sharon et al., 2016)**.
- La technologie des panneaux solaires, qui doit être optimisée pour maximiser la conversion d'énergie **(Luque & Hegedus, 2011)**.
- Le stockage de l'énergie, assuré par des batteries capables de fournir l'énergie nécessaire lors des périodes sans ensoleillement **(Sahota et al., 2017)**.

- **Chambre d'Évaporation**

La chambre d'évaporation est un élément clé du système de distillation, où l'eau est chauffée jusqu'à son ébullition afin de séparer les impuretés et les minéraux dissous.

- Matériau utilisé : L'acier inoxydable 316L est privilégié pour sa résistance élevée à la corrosion et aux températures élevées (**Sharma et al., 2018**).
- Capacité : La chambre étudiée a une capacité de 50 litres, permettant d'assurer un rendement optimal pour le volume d'eau traité.
- Conception : Son design favorise une évaporation homogène, avec une répartition efficace de la chaleur pour minimiser les pertes thermiques et améliorer le rendement énergétique du processus (**Delyannis, 2003**).

Condenseur

Le condenseur est un échangeur thermique essentiel pour transformer la vapeur d'eau en eau liquide distillée.

- Type : Le système utilise un échangeur thermique à plaques en acier inoxydable 316L, garantissant une excellente résistance à la corrosion et une efficacité élevée dans le transfert de chaleur (**Alkhubdhiri et al., 2013**).
- Efficacité : Ce type de condenseur offre un rendement thermique d'environ 90 %, permettant une récupération optimale de la chaleur latente de condensation et une réduction de la consommation énergétique globale (**Gao et al., 2018**).

8.2. Système de Récupération de l'Eau Distillée

La récupération et le stockage de l'eau distillée sont essentiels pour garantir la pureté et la disponibilité continue de l'eau traitée.

- Réservoir de stockage : Il est fabriqué en acier inoxydable de haute qualité, assurant une conservation optimale et minimisant le risque de contamination (**Alkhubdhiri et al., 2013**).
- Contrôle de niveau automatisé : Un système de capteurs de niveau permet de réguler automatiquement l'apport en eau, optimisant ainsi l'utilisation et évitant tout débordement (**El-Agouz & Kabeel, 2017**).
- Dispositifs de sécurité :
 - Protection contre la surpression et la sous-pression, afin de maintenir un fonctionnement stable.
 - Système de réduction des pertes par évaporation, garantissant une conservation efficace de l'eau distillée pour une utilisation ultérieure (**Sharma et al., 2018**).

8.3. Définition du distillateur LAUDA :

L'appareil présenté sur les images est un bain-marie thermostatique de marque LAUDA, utilisé dans les laboratoires scientifiques pour chauffer les liquides à une température précise et constante. Ce modèle est spécialement conçu pour chauffer l'eau, produire de la vapeur, la condenser, et obtenir de l'eau distillée pure, exempte de sels et d'impuretés. Il est couramment utilisé dans les analyses chimiques, biologiques et physiques.

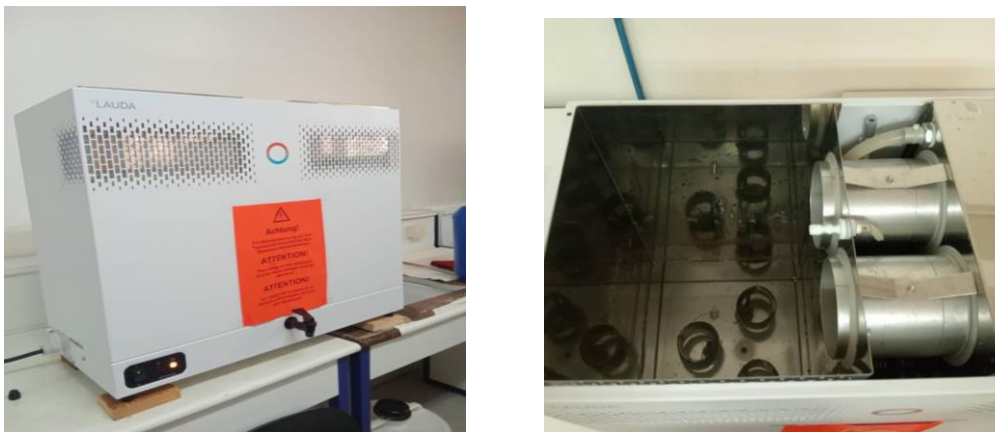


Fig. 15 : l'appareil de distillation

8.3.1. Méthode de travail

Remplissage de l'appareil :

Le réservoir de l'appareil est rempli avec de l'eau brute (de préférence préfiltrée pour éviter l'accumulation de dépôts calcaires).

Réglage de la température et mise en marche :

L'utilisateur règle la température souhaitée à l'aide du panneau de commande, puis met l'appareil en marche. Le système commence à chauffer l'eau de manière progressive.

Phase d'évaporation (Évaporation) :

Les résistances thermiques internes chauffent l'eau jusqu'à son point d'ébullition, ce qui entraîne sa transformation en vapeur.

Phase de condensation (Condensation) :

La vapeur produite est dirigée à travers des tuyaux ou des échangeurs refroidissants à l'intérieur de l'appareil. Le contact avec les surfaces froides provoque sa condensation en eau liquide.

Production de l'eau distillée :

L'eau condensée est recueillie dans un récipient prévu à cet effet. L'eau obtenue est distillée et pure, prête à être utilisée dans des analyses sensibles ou des expériences précises.

Arrêt et entretien :

Une fois l'opération terminée, l'appareil est éteint, l'eau résiduelle est évacuée, et le réservoir est nettoyé pour garantir un fonctionnement optimal et prolonger la durée de vie de l'équipement.

8.3.2. Les avantages :

- Précision thermique élevée grâce à un régulateur électronique intégré.
- Efficacité dans la production d'eau distillée en un seul cycle sécurisé.
- Haute sécurité d'utilisation, avec protection contre la surchauffe ou le fonctionnement à sec. Facilité d'utilisation et de maintenance.
- Design compact, adapté aux petits et moyens laboratoires.

8.3.3. Conclusion :

Le bain thermostatique LAUDA est un équipement indispensable pour les laboratoires qui nécessitent de l'eau distillée de haute pureté. Il assure les fonctions d'évaporation et de condensation dans un seul dispositif, avec un contrôle précis de la température. Grâce à sa simplicité, sa fiabilité et sa sécurité, il constitue un excellent choix pour les techniciens, chercheurs et étudiants en environnement scientifique.



CHAPITRE III :

Résultats et discussion

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les méthodes employées pour l'échantillonnage et les prélèvements d'échantillons, ainsi que les outils et techniques utilisés, tant sur le terrain qu'en laboratoire, pour l'analyse hydro chimique. Nous explorerons également les méthodes d'interprétation des résultats issus de ces analyses.

2. Préparation du matériel

Les échantillons d'eau destinés aux analyses physico-chimiques sont prélevés dans des bouteilles en polyéthylène de et des flacons en verre de 500 ml, stériles et bien rincés avec l'eau à échantillonner.

Comme règle générale, le matériel de terrain consiste en une série de bouteilles d'échantillonnage, une glacière, un échantillonneur (lorsque l'accessibilité au site et/ou la profondeur l'exige) et des instruments de mesure, tels qu'un multi-paramètre, thermomètre, un oxymètre et un PH-mètre.

Le volume des flacons à utiliser ainsi que le volume d'eau à prélever dépendent des paramètres qui doivent être analysés.



Fig.16 : Flacons en polyéthylènes (ions majeurs). Consort C931.

2.1. Calibrage des appareils :

Lorsque des instruments de mesure sont utilisés sur le terrain, leur calibrage est une étape essentielle à l'obtention de données exactes et précises. Les appareils les plus communément utilisés sont Le multi paramètre, le thermomètre et le PH-mètre.

Dans le cas d'un thermomètre digital un calibrage doit être effectué à quelques reprises au cours de l'année, mais cet exercice n'est pas nécessaire avant chaque campagne d'échantillonnage. Par contre, le pH-mètre doit être calibré avant chaque sortie sur le terrain.

2.2. Prélèvement des échantillons

Vu la sensibilité aux modifications des propriétés physico-chimiques des eaux thermales, et aussi les difficultés techniques et risques de blessures, le prélèvement des échantillons d'eau thermale peut s'effectuer de plusieurs façons, selon la taille du cours d'eau et l'accessibilité au site et la température de site. Dans les sources moins chaudes, l'idéal est de se placer au centre du cours d'eau et de remplir

les flacons à la main, au milieu de la colonne d'eau, en faisant face au courant mais pour les sources hyperthermales ou l'incapacité d'effectuer des prélèvements à main nue, nous utilisons des supports (gants résistants à la chaleur, pinces, cordes, ...etc), et un pont est la façon la plus facile d'avoir accès au centre du cours d'eau



Fig.17 : Technique de prélèvement des échantillons.

Les flacons doivent être rincés plusieurs fois à l'eau de la source thermique avant le prélèvement définitif, les flacons doivent être refermés sous l'eau dans l'endroit même du prélèvement (**Fig.18**). L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans altérer les caractéristiques physico-chimiques de l'eau. Il est essentiel que le préleveur ait une connaissance précise des conditions de prélèvement et de leur importance pour la qualité des résultats analytiques. Une organisation structurée est nécessaire, avec un personnel qualifié, une méthodologie adaptée à chaque cas, un choix judicieux des points de prélèvement et un matériel approprié (**Rodier et al., 2009**). Pour faciliter le travail de l'analyste et l'exploitation des résultats, tout en évitant les erreurs, il est recommandé d'étiqueter ou de numérotter très soigneusement les prélèvements (**Rodier et al., 2009**).

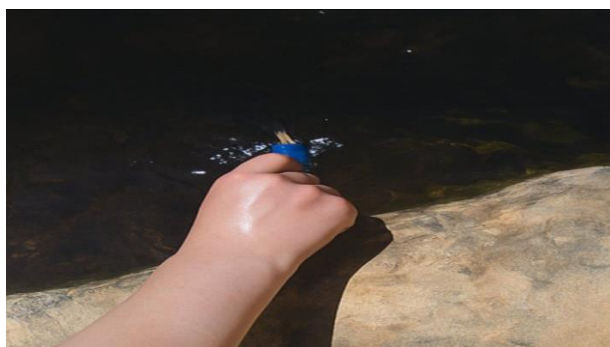


Fig.18 : Flacons rincés plusieurs et refermés sous l'eau.

3. Conservation des échantillons.

Le prélèvement subira obligatoirement un certain temps de transport et une éventuelle attente au laboratoire avant la mise en route analytique. Ces temps devront être réduits au minimum.

Pendant cette période, des phénomènes chimiques et bactériologiques peuvent provoquer des précipitations secondaires par changement de valence, des adsorptions sur les parois des récipients, des photo décompositions, des volatilisations et des biodégradations. Cela rend nécessaire l'emploi d'adjuvants de conservation et le maintien de conditions de température et d'obscurité adaptées (Rodier, 2009).

Le processus de conservation vise à préserver l'intégrité des échantillons prélevés entre le moment de l'échantillonnage et celui de l'analyse en laboratoire. Cette étape est essentielle, car plusieurs paramètres peuvent subir des modifications physiques ou des réactions chimiques dans le récipient, altérant ainsi la qualité originale de l'échantillon et compromettant la fiabilité des analyses.

Tous les échantillons doivent être conservés à environ 4 °C ou maintenus dans un environnement à cette température entre le moment du prélèvement et la réception au laboratoire. Pour cela, il est recommandé d'utiliser des glacières et des agents réfrigérants ou de la glace. (CEAEQ, 2009).

4.Variation spatiale des Paramètres Physico-chimiques :

Mesures In Situ Les paramètres physico-chimiques de l'eau sont systématiquement mesurés sur site. Cette démarche est particulièrement utile en début d'étude pour identifier les différentes masses d'eau présentes sur le terrain. Les mesures des paramètres physico-chimiques in situ sont essentielles pour reconstituer l'état de l'eau à la sortie de l'hydrosystème. Certains paramètres sont fugaces et ne peuvent être récupérés par la suite (Bakalowicz, 2005). D'autres peuvent évoluer pendant le transport des échantillons au laboratoire, d'où l'importance de réaliser ces déterminations directement sur le terrain.

La mesure de ces paramètres repose souvent sur des méthodes de précision inférieure à celles utilisées en laboratoire, mais l'intérêt de la mesure immédiate reste prépondérant, compte tenu des variations potentielles pouvant survenir durant le transport et la conservation en laboratoire. Par ailleurs, ces mesures sont également nécessaires lors d'une conservation prolongée de l'échantillon.

La mesure de la Température, le pH et la Conductivité électrique se fait au moyen d'un multi-paramètre CONSORT C931. Cet appareil est construit selon les dernières technologies et ne nécessite aucun entretien particulier. Il est équipé d'un nouveau système « anti-encrassement », les sondes Consort C931 permettent de mesurer 3 paramètres

Simultanément : température avec une précision de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, pH dont la précision est de $\pm 0,05$ unités pH et la conductivité électrique avec une précision de $\pm 1 \mu\text{S/cm}$.

▪ La Température

La température des eaux thermales peut changer après le prélèvement, ce qui fausserait les informations recueillies. Il est donc essentiel de réaliser des mesures précises directement à l'émergence de la source et après chaque collecte de l'échantillon, en utilisant une perche ou une corde pour rapprocher la sonde de la source. De manière générale, la température des eaux est

influencée par leur origine géologique (**Rodier, 1984**).

La température des eaux thermales augmente en fonction de la profondeur, un phénomène connu sous le nom de « gradient géothermique ». Lors de leur remontée, les eaux thermales peuvent se refroidir au contact des couches géologiques plus superficielles. Ces variations de température modifient les caractéristiques chimiques des eaux. En effet, la solubilité des minéraux varie avec la température, ce qui peut amener les solutions à devenir sursaturées par rapport à certaines espèces minérales, entraînant une précipitation qui affecte la teneur en éléments dissous.

- **Le potentiel d'hydrogène (pH)**

Le pH indique l'acidité ou l'alcalinité d'une eau et conditionne de nombreux équilibres physico-chimiques, il dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique du substrat et du bassin versant traverser. (3.4)

- **La conductivité électrique (CE) :**

En présence d'ions, l'eau conduit l'électricité et la mesure de conductance permet d'estimer

La charge minérale présente dans la solution. La conductivité est également fonction de la température de l'eau thermique, elle est plus importante lorsque la température augmente. Elle sert aussi d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau (**Rodier, 1984**), la valeur mesurée sur le terrain doit être comparable à celle mesurée au laboratoire



Fig.19 : Mesures des paramètres physico-chimiques In Situ.

5.Mesures au laboratoire :

Les analyses des paramètres chimiques des échantillons sont effectuées au niveau du l'Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage (INSID) et le Laboratoire d'Analyse Environnementales et d'Essais Chimiques sur les Matériaux (Ain M'Lila).

Les éléments chimiques concernés par cette étude analytique sont :

▪ **Éléments majeurs : Cations : Na^+ , K^+ , Ca^{+} , Mg^{++}**

* **Anions : Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , NO_3**

Tableau 3 : Méthodes et laboratoires d'analyse des éléments chimiques

Elément chimique	Méthode d'analyse	Laboratoire
SO_4^{-2} , NO_3^- et Cl^-	La spectrophotométrie à flamme.	ADE KHENCHELA
Na^+ , K^+ , HCO_3^-	La spectrophotométrie à flamme.	Laboratoire université abbes laghror khenchela
Ca^{+} , Mg^{+2} ,	La méthode titrimétrique.	

Tableau 4 : Résultats d'analyses concentration de chaque élément chimique

	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{-2}	HCO_3^-	NO_3^-
Hamam ESSALHINE	120	33	661	21	901	289	260	2

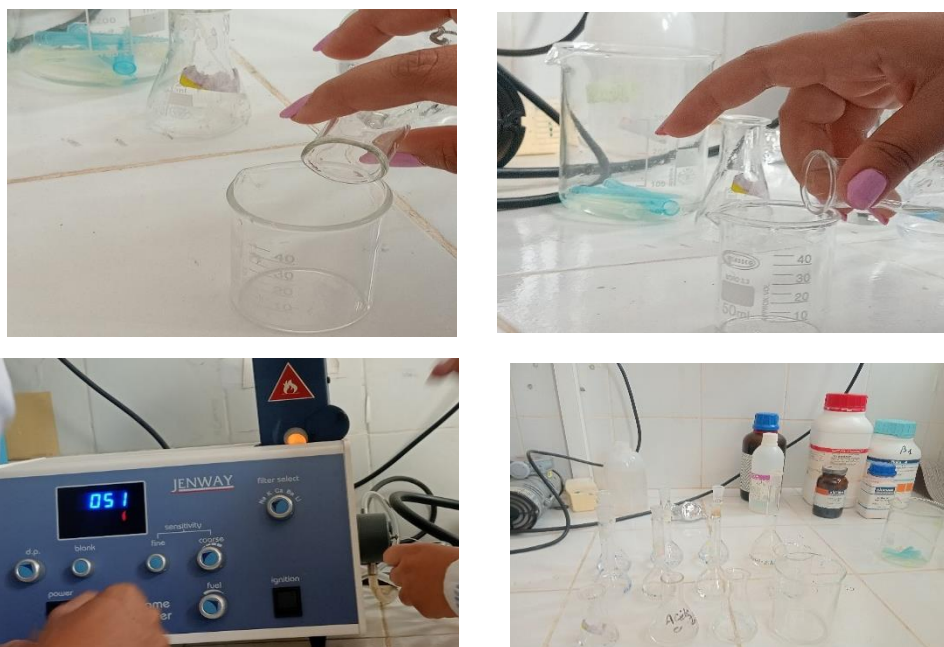


Fig.20 : le travail en laboratoires

4. Étude analytique des paramètres physiques

4.1. La température

Tableau 5 : Valeurs de la température mesurée.

L'eau	Température (°C)	Classification
L'eau thermale (Hammam Essalhinne)	70	Eaux hyperthermales
L'eau de robinet	21.2	Eaux tempérées

1. Eau thermale de Hammam Essalhinne :

Température mesurée : 70°C

Classification : **Eau hyperthermale**

Cette eau se classe parmi les eaux hyperthermales, ce qui signifie qu'elle provient de sources profondes présentant une température élevée naturellement. Une telle température indique une origine géothermique importante et suggère une minéralisation souvent élevée, ce qui en fait une eau potentiellement intéressante à des fins thérapeutiques ou balnéaires

2. Eau du robinet

Température mesurée : 21,2 °C

Classification : **hypo thermales**

L'eau du robinet, avec une température proche de la température ambiante, est classée comme **hypo thermales**. Cela est typique des eaux distribuées à des fins domestiques, qui ne subissent pas de réchauffement géothermique et qui sont généralement de faible minéralisation comparée aux eaux thermales.

4.2. Le pH :

Tableau 6 : Le pH

Types d'eaux	pH
Eaux thermales	6.78
Eaux de robinet	6.69

1. Eau thermale (Hammam ESSalihine)

- **pH mesuré : 6,78**
- Légèrement acide, cette valeur se rapproche de la neutralité mais peut être influencée par la minéralisation naturelle de l'eau. La présence de dioxyde de carbone dissous, d'ions ferreux ou sulfurés peut abaisser le pH.
- Cette faible acidité est typique des eaux thermales émergentes, riches en minéraux dissous, en particulier dans des environnements géothermiques.

2. Eau du robinet

- **pH mesuré : 6,69**
- Ce pH reste conforme aux normes de qualité pour l'eau potable (6,5 à 8,5). Il peut résulter de la présence de CO₂ dissous, ou des traitements de potabilisation comme la chloration ou la correction de dureté

4.3. La conductivité :

Tableau 7 : La conductivité électrique

Types d'eaux	Conductivité électrique (ms)
eaux thermales	2.3
L'eau de robinet	2 .8

1. Eau thermale (2,3 mS/cm)

La valeur mesurée de **2,3 mS/cm** indique une eau **modérément minéralisée**. Cette conductivité reflète la présence d'ions d'origine géothermique, tels que le sodium, le calcium, le magnésium, les chlorures ou les sulfates. La minéralisation modérée est cohérente avec les propriétés thérapeutiques recherchées dans les eaux thermales, où l'équilibre ionique joue un rôle dans l'usage balnéaire ou dermatologique

La **conductivité légèrement plus élevée (2,8 mS/cm)** montre que l'eau de robinet est **un peu plus minéralisée** que l'eau thermale mesurée. Cela peut être dû :

- À l'origine géologique de l'eau distribuée (captage dans des nappes riches en minéraux),
- Ou aux traitements appliqués (addition de sels pour la stabilisation du pH ou la réduction de la corrosion des canalisations).

Bien que cette valeur reste dans les normes admissibles pour l'eau potable (généralement $< 2,5-3$ mS/cm selon les pays), elle suggère une **présence ionique significative**, notamment en calcium et bicarbonates si l'eau est dite « dure »

5. Les éléments majeurs

L'étude des éléments majeurs des eaux thermales, à savoir le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), le chlorure (Cl^-), le sulfate (SO_4^{2-}), le nitrate (NO_3^-) et le bicarbonate (HCO_3^-), fournit des informations importantes sur la composition chimique globale de ces eaux. Les résultats des analyses chimiques des éléments majeurs des sources thermales sont présentés dans le tableau suivant :

a. Les cations

❖ Calcium Ca^{+2}

La présence des ions Ca^{+2} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles :

Soit la dissolution des formations carbonatées ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{+2} + \text{CO}_3^{-2}$)

Soit la dissolution des formations gypseuses $\text{CaSO}_4 + 2(\text{H}_2\text{O}) \rightarrow \text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{+2} + 2(\text{H}_2\text{O})$.

Une teneur faible en calcium fait penser à un échange de base contre le sodium ou à l'absence de minéraux riches en calcium faiblement altérables. Par contre une teneur élevée en calcium provient de la mise en solution du gypse ou de l'anhydrite.

❖ Le magnésium Mg^{+2}

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium, magnésite :



Quand la dolomie est attaquée, il n'y a pas de solubilité sélective, il y a autant de calcium que de magnésium. Si toutefois la quantité du calcium dépasse celle du magnésium, l'eau aurait obtenu sa minéralisation du calcaire. Par contre une teneur élevée en magnésium peut faire penser à une contamination d'eau de mer ou du lessivage des minéraux magnésiens.

On pense ici que les apports en magnésium proviennent de la dissolution des formations évaporitiques, ces concentrations indiquent que ces eaux sont influencées par la dissolution des Formations carbonatées et les formations gypseuses.

❖ Le sodium Na^+

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. La plus importante source de sodium se trouve dans les évaporites.

L'existence d'inclusion évaporitiques sous forme de roches salines riches en NaCl et CaSO₄ et Na₂SO₄ (Halite, gypse et muabilités peut être aussi à l'origine de cet élément.

Ces concentrations témoignent d'un apport salifère depuis les formations évaporitiques liées aux Sebkhas qui se trouvent près de la région de Khenchela, d'ailleurs ces points présentent les valeurs les plus élevées à l'est de l'Algérie.

❖ **Le potassium K⁺**

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées, des argiles potassiques

En général le potassium dépasse rarement les **10 ou 20 mg/l** dans les eaux thermales

Sur notre terrain la teneur en potassium dans les eaux Hammam Essalhine est presque identique de l'ordre de **22mg/l**

b. Les anions

❖ **Les chlorures Cl⁻**

L'origine de cet élément est comme pour le cas du sodium, liée principalement à la dissolution des formations salifères. Les évaporites constituent la source principale de cet

Élément. L'effet de la salinité marine, les bassins endoréiques (Chotts, Sebkhas), les eaux fossiles ou cannées, le salage des routes et l'adoucissement des eaux par les résines peuvent aussi être à l'origine de cet élément. Généralement les eaux riches en chlore sont riches en sodium parfois le calcium remplace le sodium.

Les de Cl⁻ teneurs présentent des valeurs importantes par rapport à celle du sodium, à cause des caractéristiques spéciales de cet élément qui ne rentre pas dans les phénomènes de précipitation chimique, ne s'adsorbe pas par les formations géologiques et qui est très mobile.

Ces concentrations indiquent l'existence d'apports salifères à partir des formations évaporitiques liées à la Sebkha se trouvant près de ces régions.

❖ **Les sulfates SO₄⁻²**

La présence des ions sulfatés dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses, à la dégradation de la matière organique dans le sol (Vieille, 1983) ainsi qu'à l'apport anthropique (origine agricole).

Donc la présence des sulfates est beaucoup plus liée aux formations gypseuses.

❖ **Les bicarbonates HCO₃⁻**

Les bicarbonates résultent de la dissolution des roches calcaires ou d'émanation du magma profond, l'apport atmosphérique de cet élément est négligeable.

❖ Les nitrates NO_3^-

Les nitrates, représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. L'apport atmosphérique en nitrates est faible, la teneur naturelle des eaux thermale en cet élément est également faible, elle dépend des types de sols, de la végétation qui les recouvrent ainsi que du taux d'oxygénation dans la zone noyée. On peut dire aussi que l'origine des nitrates dans l'eau thermale est essentiellement externe (apports anthropiques). Les nitrates sont utilisés comme indice de pollution.

Tableau 8 : Analyses chimiques en éléments majeur (mg/l) et paramètres physico-chimiques

Point d'eau	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-
Hamam ESSALHINE	120	33	661	21	901	289	260	2

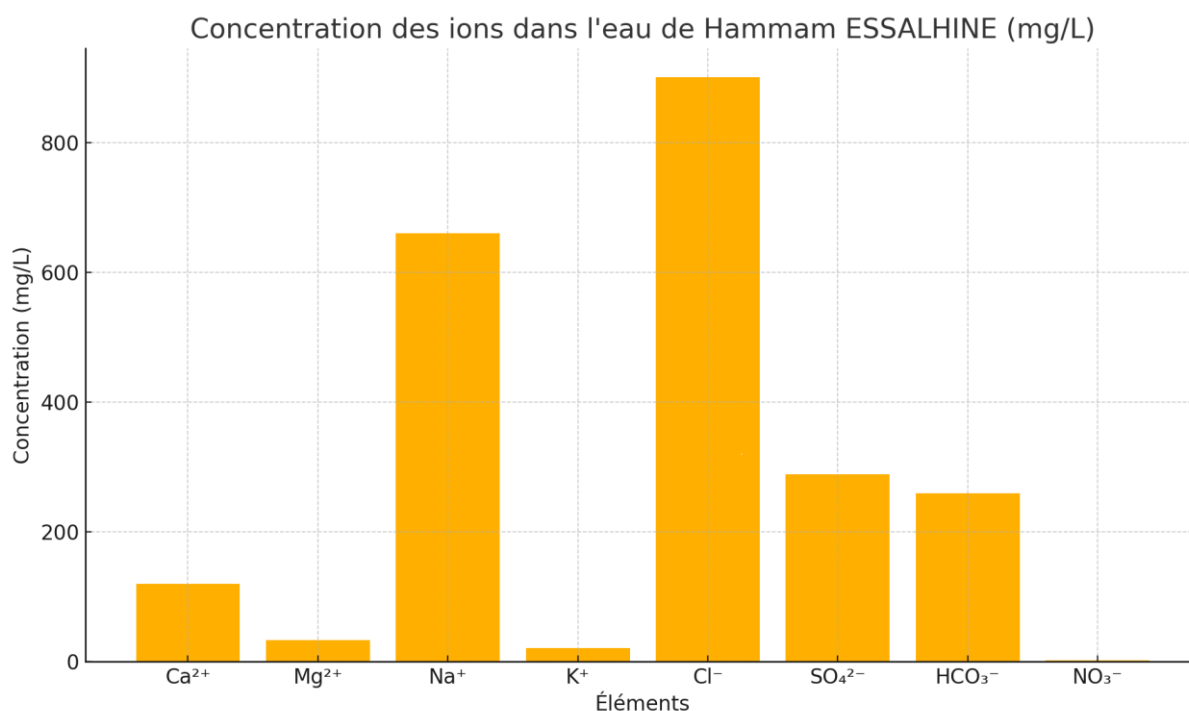


Fig.21 : Analyses chimiques en éléments majeurs (mg/l)

6. Représentation graphique des résultats des analyses chimiques

6.1. Diagramme de Piper

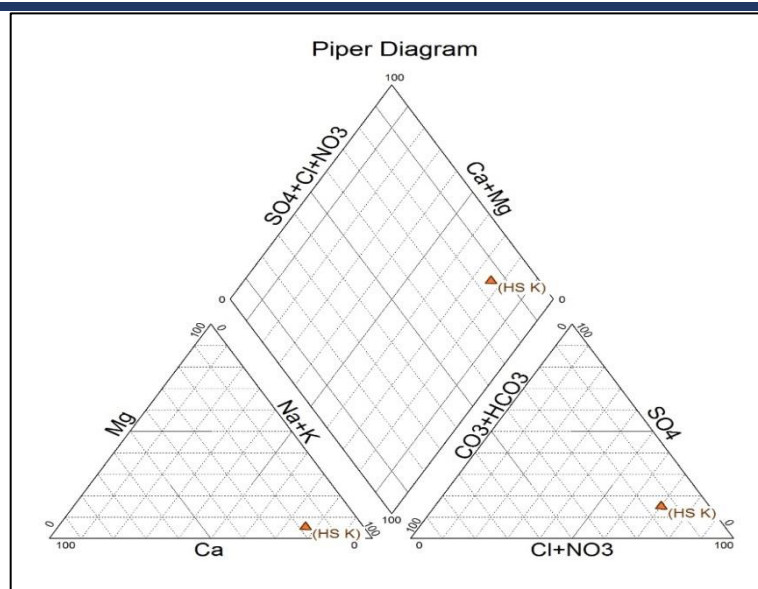


Fig.22 : Diagramme de Piper, Représentations les faciès chimiques

Le diagramme de Piper est une méthode graphique utilisée pour analyser la composition chimique des eaux. Il permet de classifier les types d'eaux en fonction de la répartition des ions majeurs (cation et anions) qu'elles contiennent. La classification est basée sur les quatre quadrants du diagramme : les triangles supérieurs représentent les ions cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), tandis que les triangles inférieurs représentent les ions anions (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}).

Le point correspondant à la source d'eau thermique de la zone d'étude est situé principalement dans les zones du diagramme de Piper indiquant une forte présence d'ions chlorures et sodium. Cela révèle un faciès chimique chloruré sodique, ce qui signifie que cette eau thermique est riche en chlorures et en sodium. Ce type d'eau est caractéristique d'une minéralisation élevée, souvent liée à une circulation profonde ou à une interaction prolongée avec les roches environnantes.

7.Étude comparative de la production d'eau distillée à partir de l'eau thermique de Hammam Essalihine et de l'eau de robinet :

La disponibilité d'eau potable constitue un défi majeur dans plusieurs régions semi-arides d'Algérie, notamment à Khenchela. Dans ce contexte, la distillation solaire ou électrique représente une solution prometteuse. Toutefois, cette méthode est énergivore, en particulier lorsque l'eau source est froide. L'utilisation d'eau thermique, déjà naturellement chaude, pourrait permettre de réduire la consommation énergétique tout en augmentant le rendement de distillation.

Le présent chapitre se propose d'étudier l'efficacité de la distillation appliquée à deux types d'eau :

L'eau thermique de Hammam Essalihine, caractérisée par une température élevée à la source.

L'eau de robinet, à température ambiante.

Nous comparons les volumes produits, analysons les apports thermiques nécessaires, et discutons les implications énergétiques et environnementales.

8. Caractéristiques physiques des eaux utilisées

Eau thermale de Hammam Essalhine

Température à la source : $\approx 65\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Riche en minéraux, mais la teneur en solides dissous n'a pas d'impact direct sur l'évaporation.

Température initiale plus proche du point d'ébullition ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 1 atm), ce qui réduit les besoins énergétiques.

Eau de robinet

Température moyenne : $20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (variable selon la saison).

Moins énergétique car un plus grand apport thermique est nécessaire pour atteindre le point d'ébullition.

Données expérimentales

Les expériences ont été réalisées dans des conditions identiques (même appareil, même volume initial, mêmes conditions ambiantes). Voici les résultats observés :

Tableau.9 : Quantité d'eau distillée extraite selon le temps et le type d'eau

Le temps (min)	Quantité Eau distillés extrait d'eau thermique (L)	Quantité Eau distillés extrait d'eau de robinet (L)
15	1.5	1
30	5.550	4.5

8.1. Analyse des résultats

Comparaison des rendements

À 15 minutes :

Eau thermique : 1,5 L

Eau de robinet : 1,0 L

Différence : +50 % en faveur de l'eau thermique

À 30 minutes :

Eau thermique : 5,55 L

Eau de robinet : 4,5 L

Différence : +1,05 L (+23,3 %)

Interprétation : La température initiale plus élevée de l'eau thermique permet une évaporation plus rapide et plus efficace.

8.2 Bilan énergétique simplifié

L'énergie nécessaire pour chauffer une masse m d'eau de température initiale jusqu'à l'ébullition est donnée par :

$$Q = M \cdot C(T_{eb} - T_i)$$

Où :

Q est l'énergie thermique (en Joules),

C la capacité calorifique de l'eau ($\approx 4\,186 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$),

$T_{eb} = 100^\circ\text{C}$,

T_i est la température initiale.

Pour 1 L d'eau (= 1 kg) :

Eau de robinet ($T_i = 21.2^\circ\text{C}$) :

$$Q = 1 \cdot 4\,186 (100 - 21.2) = 330868,8 \text{ J}$$

Eau thermique ($T_i = 70^\circ\text{C}$) :

$$Q = 1 \cdot 4\,186 (100 - 70) = 125580 \text{ J}$$

Économie d'énergie :

$$\frac{(330868,8 - 125580)}{330868,8} 100 \approx \mathbf{62.07 \%}$$

Cela signifie qu'en utilisant l'eau thermique, on économise environ un tiers de l'énergie nécessaire au chauffage

Tableau.10 : Comparatif – Distillat d’eau thermique vs. Distillat d’eau du robinet

Paramètre	Distillat – Eau thermal	Distillat – Eau du robinet	Écart relatif	Remarques
Ph	6,85	6,87	< 0,3 %	Variation négligeable
Conductivité (µS/cm)	1,2	1,3	~8 %	Très faible écart
Résidus secs (mg/L)	2,1	2,2	~4,7 %	Similaire
Transparence	Totale	Totale	—	Identique
Odeur	Aucune	Aucune	Aucune	Identique
Sodium Na ⁺ (mg/L)	< 0,5	< 0,5	—	Non détecté
Magnésium Mg ²⁺ (mg/L)	< 0,2	< 0,2	—	Non détecté
Chlorures Cl ⁻ (mg/L)	< 0,3	< 0,3	—	Non détecté
Sulfates SO ₄ ²⁻ (mg/L)	< < 0,4	<< 0,4	—	Non détecté
Calcium Ca ²⁺ (mg/L)	< 0,5	< 0,5	—	Non détecté

Les résultats montrent que le distillat obtenu à partir de l’eau thermique et celui obtenu à partir de l’eau du robinet présentent des propriétés physico-chimiques très similaires.

Les légères différences de conductivité ou de résidus secs restent dans la marge d’erreur expérimentale et ne sont pas significatives.

Les ions majeurs ne sont pas détectés dans les deux cas, confirmant une efficacité identique du procédé de distillation, quelle que soit la nature de l’eau d’entrée.

Conclusion : Le procédé de distillation élimine efficacement les composés dissous, ce qui permet d’obtenir une eau purifiée homogène, indépendante de la qualité initiale de l’eau brute (qu’elle soit thermique ou de distribution publique).

8.3. Avantages environnementaux et économiques

Énergie économisée : réduction de la consommation électrique (réduction de la facture, meilleur rendement en cas d'utilisation solaire ou générateur).

Durée de distillation réduite : la production d'un litre d'eau distillée nécessite moins de temps.

Adaptation locale : l'abondance des eaux thermales à Hammam Essalhine rend cette méthode applicable et durable pour des installations rurales ou semi-industrielles.

9.Recommandations pour l'optimisation

Couplage avec l'énergie solaire : l'énergie thermique naturelle de l'eau thermale, combinée au rayonnement solaire, pourrait permettre une distillation passive ou semi-active sans électricité.

Récupération de la chaleur résiduelle : installer des systèmes à échangeurs pour préchauffer l'eau entrante.

Utilisation de matériaux à haute conductivité thermique dans les dispositifs de distillation.

10.Rentabilité économique :

- **Source d'énergie naturelle et gratuite :**

L'eau thermale chaude permet de réduire considérablement les coûts liés à l'énergie utilisée pour la distillation.

- **Réduction des coûts de production :**

Moins de consommation d'électricité ou de gaz comparé aux procédés classiques de distillation.

- **Valorisation d'une ressource locale :**

Utilisation des eaux thermales locales diminue la dépendance aux importations d'eau distillée.

- **Création d'emplois locaux :**

Développement de postes dans la gestion, l'exploitation, la maintenance et la logistique du site.

- **Potentiel de commercialisation régionale et nationale :**

L'eau distillée produite peut répondre à la demande des hôpitaux, laboratoires, industries, etc.

- **Possibilité d'intégrer des technologies durables :**

Comme la distillation solaire ou multi-effet pour améliorer l'efficacité énergétique.

- **Impact environnemental positif :**

Diminution de l'empreinte carbone grâce à l'utilisation de chaleur naturelle.

11. Conclusion

L'étude expérimentale et énergétique menée démontre que l'eau thermale de Hammam Essalhine constitue une source optimale pour la production d'eau distillée. Elle permet non seulement un meilleur rendement de distillation, mais surtout une économie d'énergie importante. Ces résultats

encouragent à intégrer cette ressource locale dans des systèmes de production d'eau potable écologiques et autonomes.

Conclusion Générale

L'objectif principal de cette étude était de concevoir et d'optimiser un procédé de distillation exploitant les eaux thermales de Hammam Essalihine, dans une perspective de valorisation durable, à la fois énergétique, environnementale et économique. En mobilisant une approche multidisciplinaire combinant la caractérisation physico-chimique des eaux, l'analyse comparative des techniques de distillation, ainsi que l'évaluation de la qualité de l'eau produite et des performances énergétiques cette recherche a permis de mettre en évidence le potentiel considérable d'une ressource naturelle encore peu exploitée.

Les résultats obtenus démontrent que les eaux thermales de Hammam Essalihine présentent des propriétés particulièrement favorables à la distillation, notamment une température d'émergence naturellement élevée et une composition minérale compatible avec les procédés thermiques. Ces caractéristiques ont permis d'obtenir un rendement de distillation supérieur à celui observé avec l'eau de robinet. De plus, l'apport thermique gratuit offert par la source chaude réduit significativement la consommation énergétique du procédé, ce qui se traduit par un coût de production de l'eau distillée sensiblement plus bas que celui associé à la distillation de l'eau de robinet.

L'ensemble du travail confirme qu'il est possible de concilier valorisation des eaux thermales et production durable d'eau pure, tout en respectant les principes du développement durable. Le procédé étudié favorise en effet la protection de l'environnement, l'utilisation rationnelle des ressources naturelles et l'autonomie locale en eau de qualité. Cette approche s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire, de transition énergétique et de durabilité territoriale.

Cependant, certaines limites ont été relevées, notamment la variabilité des conditions climatiques qui peuvent influencer la stabilité du rendement, ainsi que la nécessité d'un dimensionnement optimisé pour envisager une production à plus grande échelle. Ces éléments constituent des perspectives prioritaires pour les recherches futures et les potentielles applications industrielles.

Références bibliographiques :

- Abdallah, S., Ould El Hadj, M. D., & Guerroud, N. (2018).** Valorisation des déchets issus de la production de biodiesel par distillation simple. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Algérie.
- Alkhudhiri, A., Darwish, N., & Hilal, N. (2013).** Membrane distillation: A comprehensive review. *Desalination*, 308, 102-118.
- APHA (American Public Health Association) (2017).** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd edition. Washington, D.C.
- Authier and P. Duvernois,(1997).** Patrimoine et traditions du thermalisme. Editions Privat
- Badran, O. O., Abu-Khader, M. M., & Mousa, H. (2005).** Renewable energy sources for desalination. *Desalination*, 183(1-3), 207-214.
- BAIT. O, Etude énergétique d'un distillateur solaire multi-étages. (2014),** Université de Batna 2
- Boughalali M, (2003).** Thermalismes et thalassothérapie en Algérie'', communication, Revue la Presse thermale et climatique 2003, pp 121,136. Société française d'hydrologie et De climatologie médicale.)
- Bouguecha.S, Chouikh. R, Dhaouadi. K, (2015).** Experimental and theoretical study of solar desalination unit. *Energy Procedia*, 74, 869-878.
- Bouhezila, F., Harik, M., & Lounici, H. (2011).** Étude des techniques de dessalement des eaux souterraines en Algérie. *Desalination*, 276(1-3), 231-237.
- Boukroufa, M. (2015).** Extraction des huiles essentielles : comparaison entre Hydro distillation conventionnelle et procédés assistés par micro-ondes. École Nationale Polytechnique, Alger. Disponible en ligne
- Carey, F. A. (2007).** Advanced Organic Chemistry: Part B: Reaction and Synthesis, 5th edition, Springer, ISBN: 978-0-387-68354-6.
- Chaouchi, B.Bouguecha, S., & Dhaouadi, K. (2021).** Performance analysis of solar stills for brackish water desalination. *Renewable Energy*, 170, 901-912.
- Delyannis, E. (2003).** Historic background of desalination and renewable energies. *Solar Energy*, 75(5), 357-366.
- E. Bazin and E. C. E. Maurel, (1870)** Leçons sur le traitement des maladies chroniques en général et des affections de la peau en particulier : par l'emploi comparé des eaux minérales de l'hydrothérapie et des moyens pharmaceutiques. Adrien Delahaye.
- [Eau distillée – Concept, utilisations, propriétés et caractéristiques](#) ³⁴
- El-Agouz, S. A.Kabeel, A. E. (2017).** Theoretical and experimental study of a vacuum distillation system. *Energy Conversion and Management*, 140, 21-32.
- Elango, T., Kannan, E., & Kalidasa Murugavel, K. (2016).** Performance study on single basin single slope solar still with different water nanofluids. *Desalination*, 380, 66-74.
- El-Sebaii, A.J.E.C. (2000).** and Management, Effect of wind speed on some designs of solar stills.

- Fath, H. E. S., Ghazy, A., & Hassabou, A. H. (2008).** Solar desalination: A promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a sustainable environment. *Desalination*, 217, 52-64.
- Fath, H. E. S., Sadik, M. W., & Said, E. T. (2008).** Desalination using solar energy: Review. *Desalination*, 217(1-3), 1-12.
- Felder, R.M.Rousseau, R.W. (2016).** Elementary Principles of Chemical Processes, 4th Edition, Wiley, ISBN: 978-1118431221.
- G. O. G. Eibling, and J.W. “Bloemer,(1991)** .Energy balance distillers” Vol. 7, N° 4, A. I. Ch. E. Journal , pp.
- Gad, H. E., Kabeel, A. E., & Sathyamurthy, R. (2019).** Performance of solar stills with different cooling methods: A review. *Solar Energy*, 188, 1117-1135.
- Gad, H. E., Sharshir, S. W., & Ismail, M. S. (2020).** Enhancing solar distillation process using phase change materials: A review. *Journal of Cleaner Production*, 247,119178.
- Gao, X., Lin, D., & Zhang, J. (2018).** Design and performance of an energy-efficient water condensation system. *Applied Thermal Engineering*, 132, 265-272.
- Goosen, M., Mahmoudi, H., Alyousef, Y. Ghaffour, N. (2023).** Solar desalination: A review of recent developments in environmental, regulatory and economic issues. *Solar Compass*, 5, 100034.
- Gude, V. G. (2015).** Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 52-68. **Guigue S., 1947,** “ Les sources thermo minérales de l’Algérie”, Etude géochimique, Bulletin du service de la carte géologique de l’Algérie, série 3, volume 2.
- Hansen, L. D., Wadsö, L., & Kasemo, B. (2015).** Thermal conductivity and heat transfer in condensation processes. *International Journal of Thermal Sciences*, 95, 34-45.
- Harvey, D. (2015).** Modern Analytical Chemistry, 2nd Edition, McGraw-Hill Education, ISBN: 978-0072375473.
- Hilali, S. (2020).** Eco-extraction et séchage solaire thermique : cas de la valorisation des pelures d’orange et feuilles de romarin. Université Mohammed V, Maroc.
- J. M. Blázquez, (2005)** “Le culte des eaux dans la Péninsule Ibérique.
- Julie Beau séjour. (2003)** “Conception d’un distillateur solaire pour le traitement des effluents d’une tannerie Mexicaine“. Thèse de M. Sc. A de Génie Civil. Université de Montréal, Canada.
- Kabeel, A. E., & El-Agouz, S. A. (2011).** Review of researches and developments on solar stills. *Desalination*, 276(1-3), 1-12.
- Kalboussi, F., Dridi, C. Khemiri, N. (2020).** Optimization of a solar distillation system for brackish water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101416.
- Kalogirou, S. A. (2014).** Solar energy engineering: Processes and systems. Academic Press.
- Luque, A., & Hegedus, S. (2011).** Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley & Sons.
- M.A.S, Tiwari. G. N, Kumar. A, and Sodha M. (1982).** S. Solar Distillation Oxford. UK. Pergamon Press.

McCabe, W.L, Smith, J.C. Harriott, P. (2017). Unit Operations of Chemical Engineering, 7th Edition, McGraw-Hill Education, ISBN: 978-0072848236.

Nafey, A.S., et al., Parameters affecting solar still productivity. 2000. 41(16) : p. 1797- 1809. Comparaison des activités des isotopes de l'uranium et du radium dans quelques échantillons d'eau de puits et de sources thermales au Maroc," Revue des sciences de l'eau, vol. 13, no. 2.

Odjohou, E. Amani, M., Soro, G ; Monde, S. (2020). Caractérisation physico-chimique des eaux d'un système lacustre du cordon littoral ivoirien : cas du lac Labion. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 14, 1878-1892.

Portail pédagogique : physique chimie - distillations simple et fractionnée¹⁶

R.V. Dunkle, (1961). Solar water distillation, the roof type still and multiple effect diffusion still, Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization, Victoria, Australia, pp. 895-902.

Rahbar, N., Esfahani, J. A.; Rosendahl, L. (2017). A review of solar water desalination systems: Modeling and optimization. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, 972-1005.

Richardson, S.D., & Kimura, S.Y. (2016). ; Water Analysis: Emerging Contaminants and Current Issues." Analytical Chemistry, 88(1), 546-582. DOI : 10.1021/acs.analchem.5b04493

Sahota, L., Sharma, V., Sudhakar, K., et al. (2017). Solar photovoltaic water pumping system for irrigation: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 2106-2136.

Sellami, M. (2014), Etude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région Sud-Est Algérien (Ouargla) , Thèse de Doctorat: Sciences Physiques, Physiques Energétique. Université

Sellami, M.H. (2014). Etude et amelioration des techniques de Distillation solaire dans la region sud-est algerien (ouargla). [Separation Process Engineering P. Wankat, Prentice Hall 2e ed](#)

Sharma, P. Parmar, A.Kothari, D. P. (2018). Advances in solar stills for water desalination: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 664-678.

Sharon, H. Reddy, K. S. (2016). A review of solar energy driven desalination technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 1080-1118.

Shatat, M., & Mahkamov, K. (2014). Determination of the optimum conditions for a solar water desalination system. Renewable Energy, 69, 50-59.

Singh, S.K., et al. (2021), Comparative Performance and parametric study of solar still: A review. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 47

Tiwari, G. N.Sahota, L. (2019). Advanced solar distillation systems: Basic principles, thermal modeling, and applications. Springer.

Tiwari, G. N.Tiwari, A. K. (2007). Solar distillation practice for water desalination systems. Anamaya Publishers.

Tiwari, G. N., Kumar, T. Sodha, M. S. (2003). Performance evaluation of a solar still: Parametric and optimization. Solar Energy, 75(1), 45-49.